

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2021.4.16

СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ

К.Б. Фатькин, А.Г. Ярославцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Одним из наиболее сложных и трудно прогнозируемых геологических процессов является карст. В приведенной работе описан опыт использования малоглубинной сейсморазведки в качестве метода обнаружения и картирования областей распространения природного карста. В комплексе обработки и интерпретации полученных данных применена методика анализа изменения удалений отраженной волны с удалением источник-приемник.

Ключевые слова: карст, малоглубинная сейсморазведка, зоны трещиноватости и разуплотнения, динамический анализ, дистанционный прогноз, отраженные волны.

Растворимые в воде горные породы распространены на территории Пермского края достаточно широко. Деформации земной поверхности, включающие относительно медленные просадки и катастрофические провалы, наиболее часто связаны с сульфатным карстом. Кроме того, на четверти территории развитие карстовых явлений соотносится с карбонатным карстом и единичные, но наиболее масштабные по разрушениям – с соляным [1].

Образование карстовых провалов (воронок) влияет на многие стороны хозяйственной деятельности человека, а иногда представляет и реальную угрозу для жизни. Карстообразование представляет сложный и многообразный процесс, проявляющийся как на дневной поверхности, так и в верхней части земной коры. Существует множество способов изучения карста и, как правило, это комплекс работ, включающий качественные и количественные методы. К последним относятся и геофизические методы – термометрия, электроразведка и малоглубинная сейсморазведка. С помощью комплексных исследований уточняются и детализируются геологические и гидрогеологические предпосылки образования карста на отдельных участках. Основой для выработки рекомендаций по борьбе с карстом и оценки развития опасных геологических процессов и состояния инженерных объектов может служить составление карты инженерно-геологического районирования.

Для решения поставленной задачи выполнены полевые сейсморазведочные работы по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдений. Исследования выполнены в 624 точках наблюдений, распределенных по 6 профильным линиям общей длиной 1 236 погонных метра. Положение отработанных сейсморазведочных профилей представлено на рисунке 1.

Сейсморазведочная аппаратура, используемая при полевой регистрации данных, включает в себя источники упругих волн, сейсмоприемные устройства (геофоны) и цифровые регистраторы сейсморазведочных данных.

При проведении инженерных сейсморазведочных работ возбуждение упругих колебаний выполнялось механическим ударным источником (автоматизированный молот AWD-33).

Процесс обработки полученных сейсморазведочных данных в рамках обрабатывающих систем SPS-PC традиционно разбит на две стадии: по сейсмограммам, по временному разрезу. Задействован широкий набор процедур: расчет и коррекция кинематических поправок, полосовая и обратная фильтрации, расчет остаточных фазовых сдвигов по программам коррекции статических поправок, вычитание

наиболее интенсивных поверхностных волн-помех, коррекция формы сигнала, когерентная фильтрация. В процессе обработки данных также использованы собственные программы Отдела активной сейсмоакустики «ГИ УрО РАН».

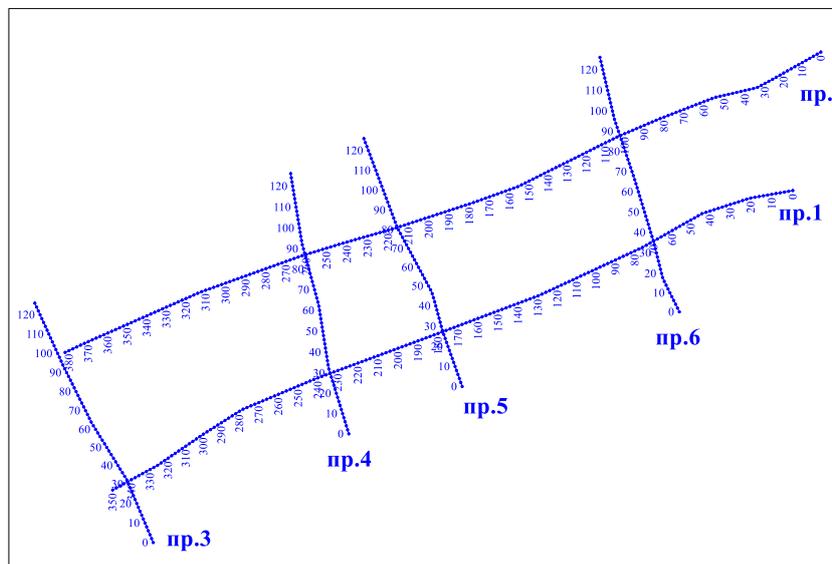


Рис. 1. Схема взаимного расположения сейсмических профилей

На рисунке 2 представлен пример полевой сейсмограммы (2а) и сейсмограммы после обработки (2б).

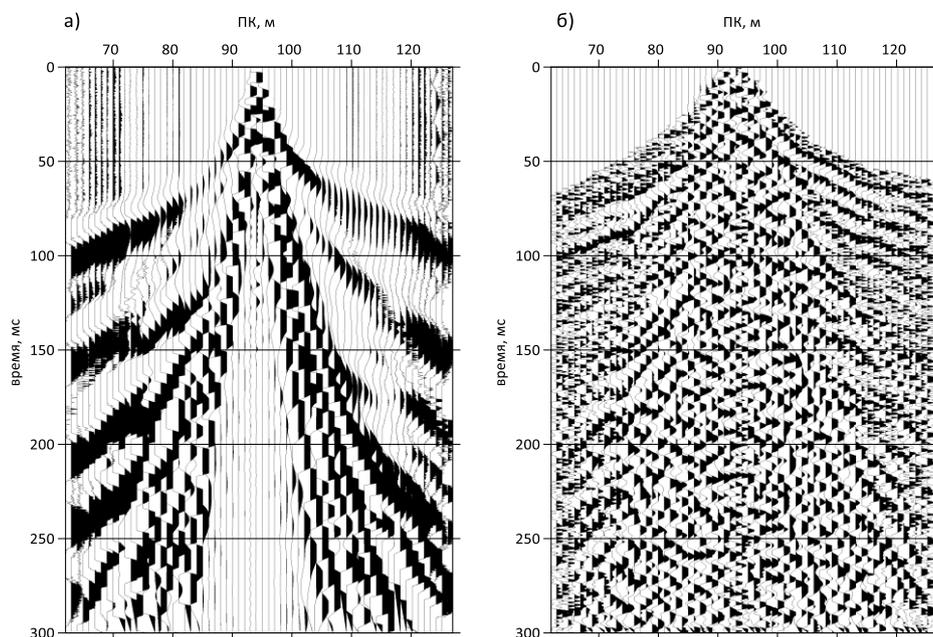


Рис. 2. Пример сейсмограмм общего пункта возбуждения:
 а) первичная полевая сейсмограмма на ПК 94,
 б) она же после процедур мьютинга, деконволюции и полосовой фильтрации 50-550 Гц

В связи с тем, что на данном участке, предположительно, происходит смена карбонатного разреза на смешанный карбонатно-сульфатный (резкое возрастание количества карстовых воронок), то выполнить достоверную привязку отражающих горизонтов на основании достаточно удаленных скважин не представляется корректным [2]. Однако

можно предположить, что наиболее выдержанные отражения будут образованы на границах глинистых и водонасыщенных пород.

При отсутствии данных бурения в непосредственной близости от профилей, стратиграфическая привязка отражающих горизонтов (ОГ) выполняется экспертно. Всего выделено три отражающих горизонта: ОГ1 – подошва плотных глин четвертичного возраста, ОГ2 – кровля водонасыщенных мергелей верхнепермского возраста, ОГ3 – граница в гипсово-ангидритовых отложениях поповской свиты (второй водоносный горизонт). По изменениям структуры волновой картины на временных разрезах, снижению интенсивности осей синфазности и значениям скоростной характеристики, полученной вдоль профильных линий, можно выделить два типа аномалий, которые согласуются с повышенными оценками интегрального комплексного параметра (рис. 3), характеризующего контрастность осложнений волнового поля в интервале исследований [3].

1. Аномалии, связанные с влиянием карстовых провалов возле которых проходили профили. В пределах этих участков наблюдаются эффекты, которые можно отнести к признакам уже реализованных провальных явлений: срывы осей синфазности, реверберация, дифракция, потеря корреляции ОГ, смена вертикальных градиентов скоростей упругих волн без значительного затухания амплитуд высокочастотной составляющей.

2. Аномалии, имеющие признаки значительной трещиноватости и ослабления упругих свойств породного массива, признаки карстовых пустот. В их пределах наблюдаются: нарушение корреляции ОГ, выпадение высокочастотной составляющей амплитудного спектра, снижение скоростей упругих колебаний. Кроме этого, на наличие пустот в их пределах указывают дифракционные явления, которые возникают на границах резкой смены структуры и физических свойств пород, характерных для полостей, а также наблюдается эффекты «куполения» нижележащих отражающих горизонтов.

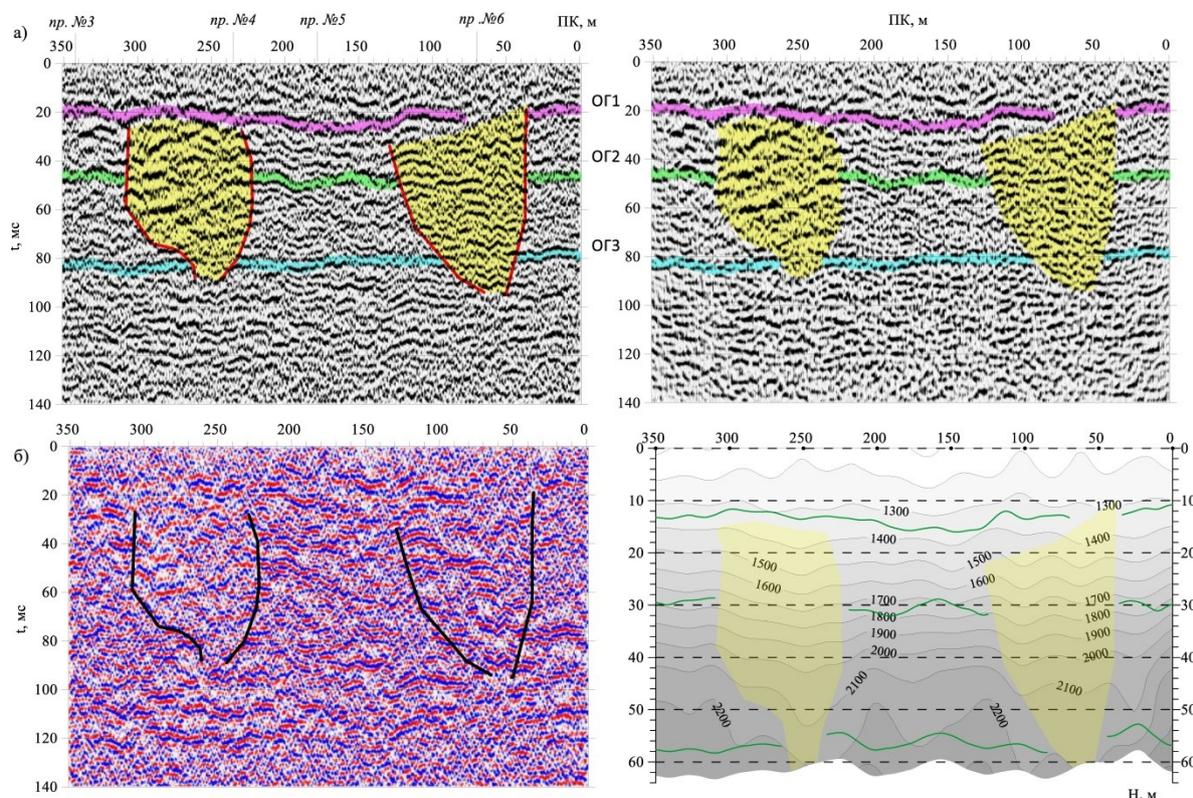


Рис. 3. Результаты обработки и интерпретации по профилю № 1:
 а) временной разрез ОГТ, б) динамическая характеристика в полосе частот 150-375 Гц,
 в) миграция по временному разрезу, г) сейсмогеологический разрез с аномальными зонами

Результаты цифровой обработки и интерпретационные сейсмогеологические разрезы по профилю № 1 в качестве примера представлены на рисунке 3. Обращает на себя внимание то, что аномалии обоих типов имеют распространение практически на всю глубину исследуемого интервала разреза (60 и более метров). Можно предположить в их пределах наиболее благоприятные условия для вертикальных переток между ОГ2 и ОГ3.

Существует две основные группы интерпретационных геологических моделей, выделяемых при анализе осложнений волновой картины для наземных сейморазведочных наблюдений – это так называемые «ослабленные» зоны, обусловленные возможно повышенной трещиноватостью и заполнением менее прочными, «рыхлыми» отложениями, и высокоскоростные «уплотненные» участки, образованные в результате литологических процессов. Наибольший интерес для определения вероятных направлений развития негативных гидрогеологических процессов представляет первая группа.

Одной из основных технологий анализа изменения амплитуды отраженной волны в зависимости от удаления источник-приемник (AVO) является расчет и использование параметров A и B двучленной аппроксимации Шуэ [4]. Рассчитанные в некотором временном интервале, соответствующем целевому отражающему горизонту (пачке продуктивных пород), эти параметры позволяют соотносить полученные результаты с классификацией Резерфорда-Уильямса [5]. Сочетание знаков градиента (B) и пересечения (A) указывает на принадлежность аномалии к определенному классу сред, а атрибутивный параметр $A+B$ указывает на зоны пониженных значений акустического импеданса. Подобная методика позволяет выделить аномалии, соответствующие зонам разуплотнения (трещиноватости) к которым можно отнести карстовые пустоты [6].

Рассчитав значения и построив разрезы зависимостей параметров A и B в программе SPS-PC на основе сейсмограмм ОГТ и данных скоростного анализа, можно получать до 5 различных атрибутов. При этом предлагается два способа расчета – на основе двучленной аппроксимации Шуэ и по уравнению Аки-Ричардса, позволяющей рассчитывать коэффициенты с максимальным углом падения (отражения) до 90° .

На основании результатов моделирования и предыдущих исследований «ослабленные» зоны относятся к 3 классу сред по классификации Резерфорда-Уильямса [6]. Поведение осей синфазности для них резко аномально – отрицательная амплитуда увеличивается с удалением. Следовательно, на поиски таких участков волнового поля и нацелены исследования.

На изучаемом участке отработано 6 сейморазведочных профилей, однако только два из них – номер 1 и 2 – имеют достаточную протяженность для возможности использования методики анализа изменения амплитуды отраженной волны с удалением источник-приемник.

Плановая согласованность аномальных участков позволяет наметить зоны наибольшего ослабления свойств пород, вызванных карстовыми процессами. Основные результаты работ сводятся к следующему.

1. Анализ карт и литературных источников позволил предположить, что участок исследования находится в контактной переходной зоне карбонатного разреза в карбонатно-сульфатный. Интенсивное проявление карстовых процессов связано с поступлением пресных вод и движением их по наиболее нарушенным трещиноватым зонам и литологическим контактам в гипсо-ангидритовые отложениях.

2. По данным сейморазведки в пределах исследуемого участка выявлено два типа аномального строения геологического разреза. Аномалия 1-го типа связана с зоной уже

реализованных карстовых провалов. Трещины и пустоты в ее пределах, вероятно, заполнились глинистым материалом. Аномалия 2-го типа имеет признаки пустотности на глубинах от 15 м и более.

3. Интенсификация карстовых процессов происходит в пределах выделенных зон за счет трех взаимно увязанных природно-техногенных факторов: изменения условий поверхностного стока в пределах жилой застройки, наличие вертикальных водных перетоков.

4. В связи с выявленным сложным геологическим строением территории и отсутствием данных инженерно-геологических изысканий в пределах изучаемого участка, принятие дальнейших решений по составу и объемам противокарстовых мероприятий возможно только после завершения выявленных аномальных зон данными бурения [7].

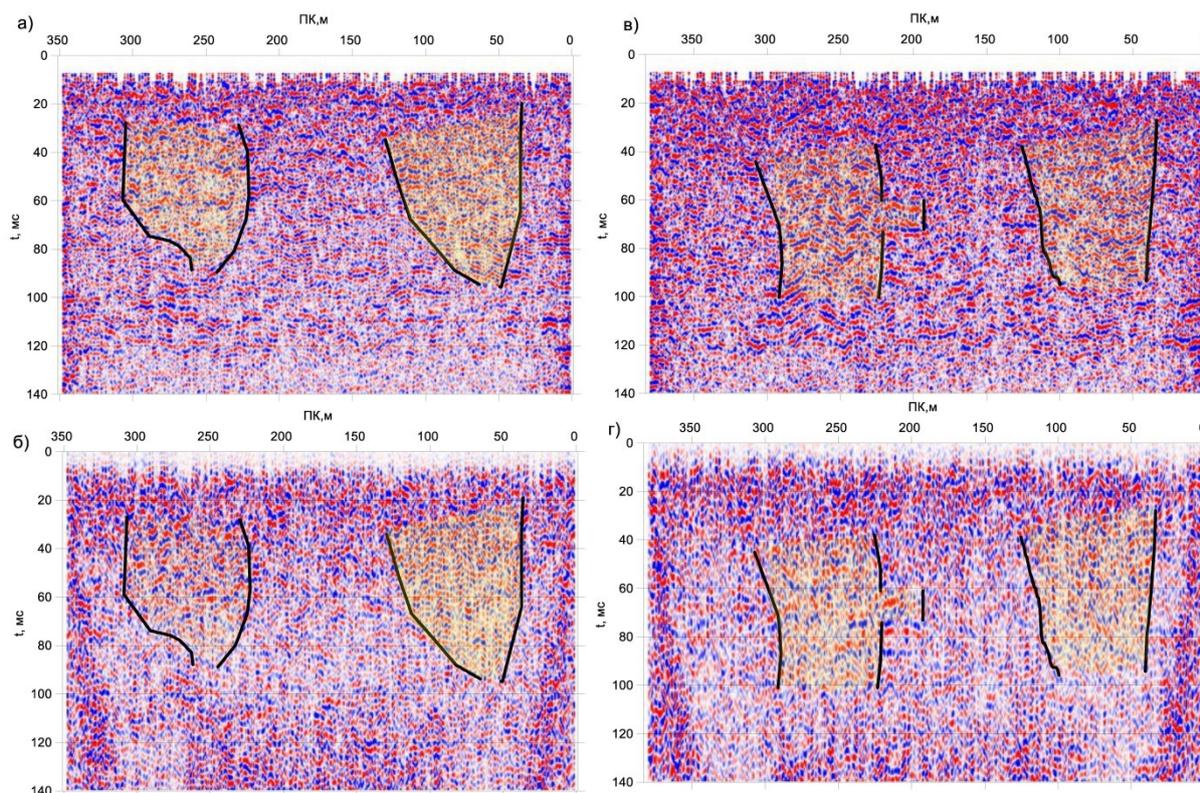


Рис. 4. Разрезы коэффициентов A и B двучленной аппроксимации Шуэ по профилям № 1 (а, б) и № 2 (в, г).

Цветом обозначены аномалии волнового поля, выделенные по результатам интерпретации

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. – 200 с.: ил.
2. Подземные воды СССР / Гос. геол. ком. СССР, Всесоюз. геол. фонд.... Т. Обзор подземных вод Пермской области. Вып. 2. Буровые на воду скважины. – М., 1970.
3. Санфиоров И.А., Пригара А.М. Использование динамических характеристик сейсмических записей для уточнения прочностных характеристик массивов горных пород // Горное эхо. – 2002. – № 3 (9). – С. 31-33.
4. Shuey R.T. A simplification of the Zoeppritz equations // Geophysics. – 1985. – Vol.50. – P. 609-614.
5. Rutherford S.R., Williams S.H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands // Geophysics. – 1989. – V. 54, № 6. – P. 680-688.

6. Фатькин. К.Б. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): автореф. дис. ... канд. техн. наук. 25.00.16: защищена 20.11.08 / Фатькин Константин Борисович. – Пермь, 2008. – 22 с.
7. Методические рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий на карстоопасных территориях (на примере Пермского края) / ГИ УрО РАН, ОАО «ПНИИИС»; [сост.: Красноштейн А.Е. и др.]. – М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. – 154 с.

УДК 550.312

DOI:10.7242/echo.2021.4.17

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО РЕДУЦИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА КОНДЕР)

В.В. Хохлова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Разработана новая методика решения прямой задачи гравirazведки с учетом сферичности земной поверхности. Этот метод базируется на применении сферических параллелепипедов для более достоверного описания возмущающих масс, использовании сферы Каврайского для аппроксимации Земли, формировании аналитической модели рельефа для замены цифровой модели. На примере высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1:25 000 продемонстрированы последствия игнорирования реальной формы земной поверхности при относительно небольших размерах изучаемой площади.

Ключевые слова: гравirazведка, сферический параллелепипед, радиальная составляющая, обработка полевых данных, гравиметрическое редуцирование.

Предусмотренный «Инструкцией по гравirazведке» [2] граф обработки данных наземной гравиметрической съемки основывается на плоской границе «Земля-воздух» и не включает в себя процедур, учитывающих шарообразную форму Земли [1]. Между тем, игнорирование реальной формы земной поверхности вносит неконтролируемые погрешности в результаты полевых наблюдений. Для учета сферичности Земли при редуцировании гравиметрических данных разработан новый алгоритм решения прямой задачи гравиметрии. Особенностями алгоритма является использование сферы Каврайского в качестве модели Земли, аппроксимация топографических масс набором сферических параллелепипедов, вычисление радиальной составляющей силы тяжести с помощью адаптивного кубатурного алгоритма [6].

Для оценки искажений гравитационных аномалий, возникающих при стандартной процедуре гравиметрического редуцирования (без учета сферичности Земли), проведена переобработка полевых данных, полученных при гравиметрической съемке на горном массиве Кондер. Массив находится в Аяно-Майском районе северной части Хабаровского края. Расположен в 75 км к западу от села Джигда, в 100 км на юго-запад от села Нелькан и в 1100 км на север от Хабаровска. Кондер представляет собой почти идеально круглой формы геологическое образование, напоминающее кратер – диаметром 7-8 км и возвышающееся над окружающим плато на 700 м, достигая 1400 м в своей высшей точке (рис. 1).

Полевая гравиметрическая съемка масштаба 1:25000 выполнялась Научно-производственной геофизической экспедицией Горного института УрО РАН на площади 35 км². Шаг измерений составлял 50 м, межпрофильное расстояние – 200 м; кроме того, выполнялись профильные наблюдения по 4-м профилям, выходящим за пределы Кондерского массива с шагом 50 м. Работы проводились в соответствии с проектом, «Ин-