

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ АНТРОПОГЕННОГО ХАРАКТЕРА С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

ДАВЫДОВ В.А.

Научный сотрудник Института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

davyde@yandex.ru

Аннотация

Описана методика совместного применения сейсморазведки методом преломленных волн и многоканального анализа поверхностных волн для обнаружения подземных пустот. Рассмотрены практические примеры использования предложенной технологии в комплексе с другими геофизическими методами при изучении урбанизированных территорий

Ключевые слова

Метод преломленных волн; многоканальный анализ поверхностных волн; подземные пустоты; горные выработки; просадка грунта

Введение

Инженерно-геологические изыскания проводят на основных этапах проектирования и строительства гражданских и промышленных объектов. Выполнение геофизических работ при изысканиях для строительства за рубежом является обязательной процедурой. В России в настоящее время подобная практика отсутствует и геофизика применяется пока только на особо ответственных объектах и в сложных геологических условиях. Геофизические методы исследований рекомендованы при изучении опасных экзогенных физико-геологических явлений и процессов (карста, оползнеобразования, суффозии, трещиноватости, нарушения природного напряжения в массивах горных пород, деградации мерзлоты). Специфика решаемых при изысканиях задач, не характерных для поисково-разведочной геофизики, позволяет рассматривать их в рамках самостоятельной дисциплины - инженерной геофизики.

Выделяются два основных направления применения методов инженерной геофизики: (1) в составе инженерно-геологических изысканий для обоснования проектов строительства; (2) при наблюдениях (мониторинге) за работой построенных сооружений и их взаимодействиями с окружающей средой.

Одной из важных инженерно-геологических задач обоих направлений является обнаружение и картирование подземных пустот естественного и искусственного происхождения (карстовых пустот, горных выработок и др.). Представленная работа посвящена методическим аспектам решения данной задачи с помощью геофизических методов и практическим примерам их реализации на техногенных объектах.

Методика исследований

К основным инженерно-геофизическим методам исследований следует отнести электроразведку и сейсморазведку. В качестве дополнительных методов для решения некоторых специфических задач применяют магниторазведку, гравиразведку и радиометрию.

Главным сейсморазведочным методом изучения верхней части разреза является метод преломленных волн (МПВ). При возбуждении упругих колебаний с помощью ручного тампера (кувалды) сейсморазведка МПВ позволяет получить информацию о скоростях продольных волн (V_p) геологического разреза в интервале глубин от 1 до 30 м. В случае применения механических невзрывных источников глубинность исследований возрастает до 100 м.

Развитие современных технологий дало толчок новым методическим приемам получения и обработки сейсмической информации. Одно из таких направлений - использование спектрального

анализа поверхностных волн. В отличие от объемных волн поверхностные волны в неоднородной среде обладают дисперсией - зависимостью скорости их распространения от частоты колебаний. График этой зависимости называют дисперсионной кривой (ДК). Толщина слоя, частицы которого вовлечены в движение поверхностными волнами, обратно пропорциональна частоте колебаний, это позволяет по характеру дисперсионных кривых получить глубинный разрез скоростей поперечных волн (V_s). На этом принципе основан метод многоканального анализа поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW) [11], получивший широкое распространение за рубежом для изучения различных геотехнических объектов.

Стандартная методика полевых работ MASW напоминает технологию нагоняющих годографов в МПВ, но, по сути, является точечным зондированием с выбранным шагом измерений, так как получаемый по полной сейсмограмме вертикальный скоростной разрез относят к единственной точке измерений, а именно к центру установки (косы). Основным недостатком метода MASW является низкое горизонтальное разрешение.

Для повышения информативности сейсмических исследований автором предложена комбинация методов МПВ и MASW [3] с использованием стандартной (или модифицированной) системы наблюдений МПВ, при этом повышение горизонтального разрешения MASW достигается за счет дополнительной обработки. Суть предложения заключается в сокращении длины участка обрабатываемого профиля и использовании накопления записей от множества пунктов возбуждения (ПВ). При схеме наблюдений, принятой в МПВ, микширование трасс во временной области невозможно, однако ничто не мешает просуммировать спектры фазовых скоростей на одних и тех же интервалах профиля от разных ПВ. Простейшим вариантом является сложение спектров прямой и встречной установки. Суммирование повышает соотношение сигнал/шум в \sqrt{n} раз (где n - количество суммирований), а встречные установки позволяют усреднить параметры разреза на выбранном интервале профиля, что помогает избежать сильного несоответствия при наклонных границах разделов. На разных расстояниях от источника колебаний в записи преобладают разные длины поверхностных волн. Соответственно, достоверность определения дисперсионной характеристики на разных частотах различна в зависимости от расстояния до ПВ. На близких расстояниях точнее выделяется высокочастотная часть дисперсионной кривой, на удаленных ПВ более существенный вклад будут вносить низкочастотные составляющие. Таким образом, суммируя спектры фазовых скоростей от пунктов возбуждения, находящихся на разных расстояниях от косы, получаем более достоверную ДК в широком диапазоне частот. Дальнейшие операции выделения и инверсии ДК не отличаются от стандартных процедур MASW, конечной целью которых является построение скоростного разреза поперечных волн V_s . Скоростной разрез продольных волн V_p находим томографическим способом (рефрагированных волн) по годографам первых вступлений. Располагая информацией о сейсмических скоростях продольных и поперечных волн, можно вычислить распределение коэффициента Пуассона и также представить его в виде разреза.

Упругие характеристики в реальных средах

Скорости Р- и S-волн в одной и той же среде различны и являются физически независимыми величинами. Гармонические продольные и поперечные волны распространяются в твердой среде со следующими фазовыми скоростями:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\alpha(1+\mu)}}; \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\alpha(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (2)$$

где E - модуль Юнга; μ - коэффициент Пуассона; σ - плотность среды.

Из всех упругих констант коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации) является единственным параметром, который можно определить по сейсмическим данным без определения плотности [7]:

$$\mu = \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{2(1 - (V_s/V_p)^2)} \quad (3)$$

Теоретически возможные пределы коэффициента Пуассона таковы: $0 < \mu < 0,5$. Однако в реальных неоднородных средах кажущиеся значения μ могут быть отрицательными [8]. В наиболее рыхлых и сухих песчано-глинистых породах верхней части разреза (ВЧР) $V_p = 200 \div 500$ м/с, $V_s = 100 \div 300$ м/с, $\mu = 0,2 \div 0,4$. Величины V_s и V_p по-разному реагируют на многие факторы, определяющие литологическую характеристику горных пород и их состояние. Так, V_p быстро возрастает по вертикали и скачкообразно увеличивается на глубине полного влагонасыщения, в то время как V_s ведет себя более плавно. Поэтому на подошве зоны малых скоростей (ЗМС) отношение V_s/V_p резко уменьшается, а μ возрастает. В полностью влагонасыщенных терригенных породах ВЧР V_s увеличивается быстрее, чем V_p . Наибольшее различие скоростей V_s и V_p (в 4 раза) характерно для интервалов $V_p = 1500 \div 2500$ м/с и $V_s = 400 \div 1000$ м/с. При $V_p \geq 2500$ м/с величина μ стабилизируется. В карбонатных породах μ в среднем больше, чем в терригенных [10].

Несмотря на различия в поведении сейсмических скоростей, основные особенности в значительной степени одинаково отображаются на разрезах V_s и V_p . Этим объясняется совпадение большинства отражающих и преломляющих горизонтов для волн разных типов. Так как реальные среды обычно характеризуются градиентным возрастанием V_s и V_p с глубиной, разрезы μ визуальнее более показательны при определении локальных неоднородностей. Построение разрезов коэффициента Пуассона можно использовать для решения инженерно-геологических задач, в частности для обнаружения и идентификации подземных пустот естественного и искусственного происхождения.

Опытно-методические работы

Эталонным объектом пустотного пространства послужил подземный переход плотины городского пруда г. Екатеринбурга, над которым был пройден сейсмический профиль. Сейсмические измерения проводились 24-канальной портативной цифровой сеймостанцией «Синус-24М» [9] с твердотельной памятью (flash-диск) по методике комбинированных наблюдений МПВ и MASW. В качестве детекторов сейсмических колебаний использовались вертикальные сейсмоприемники GS-20DX производства компании OYO-GEO Impulse (г. Уфа) с установкой через 2 м. Наблюдения осуществлялись по системе встречных и нагоняющих годографов с семью пунктами возбуждения на одну стоянку и выносами ПВ на 13 и 25 м от каждого края косы. Это обеспечило полные перекрытия годографов для непрерывного прослеживания сейсмических границ и избыточность материала при изучении дисперсии поверхностных волн. Возбуждение колебаний осуществлялось с помощью кувалды весом 4 кг и металлической подложки в виде диска. Отметка момента удара фиксировалась пьезодатчиком, закрепленным на кувалде и связанным со станцией по переговорной линии. Время дискретизации получаемого сигнала Δt составляло 0,5 или 1 мс, длина записи полезных волн - до 1,024 с. Для уменьшения помех и повышения отношения сигнал/шум использовалось накопление сигналов. Перед началом работы на каждой новой стоянке производилась запись микросейсмического фона. Качество полученных сейсмограмм проверялось непосредственно в поле. При необходимости проводились повторное возбуждение и запись колебаний.

Обработка сейсмических данных разделялась на два этапа в соответствии с типом целевых волн. Для получения информации по продольным волнам сейсмограммы фильтровались, выделялись и прослеживались первые вступления головных волн, по которым проводилось построение годографов. Годографы пересчитывались способом времени задержки для построения сейсмических преломляющих границ и томографическим способом (как рефрагированные волны)

для получения скоростных разрезов продольных волн. Вторым типом целевых волн являлись волны Рэлея, к которым применялся вариант суммирования скоростных спектров в «скользящем окне», с получением более контрастных дисперсионных кривых, которые затем конвертировались в скоростной разрез поперечных волн. Таким образом по профилю получались конфигурация преломляющих границ и скоростные сейсмические разрезы продольных и поперечных волн, по которым рассчитывался коэффициент Пуассона.

Как видно из представленных разрезов (рис. 1), продольные волны довольно слабо отмечают подземный переход, контрастность увеличивается при рассмотрении разреза по поперечным волнам, наиболее же четко местоположение перехода фиксируется по распределению μ . В месте перехода наблюдается локальная аномальная область пониженных значений коэффициента Пуассона ($\mu < 0,25$) на фоне общего среднего уровня ($\mu \approx 0,4$). Такое поведение V_p , V_s и μ можно объяснить следующим образом. Как известно, в волнах Рэлея присутствуют оба типа колебаний - продольные и поперечные. В пустотных областях, заполненных газом или жидкостью, поперечные волны распространяться не могут, поэтому вся энергия рэлеевской волны передается посредством продольных колебаний. Так как величина V_p всегда выше V_s , возникает эффект кажущегося увеличения скорости волн Рэлея (V_R) при прохождении данных областей. А поскольку мы рассчитываем V_s , исходя из фазовых скоростей V_R , то наблюдается кажущееся увеличение V_s в пустотном пространстве (см. рис. 1, б). Это приводит к увеличению отношения V_s/V_p и снижению величины коэффициента Пуассона.

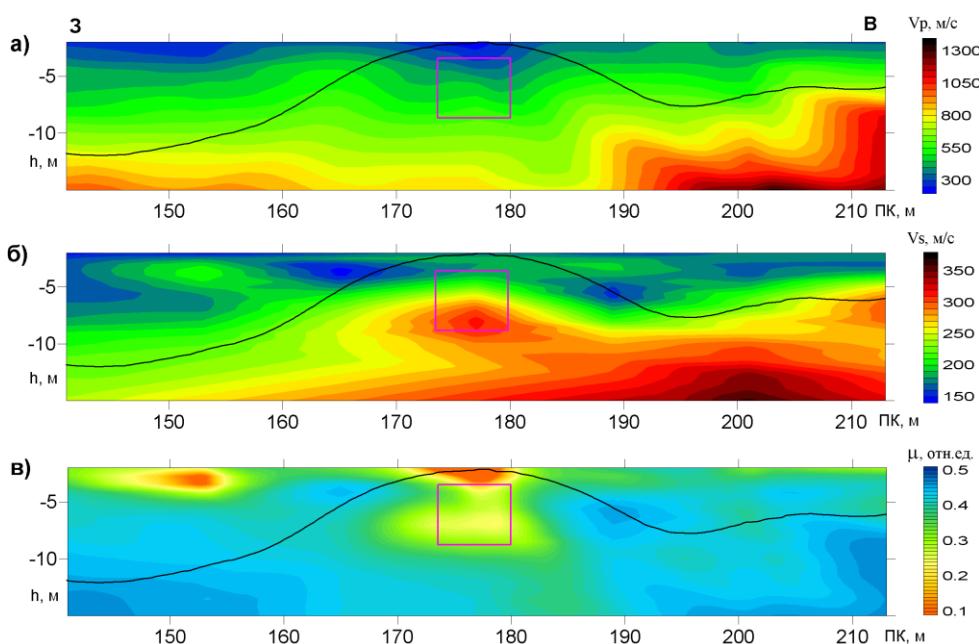


Рис. 1. Сейсмические скоростные разрезы продольных (а) и поперечных (б) волн, а также распределение коэффициента Пуассона (в) фрагмента плотины городского пруда в г. Екатеринбурге: h - глубина; ПК - расстояние (пикет); жирная линия соответствует преломляющей границе, малиновым квадратом отмечен подземный переход

Практические примеры исследований

Геофизические работы по изучению подземных пустот проводились в городе Березовском Свердловской области, известном значительным объемом подземных разработок. В геологическом отношении данный район приурочен к Березовскому золоторудному полю. Горные выработки проходят по дайкам плагингранит-порфиров мощностью 10-20 м, залегающим во вмещающих вулканогенно-осадочных породах. Дайки содержат кварцевые жилы, к которым и приурочено золотосульфидное оруденение. Городская территория частично располагается над шахтным полем Березовского рудоуправления и может подвергаться просадочным явлениям.

Верхняя часть разреза представлена делювиальными и элювиальными суглинками, перекрытыми почвенно-растительным слоем или насыпным грунтом.

К задачам исследований относилось выявление техногенных изменений, вызванных подработкой территории горными работами (пустотных пространств и зон разуплотнения грунтов), а также условий залегания коренных пород и характера покрывающих их рыхлых отложений.

Участок под жилую застройку

Площадь исследуемой территории под планируемую жилую застройку в г. Березовском составляет около 1 га. В пределах этого участка, по данным Березовского рудоуправления, проходит дайка Соймановская, которая подвергалась горной выработке в 1940-1960-е годы на горизонтах 28 м и глубже. Кроме того, на представленном плане горных работ присутствует вертикальный ствол шахты № 118^а, устье которого, по имеющимся данным, обрушено. Верхние горизонты дайки с глубины порядка 10 м отрабатывались до революции, сведения по ним не сохранились. На рассматриваемой территории в настоящее время располагается асфальтированная автостоянка.

Геофизические исследования включали площадную гравиметрию и электроразведку методом сверхдлинноволнового радиокомпарирования и пеленгации (СДВР РадиоКИП) по сети 20×5 м, а также комбинированную сейсморазведку (МПВ и MASW) по отдельным профилям. Гравиразведка и электроразведка выполнялись по стандартным методикам в соответствии с регламентирующими инструкциями [4-6]. Гравиметрические измерения проводились высокоточным гравиметром Autograv CG-5 (Scintrex, Канада), электромагнитные - универсальной аппаратурой ОМАР-2м [2] с датчиками, настроенными на сигналы навигационной радиостанции РСДН-20 «Альфа» 11,90, 12,65 и 14,88 кГц. Комплексные сейсморазведочные работы выполнялись по описанной выше методике с получением положений преломляющих границ и скоростей продольных и поперечных волн.

По результатам обработки полученных материалов было выяснено, что рыхлые отложения залегают до глубины около 5 м, далее следуют скальные грунты. Скорости продольных волн в верхней части разреза составляют 250-500 м/с, удельные электрические сопротивления (УЭС) равны 50-100 Ом·м, что типично для песчано-щебенистых грунтов с небольшим содержанием суглинков. Скальные грунты характеризуются значениями V_p до 1500 м/с и $УЭС = 170 \div 240$ Ом·м. Невысокие скорости сейсмических волн свидетельствуют о принадлежности грунтов к коре выветривания коренных горных пород. Характер изменения сейсмических скоростей позволяет локализовать наиболее выраженные структурные элементы разреза. К признакам, характерным для старых горных работ, относятся резкие понижения (депрессии) изолиний сейсмических скоростей V_p с отрицательными аномалиями локального гравитационного поля Δg_L . Однако поле силы тяжести на участке работ обладает небольшими отклонениями от среднего уровня ($\pm 0,03$ мГл), что свидетельствует о незначительных изменениях плотностных характеристик среды. На всей площади можно выделить три небольшие отрицательные аномалии Δg_L величиной всего 0,02-0,03 мГл, которые слабо коррелируют с данными сейсморазведки. Значительное понижение скоростей V_p с локальными аномалиями коэффициента Пуассона (до 0,05) наблюдается только на одном профиле (рис. 2).

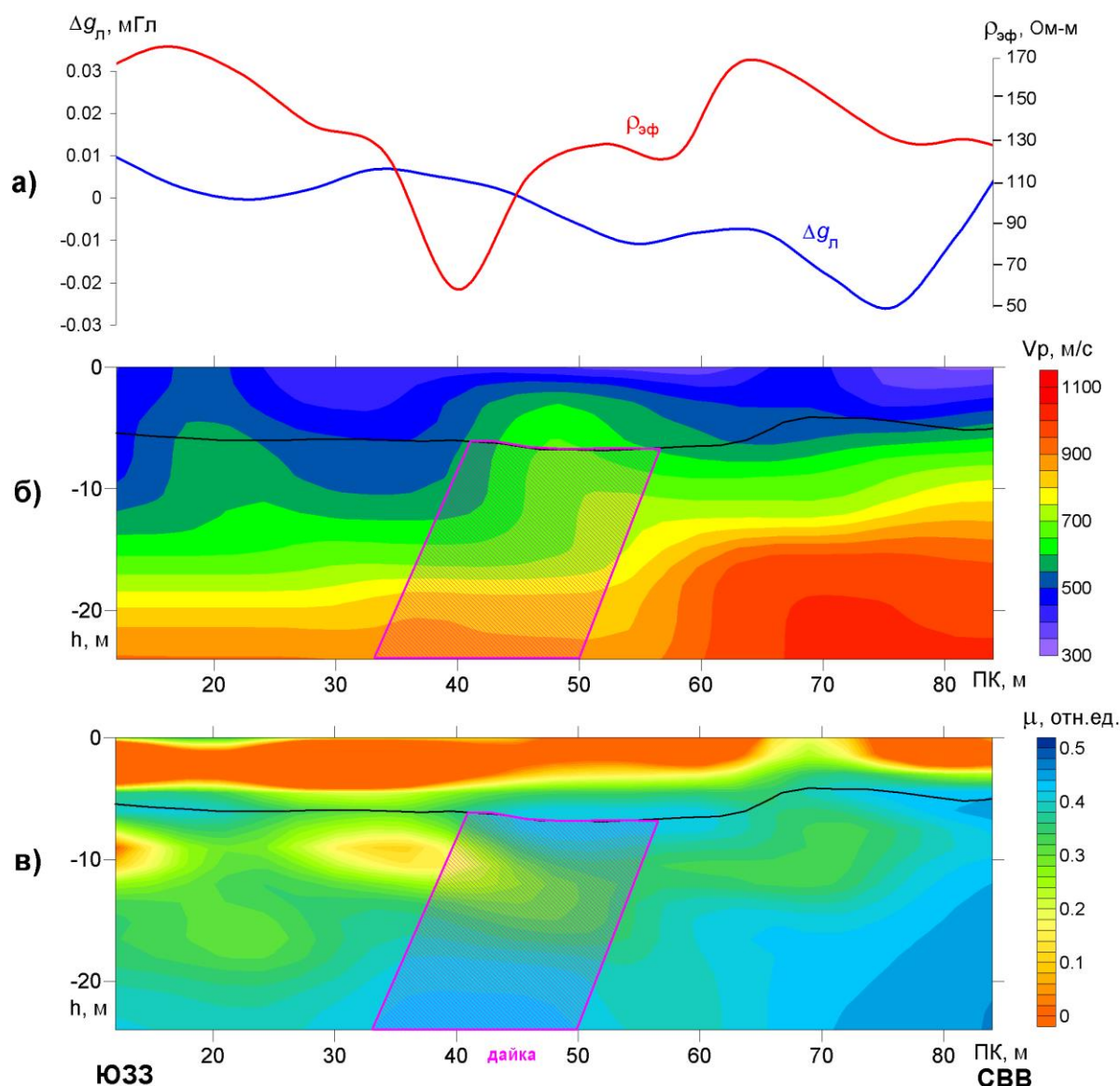


Рис. 2. Результаты геофизических работ на территории подработки дайки Соймановская: а - графики локального поля силы тяжести ($\Delta g_{\text{л}}$, мГал) и эффективного УЭС ($\rho_{\text{эф}}$, Ом·м); б - скоростной разрез продольных волн (V_p , м/с); в - разрез значений коэффициента Пуассона (μ , отн. ед.). Жирной линией показана сейсмическая граница

При внимательном рассмотрении разреза коэффициента Пуассона (см. рис. 2, в) заметна линейно-горизонтальная зона пониженных значений μ на глубине около 10 м. По мнению автора, она соответствует старой шахте с закладкой выработанного пространства пустой породой («заглушенной выработке»). Аномалии μ и $\rho_{\text{эф}}$ на пикетах (ПК) 35-40 м свидетельствуют о большей степени разуплотнения и повышенном содержании глинистого компонента в данном месте, что может объясняться проникновением атмосферной влаги с глинистыми частицами из вышележащих горизонтов. На обзорном плане горных работ можно увидеть, что на этом месте располагался вертикальный ствол шахты № 118^а, что подтверждает предположения автора. Аномалия μ в районе ПК 10 м, возможно, соответствует менее плотной закладке выработанного пространства.

Участок под промышленную застройку

Инженерно-геологические изыскания с комплексом геофизических исследований проводились на окраине г. Березовского вблизи ствола № 660 поля шахты «Северная». Территория площадью более 2 га была отведена под строительство производственной базы. Из архивных

материалов Березовского рудоуправления следовало, что в пределах данного участка в начале XX века проводились горнодобывающие работы. По контуру проектируемого сооружения было пробурено 14 скважин глубиной от 10 до 15 м. По результатам бурения, в геологическом строении площадки принимают участие эффузивные горные породы (порфириды). Рыхлые отложения представлены суглинками, насыпными грунтами и почвенно-растительным слоем, местами встречаются линзы торфа. Ни одна из пробуренных скважин не вскрыла отработанное пространство, подземные воды также не были встречены.

Для выявления горных выработок было пройдено три широтных геофизических профиля (вкрест простирания рудных даек района) и один субмеридиональный профиль. В состав геофизических работ входила комбинированная сейсморазведка и электроразведка методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). Электропрофилирование проводилось аппаратурой МЧЗ-8 [1] на частоте 16 кГц по стандартной методике. На рисунке 3 представлены наиболее показательные результаты работ по одному из широтных профилей.

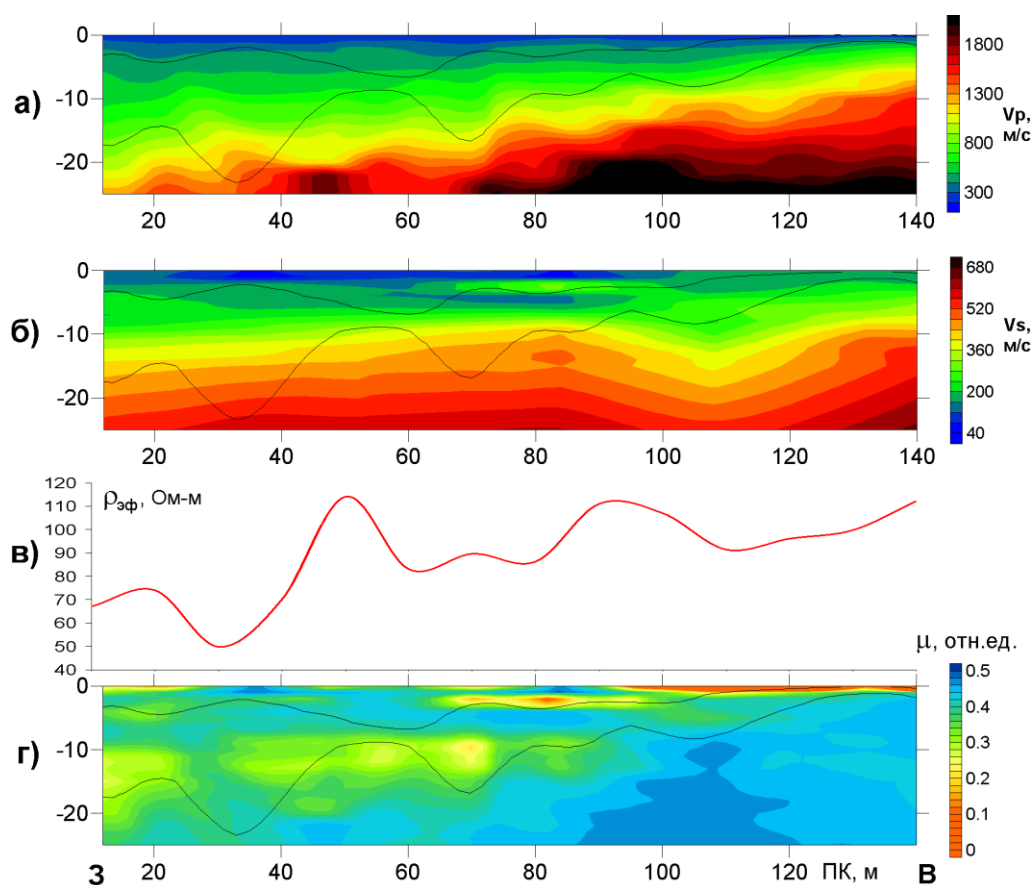


Рис. 3. Результаты геофизических работ по фрагменту широтного профиля промбазы: а - скоростной разрез продольных волн (V_p , м/с); б - скоростной разрез поперечных волн (V_s , м/с); в - график эффективного УЭС ($\rho_{эф}$, Ом·м); г - разрез значений коэффициента Пуассона (μ , отн. ед.). Жирной линией показаны сейсмические преломляющие границы

По результатам сейсморазведки прослеживаются две преломляющие границы, разделяющие три структурных горизонта. Поверхностный слой (до 5 м) относится к рыхлым грунтам (делювиальный суглинок, насыпной грунт) с низкими сейсмическими скоростями ($V_p = 150 \div 300$ м/с). Первая преломляющая граница приурочена к коре выветривания коренных пород (элювиальные суглинки с песком и дресвой), скорости которых варьируют в широких пределах ($V_p = 400 \div 1100$ м/с). Вторая преломляющая граница связана с сильно разрушенными коренными породами, скорость продольных волн в которых составляет 900-2100 м/с. На сейсмических

разрезах наблюдается общее погружение коренных пород в западном направлении, что подтверждается пробуренными скважинами. Локальные зоны низких значений коэффициента Пуассона в поверхностном слое связаны с наличием торфяных линз. Аномальный характер на разрезах носят области пониженных значений V_p , приуроченные к провалам второй сейсмической границы с низкими значениями коэффициента Пуассона (например, ПК 10 и 70 м на рис. 3, *з*). Это позволяет интерпретировать аномалии как горные выработки. По электроразведочным данным в этих же местах наблюдаются отрицательные аномалии ДЭМП, что может свидетельствовать о заполнении выработанного пространства глинистым веществом. О том, что горные выработки являются «заглушенными», говорит и отсутствие кажущегося увеличения скоростей поперечных волн (см. рис. 3, *б*). Резкая депрессия сейсмической границы с аномалией эффективного УЭС, но без значительного понижения μ на ПК 30-35 м, вероятно, также соответствует горной выработке, заполненной консолидированными грунтами (известно, что старая проходка штреков велась с одновременной закладкой выработанного пространства пустой породой). Продолжения этих трех аномалий линейно прослеживаются на параллельных профилях, благодаря чему были определены области, затронутые горными работами на площади строительства.

Провал участка дороги

Также были проведены геофизические исследования на участке провала грунта на обочине дороги в г. Березовском с образованием воронки диаметром около 5 м и глубиной более 2 м (рис. 4). Их цель состояла в определении причин образования и последующего увеличения провала и его возможной связи с горными выработками.

Комбинированные сейсмические работы выполнялись на двух профилях по обе стороны дороги по изложенной выше методике. Для каждого профиля были получены конфигурация преломляющих границ и скоростные сейсмические разрезы продольных и поперечных волн, по которым рассчитывались коэффициенты Пуассона. Кроме сейсморазведки на тех же профилях проводились гравиметрические работы по стандартной методике [4, 5] с шагом 4 м с замыканием рейса на опорном пункте. В результате обработки наблюдений GPS и снятия отметок с топографической карты для пунктов гравиметрической съемки были получены географические координаты и отметки высот в Балтийской системе. По профилям съемки были вычислены значения силы тяжести в редукции Буге, а также построены графики локального гравитационного поля Δg_l (с вычетом регионального фона).



Рис. 4. Провал участка дороги с повреждением обочины в г. Березовском

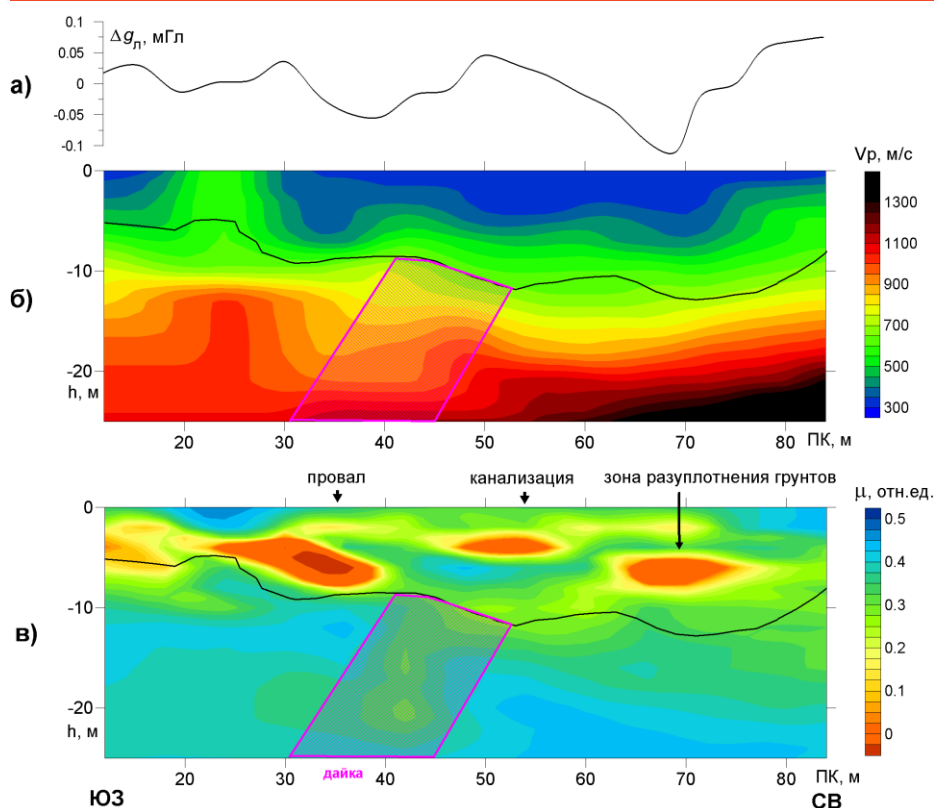


Рис. 5. Результаты геофизических работ по профилю вблизи провала: а - график локального поля силы тяжести ($\Delta g_{\text{л}}$, мГл); б - скоростной разрез продольных волн (V_p , м/с); в - разрез значений коэффициента Пуассона (μ , отн. ед.). Жирной линией показана сейсмическая преломляющая граница

Полученные в результате сейсморазведочных работ годографы позволяют выделить основную преломляющую границу, разделяющую два структурных горизонта. Верхний слой (от 4 до 13 м) относится к рыхлым грунтам (суглинок, насыпной грунт) с низкими сейсмическими скоростями продольных волн ($V_p = 250 \div 600$ м/с). Второй горизонт связан со скальными грунтами коры выветривания коренных пород, скорость продольных волн в которых составляет 800-1500 м/с (рис. 5, б). На сейсмических разрезах зоны, характерные для разуплотненных грунтов, присутствуют только на первом профиле (ПР1) на той стороне дороги, с которой расположен провал. Это подтверждается и графиками локального гравитационного поля ($\Delta g_{\text{л}}$): так, на ПР1 отрицательные аномалии $\Delta g_{\text{л}}$ достигают значения минус 0,12 мГл (рис. 5, а), в то время как на ПР2 они составляют только минус 0,02 мГл. Пластовые скорости сейсмических волн ПР1 также имеют меньшие значения, чем на ПР2. Это позволяет утверждать, что юго-восточная сторона дороги (ПР2) не подвержена опасным процессам, приводящим к просадкам грунта.

К двум отрицательным гравитационным аномалиям ПР1 в районе ПК 35 и 70 м приурочены аномальные области с низкими значениями коэффициента Пуассона (рис. 5, в). Одна из них с $\mu < 0$ располагается в районе провала (около ПК 35 м). Вторая с $\mu \approx 0$, по-видимому, связана с другой опасной зоной разуплотнения грунтов. На ПК 55 м этого профиля находится канализационный люк, что позволяет связать еще одну аномалию пониженных значений μ с ливневой канализацией. Все аномальные зоны располагаются в рыхлых отложениях на глубине 5-6 м, что не позволяет отождествлять их с горными выработками в дайках. Наиболее вероятно, что они связаны с процессами вымывания грунта водой (суффозией). Дайки на разрезе коэффициента Пуассона выделяются чуть пониженными его значениями ($\mu \approx 0,3$) по отношению к окружающим породам ($\mu \approx 0,4$), что свидетельствует о закладке выработанного пространства (наличии «заглушенных пустот»).

На основании результатов геофизических исследований были сделаны следующие выводы.

- На обследованной территории зафиксированы подземные горные выработки на глубине более 10 м, однако, судя по упругим свойствам среды, они являются «заглушенными».
- Образование провала связано с суффозионными процессами (образованием промоины) в рыхлых отложениях на глубине около 5 м. Возможно, вблизи от этого места существуют утечки из водопроводной, отопительной или канализационной системы.
- На исследованном участке обнаружена еще одна зона разуплотнения грунтов, где может произойти просадка грунта при дальнейшем развитии суффозионных процессов. Место вероятной просадки располагается в 35-40 м от имеющегося провала по ходу профиля.

Заключение

1. Представленные в статье результаты свидетельствуют о том, что подземные пустоты отображаются на всех типах сейсмических разрезов, но совершенно разным способом. На скоростных разрезах продольных волн положение выработок выглядит как зона резкого понижения скоростей V_p (депрессия), при этом преломляющие границы испытывают погружение в глубину. Разрезы поперечных волн более сложны для визуальной интерпретации: наблюдается неоднородная изменчивость скоростной характеристики с положительными и отрицательными градиентами, в ряде случаев проявляется повышение V_s в районе выработки. Следует признать, что сейсмические разрезы V_p и V_s не могут помочь однозначно ответить на вопрос о точном положении и состоянии подземных выработок.

2. Местоположение пустотного пространства горных выработок можно определить по разрезам значений коэффициента Пуассона. Их изменения выражаются в появлении контрастных аномалий - пониженных значений ($\mu \leq 0,2$) - в районе пустотного пространства на фоне относительно однородного распределения μ во вмещающих породах.

3. Для уточнения состояния горных выработок и других подземных пустот необходимо привлекать дополнительные геофизические методы исследований. Комплексирование сейсморазведки, электроразведки и гравиметрии дает возможность структурного и литологического расчленения грунтов по физическим свойствам, что позволяет определять характер заполнения пустот.

Список литературы

1. Байдинов С.В., Человечков А.И. Аппаратура для индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1 (18). С. 4-8.
2. Давыдов В.А. Опытная малогабаритная аппаратура регистрации «ОМАР-2м» для метода АМТЗ // Материалы конференции «Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей»: Шестые научные чтения Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2011. С. 112-115.
3. Давыдов В.А. Повышение эффективности геофизических методов при малоглубинных исследованиях: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИРА УТК, 2012. 24 с.
4. Инструкция по гравиразведке. М.: Недра, 1980. 80 с.
5. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. 106 с.
6. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, Министерство геологии СССР, 1984. 352 с.
7. Интерпретация данных сейсморазведки: справочник / под ред. О.А. Потапова. М.: Недра, 1990. 448 с.

8. Рекомендации по применению сейсморазведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей / В.И. Бондарев (сост.), В.А. Шемшурин и др. (ред.). М.: Стройизыскания, 1974. 142 с.
9. Сейсмическая станция «Синус-24М»: руководство пользователя. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2004. 17 с.
10. Сейсморазведка: справочник геофизика: в 2 кн. / под ред. В.П. Номоконова. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 336 с.
11. *Park C.B., Mille, R.D., Xia J.* Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. 1999. V. 64. № 3. P. 800-808.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №7/2013, С. 52-57