

ИЗУЧЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Вадим Анатольевич Давыдов¹,
davyde@yandex.ru
Владислав Анатольевич Щапов¹,
vlad-shchapov@yandex.ru
Григорий Александрович Цай²
tsai.grigory@gmail.com

¹Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН
Россия, Екатеринбург
²Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург

Актуальность работы обусловлена необходимостью предотвращения вреда, наносимого современной инфраструктуре опасными геологическими процессами и явлениями.

Цель работы: показать принципиальную возможность изучения опасных природных и техногенных геологических процессов с помощью комплексных геофизических исследований.

Методология исследования: в качестве основных методов использовались электроразведка и малоглубинная сейсморазведка, на одном из объектов применялась радиометрия. Электроразведочные работы проводились методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). Сейсморазведка выполнена методом преломленных волн (МПВ) в комбинации с многоканальным анализом поверхностных волн (MASW).

Результаты. Эффективным методом по выявлению подземных пустот, образовавшихся в результате действия процессов карстообразования или за счет горных работ, признана малоглубинная сейсморазведка. Это связано с резким изменением упругих свойств в районе пустотного пространства и зон разуплотнения грунтов, что выражается в появлении контрастных аномалий пониженных значений на фоне относительно однородного распределения в окружающих породах. Электроразведка помогает в структурном и литологическом расчленении грунтов по электрическим свойствам, а также позволяет выделять трещиноватые и обводненные зоны. Радиометрия дает возможность уточнить области распространения и границы коренных пород разного состава.

Заключение. Комплексирование геофизических методов позволяет получить больше данных об изменениях физических свойств грунтов, что дает возможность опознать и выделить области воздействия опасных геологических процессов. Результаты работ свидетельствуют о высокой эффективности геофизических исследований при изучении опасных геологических процессов природного и техногенного происхождения.

Ключевые слова: подземные пустоты; карст; суффозия; просадка грунта; фильтрационные утечки; малоглубинная сейсморазведка; электроразведка.

Введение
Опасные геологические процессы и явления могут наносить значительный ущерб современной инфраструктуре. Одним из таких процессов является выщелачивание горных пород с образованием подземных пустот или карста. На поверхности процессы карстообразования часто проявляются в виде воронок, образующихся при обрушении подземных полостей. Известны случаи возникновения по вине карста оползней и провалов, когда под землю уходили целые селения, мелели озера и изменялись течения рек. В результате человеческой деятельности появились подземные пустоты искусственного происхождения – горные выработки и тоннели, также являющиеся объектами повышенной опасности. Техногенное преобразование среды зачастую приводит к активизации природных процессов, приводя к нежелательным последствиям. Особенно сильно это проявляется при нарушении режима поверхностных и подземных вод, в качестве примеров можно упомянуть обезвоживание или заболачивание обширных территорий, затопление тоннелей и горных выработок, прорыв плотин искусственных водохранилищ. Сосредоточенная фильтрация воды из промышленного пруда-отстойника может привести к размыву дамбы и экологической катастрофе. Чтобы предотвратить вред, наносимый геологическими процессами, необходимо получение всесторонней информации для изучения ситуации и контроля над ее развитием. Бурение изыскательских и наблюдательных скважин позволяет получить необходимые данные, но может оказаться слишком дорогим или недостаточно детальным. В этом случае более рационально привлечение геофизических методов как для опережающих работ, так и для увеличения общей детализации. При этом желательно применять комплексирование нескольких методов, базовыми из которых являются сейсморазведка и электроразведка.

Главная цель работы – показать принципиальную возможность изучения опасных геологических процессов с помощью комплексных геофизических исследований. К основным задачам относится выделение геофизических аномалий, связанных с суффозией, карстом, подземными горными выработками и местами повышенной фильтрации из отстойников-накопителей промышленных отходов.

Методика работ

Сейсмические измерения проводились 24-канальной портативной цифровой сейсмостанцией СИНУС–24М (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) с твердотельной памятью [1]. Сейсморазведочные работы выполнены по методике комбинированных наблюдений методом преломленных волн (МПВ) и многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [2, 3] для получения информации по скоростям продольных и поперечных волн. В качестве детекторов сейсмических колебаний использованы вертикальные сейсмоприемники GS-20DX («Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа) с установкой через 2 м. Наблюдения осуществлялись по системе встречных и нагоняющих годографов с 7 пунктами возбуждения (ПВ) на одну стоянку. Для возбуждения колебаний использовалась кувалда с металлической подложкой в виде площадки. Отметка момента осуществления осуществлялась от пьезодатчика и передавалась в станцию по переговорной линии. Время дискретизации получаемого сигнала $t = 0,5$ мс, длина записи полезных волн – 0,512 с. Для обеспечения глубинности применялись выносы ПВ на 25 м и 13 м от края косы, достигнутая глубина исследований составила 20 м. Качество

полученных сейсмограмм проверялось непосредственно в поле. Для исключения сейсмических помех использовалось накопление сигналов (суммирование) от нескольких ударов, при сильных сетевых помехах включался режекторный фильтр. Перед началом работы на каждой новой стоянке производилась запись микросейсмического фона.

Полевые записи сейсмических трасс переписывались из памяти сейсмостанции в компьютер и конвертировались в стандартные форматы сейсмической записи SEG-2 и SEG-Y. Вся обработка сейсморазведочных данных проводилась по специализированным программам. Обработка сейсмических данных разделялась на два этапа в соответствии с типом целевых волн. Алгоритм обработки сейсмограмм МПВ заключался в выборочной фильтрации сигнала, выделении и прослеживании фаз преломленных волн, фазовой корреляции с первыми вступлениями и построении годографов. Годографы корректировались и увязывались между собой по взаимным временам, а затем пересчитывались способом времени задержки для построения сейсмических преломляющих границ [4] и томографическим способом (как рефрагированные волны) для получения скоростных разрезов продольных волн. Вторым типом целевых волн являлись волны Релея, к которым применялся вариант суммирования спектров в скользящем окне для получения более контрастных дисперсионных кривых, которые затем конвертировались в скоростной разрез поперечных волн. Таким образом, по каждому профилю получены конфигурация преломляющих границ и скоростные сейсмические разрезы продольных и поперечных волн, по которым рассчитывались коэффициенты Пуассона. Применение спектрального анализа поверхностных волн для изучения различных природных и искусственных объектов в настоящее время широко практикуется за рубежом [5, 6], а также принято на вооружение отечественными геофизиками [7, 8].

Обработка и интерпретация сейсморазведочных данных осуществлялась с помощью программ Sinus24 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург), SeisImager/2D и SeisImager/SW (Geometrics, USA).

Вертикальные электрические зондирования выполнялись аппаратурой ERA-MAX на частоте 4,88 Гц по стандартной методике. При работе использовались стальные приемные и питающие электроды длиной 1,2 м и диаметром 10 мм, соединительные провода марки ПВР. Для проведения измерений применялась четырехэлектродная симметричная (Шлюмберже) или дипольно-осевая установка. Разносы изменялись от 3 до 60 м, размер приемной линии равнялся 2 м. При использовании дипольно-осевой установки размеры диполей АВ и MN равнялась 1 м. Величина разносов выбиралась исходя из необходимой глубины исследования и возможности беспрепятственно растянуть линию питания. Все результаты измерений записывались в полевой журнал. Кажущееся удельное электрическое сопротивление грунта вычислялось по формуле:

$$\rho_k = K\Delta U/I,$$

где ρ_k – кажущееся сопротивление, Ом · м); K – коэффициент установки; ΔU – разность потенциалов, мВ; I – сила тока, мА.

Коэффициент установки определялся по формулам:

$$K = \pi \cdot AM \cdot AN/MN \text{ для измерительной установки Шлюмберже;}$$

$$K = \pi R^3/AB \cdot MN \text{ для дипольно-осевой установки,}$$

где R – расстояние между центрами приемных и питающих диполей.

Интерпретация результатов измерений проведена в программе Zond-IP [9], разработанной в Лаборатории импульсной электроразведки ВИРГ-Рудгеофизика А. Е. Каминским. С помощью данной программы был выполнен комплекс работ, включающий первичную обработку полевых материалов, качественную и количественную интерпретацию. На этапе качественной интерпретации решались вопросы изучения характера пространственного изменения электрических свойств среды. Для этой цели были получены разрезы кажущихся сопротивлений, характеризующие изменение электрических свойств с глубиной. Для определения количественных параметров – мощностей и удельных электрических сопротивлений (УЭС) основных пачек пород геологического разреза – была выполнена одномерная инверсия данных электрического зондирования по профилям. В результате интерпретации получены геоэлектрические разрезы, отображающие особенности строения и характер изменения электрических свойств основных слоев, слагающих разрез.

В качестве параметрического материала для литологической привязки геофизических границ и геологического истолкования получаемых сейсмических и электрометрических данных использованы результаты бурения инженерно-геологических скважин. Механическое колонковое бурение скважин выполнено станком УРБ-2А-2 диаметром 132 мм с отбором керна.

Результаты исследований

Карстовые процессы

Открытый карст проявляется в виде выхода на дневную поверхность провалов и воронок в кровле самих карстующихся пород. Закрытый карст – это полости различной формы в карстующейся породе, перекрытые массивными породами или рыхлыми осадками. Полости могут быть заполнены воздухом, водой, песчано-глинистыми суффозионными образованиями. К закрытому карсту, по определению, можно относить перекрытые слоями осадочных пород причудливые формы древнего выветривания поверхности карстующихся пород: карры, суходолы, воронки, эрозионные долины. При исследовании всех форм карста большой популярностью пользуются геофизические методы исследований, являющиеся наиболее оперативными и достаточно информативными [10, 11]. Сами карстующиеся породы: известняки, доломиты, гипсы, соли – по физическим свойствам являются типичными представителями скальных пород. Они обладают средней и высокой акустической жесткостью, плотные, немагнитные, нерадиоактивные (за исключением калийных солей) и высокоомные. Полость, заполненная влажными рыхлыми песчано-глинистыми породами, характере-

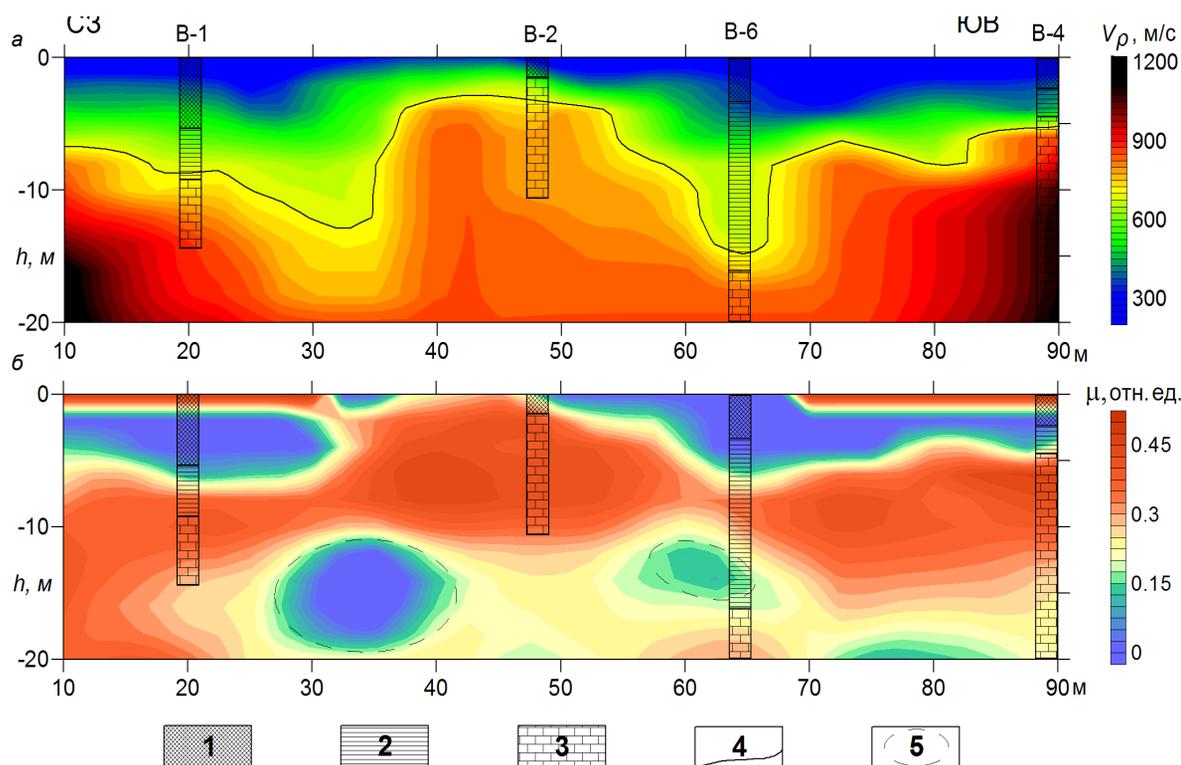


Рисунок 1. Результаты геофизических работ на карстоопасном участке (г. Кунгур, Пермский край). а – скоростной сейсмический разрез продольных волн; б – разрез коэффициента Пуассона. 1 – насыпной грунт суглинистого состава ($\rho = 23\text{--}44 \text{ Ом} \cdot \text{м}$); 2 – глина элювиальная ($\rho = 10\text{--}17 \text{ Ом} \cdot \text{м}$); 3 – подстилающие породы ($\rho = 280\text{--}2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$); 4 – ориентировочное положение кровли карстующихся пород по сейсмическим данным; 5 – зоны предполагаемого развития карста.

Figure 1. The results of geophysical work on the karst-hazard area (Kungur, Perm region).

ризуется величинами УЭС около $20\text{--}80 \text{ Ом} \times \text{м}$ и невысокими значениями скоростей продольных ($v_p = 300\text{--}1500 \text{ м/с}$) и поперечных волн ($v_s = 150\text{--}600 \text{ м/с}$).

Далее приведены материалы по изучению закрытого карста на южной окраине г. Кунгур Пермского края. Участок работ находится в междуречье рек Сылва и Ирень, на IV надпойменной террасе р. Сылвы. В геологическом разрезе устанавливается четыре типа отложений. Поверхность покрывает четвертичный Q террасовый комплекс, включающий суглинки и глины с гравием. Под аллювиально-делювиальным глинистым покровом залегает горизонт крупнообломочных карстово-обвалных отложений мощностью до 10 м, в состав которых входят суглинки и глины со щебнем и глыбами карбонатных и сульфатных пород. Крупнообломочные отложения образовались в течение длительного времени, начиная с неогена N_2 , вследствие растворения сульфатных пород кунгурского яруса и накопления обломков слабо растворимых карбонатных пород. Рыхлый покров ложится на гипсы и ангидриты шалашнинской пачки, там, где они разрушены на доломиты неволинской пачки иренского горизонта кунгурского яруса $P_1 k^{ir}$. Общая мощность карстующихся пород $25\text{--}30 \text{ м}$. Иренский горизонт подстилается мощной толщей доломитов и известняков нижнего филипповского горизонта кунгурского яруса $P_1 k^{ph}$. Участок исследования относится к Нижнесыльвенскому району гипсового и карбонатно-гипсового интенсивного карста [12]. На территории Кунгура и его окрестностей широко развиты карстовые процессы, связанные с выщелачиванием сульфатных пород. Талые снеговые и дождевые воды, проникая под фундаменты, вызывают обводнение и осадку фундамента строений. Особые условия для суффозионно-карстовых процессов создает повышенный уклон земной поверхности, определяющий сток поверхностных вод. Обследуемый микрорайон располагается на станции известняков вблизи обрывистого спуска в долину р. Ирень с перепадом высот более 20 м.

Геофизические исследования проводились во дворе дома, на котором замечено появление трещин, для уточнения безопасности его дальнейшей эксплуатации. Основной задачей ставилось определение участков, подверженных процессу карстообразования, в непосредственной близости от дома. В состав работ входила комплексная малоуглубинная сейсморазведка (МПВ + MASW) и электроразведка методом ВЭЗ. Сейсмический профиль проходил вдоль юго-западной стены, в 3 м от дома. Провести измерения ВЭЗ вблизи дома было невозможно из-за экранирующего влияния стальных канализационных труб, уложенных рядом, поэтому точки зондирования выбирались со смещением. Наличие асфальтированных дорожек и бетонных площадок привело к ограничению некоторых разносов ВЭЗ. Результаты геофизические работ, оформленные в виде сейсмических разрезов и колонок ВЭЗ, представлены на рис. 1.

Полученные годографы не позволяют получить преломляющие границы, так как близки по виду к годографам рефрагированных волн. Однако по изменению сейсмических скоростей и коэффициента Пуассона μ удалось проследить три основных структурных элемента разреза. Верхний слой (от 2 до 10 м) относится к рыхлым терригенным грунтам (суглинок, насыпной грунт) с пониженными скоростями продольных ($v_p = 250\text{--}600 \text{ м/с}$) и поперечных волн ($v_s = 150\text{--}300 \text{ м/с}$) и низкими значениями коэффициента Пуассона ($\mu < 0,15$). Граница рыхлых отложений приблизительно соответствует скоростной изолинии $v_p = 700 \text{ м/с}$ (рис. 1). Второй и третий горизонты связаны с карбонатно-гипсовыми

карстующимися породами, отличающимися по структурно-прочностным характеристикам. Разделить карбонатные и сульфатные породы по упругим свойствам не представляется возможным. Скорости сейсмических волн в обеих разновидностях значительно ниже типовых скоростей в монолитных породах. Так, скорости продольных волн v_p составляют 700–1500 м/с, а максимальная скорость поперечных волн достигает 650 м/с. На скоростных разрезах продольных волн выделяются две депрессии в районах отметок 30–40 м и 60–70 м. Изолинии скоростей поперечных волн v_s носят плавный характер, монотонно возрастая с глубиной. Наиболее показательным упругим параметром для определения кавернозных зон и идентификации подземных пустот является коэффициент Пуассона. Его нормальные значения для монолитных и слабо дислоцированных пород составляют 0,25–0,45; значения $\mu < 0,15$ свидетельствуют о сильном разуплотнении грунтов, характерном для трещиновато-кавернозных пород, а нулевые и кажущиеся отрицательные значения μ позволяют выделить подземные пустоты [13]. На полученном разрезе коэффициента Пуассона выделяются две зоны аномально низких значений на глубине 12–18 м (ПК 30–40 м и 60–65 м), говорящие о возможном нарушении структурной целостности грунтов с образованием каверн и подземных пустот. Результаты ВЭЗ на отметке 65 м (В-6) подтверждают наличие здесь карстовой воронки, заполненной глинистыми отложениями до глубины 16 м. О начавшейся просадке грунта свидетельствует появление трещин на стене дома и в одной из квартир. Аномалия в районе ПК 30–40 м указывает на вероятное нахождение еще более объемной карстовой полости.

Подземные выработки

Следующий объект исследований представляет собой земельный участок под строительство спортивного комплекса в г. Березовский Свердловской области. Он располагается над шахтным полем Березовского золоторудного месторождения и может подвергаться просадочным явлениям. Горные выработки проходят по дайкам плагиогранит-порфиров, секущих вмещающие вулканогенно-осадочные породы. Дайки пронизаны «лестничными» кварцевыми жилами, с которыми и связано золотосульфидное оруденение [14]. В геологическом строении прилегающей к участку территории принимают участие вулканогенные породы основного состава – базальты. Четвертичные породы в разрезе участка представлены слоем элювиальных суглинков и супесей, которые, в свою очередь, перекрыты насыпными грунтами. Согласно имеющейся рудничной документации, участок работ находится в районе выхода на поверхность дайки № 72, на площади, не затронутой горными работами. В связи с недостаточно сохранившимися архивными материалами по проработанности поверхности для установления зон опасного сдвижения Березовский рудник рекомендовал провести инженерно-геофизические изыскания. Геофизические работы проводились на проектируемых местоположениях объектов строительства по выявлению возможных пустот от не числящихся и не задокументированных горных выработок и устранению их вредного влияния на строящиеся объекты. В задачи исследований входило выявление техногенных изменений, вызванных проработкой территории горными работами, а также определение условий залегания коренных пород и покрывающих их рыхлых отложений.

Проводившиеся ранее аналогичные исследования показали высокую эффективность обнаружения старых выработок сейсморазведкой МПВ, если известно точное положение на местности даек плагиогранит-порфиров [15]. Для локализации даек обычно использовались имеющиеся маркшейдерские и горно-геологические планы, а в случае их отсутствия – данные других геофизических методов. Наиболее простым и надежным методом выделения даек оказалась радиометрия, так как плагиограниты содержат повышенные концентрации естественных радиоактивных элементов. Эта особенность давно используется при каротаже буровзрывных скважин в шахтах рудника, а теперь применяется и при изысканиях. Радиационная съемка интенсивности гамма-излучения выполнялась радиометром СРП-88 с шагом 2,5 м, при построении применялось гауссовское сглаживание. На рис. 2 представлены результаты геофизических работ по одному из исследованных профилей, пересекших дайку № 72 в месте ее проработки.

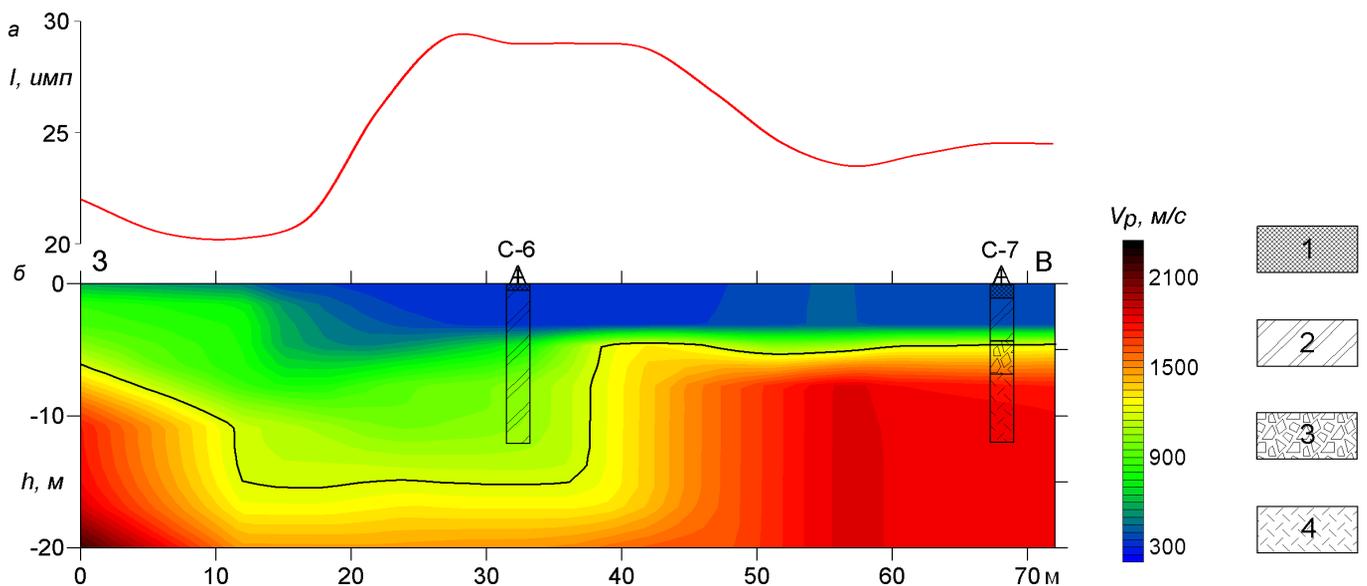


Рисунок 2. Результаты инженерно-геологических и геофизических работ в районе старых горных выработок Березовского месторождения. а – график интенсивности гамма-излучения; б – скоростной сейсмический разрез и геологические колонки скважин (по результатам бурения); 1 – насыпной грунт; 2 – суглинок элювиальный; 3 – щебенистый грунт с супесью; 4 – базальты.

Figure 2. Results of engineering-geological and geophysical works in the area of old mine workings of Berезovsky deposit.

По графику гамма-съемки можно уверенно выделить область выхода дайки на поверхность в интервале отметок 23–49 м (рис. 2, а). Следовательно «депрессия» на скоростном разрезе в интервале 12–40 м (рис. 2, б) обусловлена горными работами, а не природными процессами. Следует напомнить, что до революции обрабатывались только верхние горизонты месторождения, сведения о которых не сохранились. Скважина С-6, пробуренная в районе аномалии, не дошла до коренных пород, но вскрыла мощный слой характерных светлых суглинков («беликов») с гранитной дресвой, указывающих на присутствие отработанной дайки. В месте, где аномалия отсутствует, скважиной С-7 вскрыт типичный разрез с базальтами в основании (рис. 2, б).

Утечки из промышленных отстойников

Геофизические исследования часто включают в состав работ при инженерно-геологических изысканиях крупных промышленных объектов с экологически опасным производством. Обычное целевое назначение таких изысканий заключается в оценке инженерно-геологических условий в границах исследуемой территории: изучение геолого-литологического разреза, гидрогеологии, физико-механических свойств грунтов, определение химизма и агрессивных свойств грунтов и воды, выявление неблагоприятных физико-геологических явлений.

В соответствии с планируемой реконструкцией шламоохранилища Среднеуральской ГРЭС необходимо было определить места фильтрационных утечек из существующих секций шламоотвала. Естественный рельеф площадки изысканий нарушен и представляет собой 2 секции шламоотвала № 1, заполненные водой, с ограждающими дамбами и дорогами вокруг. Высота существующих ограждающих дамб 2,5–3,0 м. В геоморфологическом отношении площадка находится на левом берегу р. Лебяжка. На расстоянии примерно 1,5 км от участка изысканий находится оз. Исетское. В процессе выполнения инженерно-геологических изысканий, опасных склоновых процессов, таких, как осыпи и обвалы, не выявлено. В гидрогеологическом отношении территория расположена в пределах развития подземных вод трещинного типа. Условный водоупор определяется глубиной распространения региональной трещиноватости и находится на глубине ориентировочно 50 м (по фондовым материалам). Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, основной объем питания – в осенне-весенний период, разгрузка – в местные базы дренирования. При проведении изысканий уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 2,2–3,0 м. По данным химического анализа, подземные воды имеют преимущественно сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-магниевый состав. Минерализация подземных вод составляет 693,14 мг/л. По данным бурения в пределах исследованного разреза выявлены следующие элементы (сверху вниз).

Техногенный грунт tQ_4 представлен щебнем, дресвой, суглинками и обломками скального грунта (сланцы). Встречен повсеместно во всех скважинах мощностью 1,8–3,2 м. Содержание и состав компонентов меняется незакономерно в плане и по глубине. Техногенные грунты сформировались при строительстве и обустройстве существующих секций шламоотвала. Возраст отсыпки предположительно более 20 лет, и насыпь относится к слежавшимся грунтам.

Элювиальные грунты eMZ представлены суглинком тугопластичной консистенции желто-коричневого цвета. Имеют широкое распространение в разрезе, пройдены на полную мощность.

Скальные грунты сланцев βO_3 залегают в основании разреза, от малопрочных (сильнотрещиноватых) до прочных. Встречены во всех скважинах.

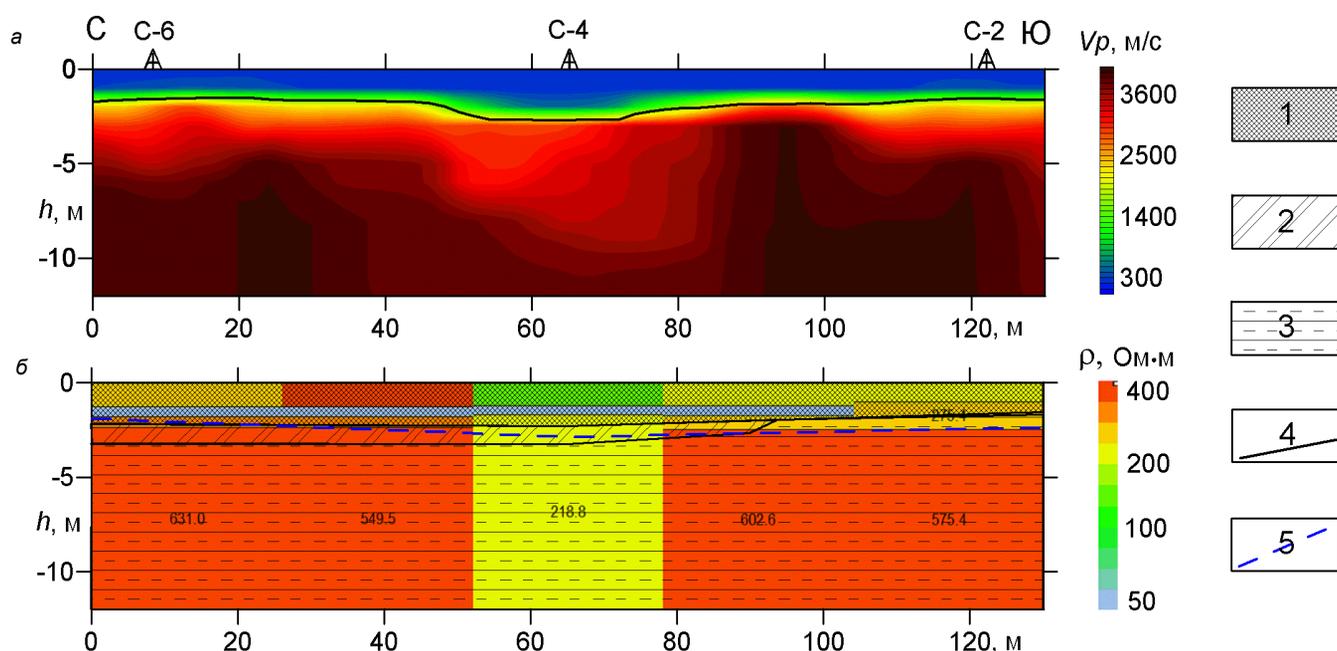


Рисунок 3. Результаты инженерно-геологических и геофизических изысканий на дамбе шламоотвала № 1 СУГРЭС. а – скоростной сейсмический разрез; б – геоэлектрический разрез на геологической основе (по результатам бурения). 1 – насыпной грунт; 2 – суглинок элювиальный; 3 – кристаллические сланцы; 4 – преломляющая граница; 5 – уровень грунтовых вод.

Figure 3. The results of engineering-geological and geophysical surveys on the dam of sludge pit No. 1 (SUGRES – Sredneural'sk hydro recirculation power station).

Геофизические исследования были проведены по всем дамбам, ограждающим секции шламоотвала. Использовались ВЭЗ с дипольно-осевой измерительной установкой и малоглубинная сейсморазведка. Сложная интерференция поверхностных волн, обусловленная геометрией рельефа, не позволила получить качественные дисперсионные кривые. Вследствие этого при интерпретации использованы только результаты по преломленным волнам. Полученные годографы позволяют проследить одну сейсмическую границу и выделить два основных структурных горизонта. Верхний слой (от 1,7 до 3 м) относится к рыхлым отложениям (насыпной грунт) с низкими сейсмическими скоростями $v_p = 200\text{--}400$ м/с. Сейсмическая преломляющая граница проходит по промежуточному маломощному слою элювиальных суглинков, либо в случае их отсутствия – по коренным (скальным) породам, скорость продольных волн в которых составляет 3000–4000 м/с. Электрические зондирования позволяют уверенно выделить все инженерно-геологические элементы разреза, довольно контрастные по УЭС. Результаты обработки геофизических работ оформлены в виде сейсмических и геоэлектрических разрезов с нанесенными на них преломляющими границами и геологической основой (рис. 3).

Значения скоростей продольных сейсмических волн в сланцах довольно высокие ($v_p = 2000\text{--}4000$ м/с), так как коренные породы относятся преимущественно к прочным и среднепрочным скальным грунтам. Явных нарушений структуры грунтов по сейсмическим данным не наблюдается, однако заметно некоторое снижение скорости продольных волн в интервале отметок 50–80 м профиля. Здесь же фиксируется уменьшение довольно стабильного удельного сопротивления скальных грунтов от 550–600 до 200 Ом × м, что может свидетельствовать о повышении трещиноватости горных пород и заполнении пор кислотными водами шламоотстойника. Таким образом, утечки из прудков-отстойников связаны с повышенной фильтрацией через зоны трещиноватости коренных пород. Дополнительным подтверждением положения аномалии послужила георадарная съемка, где на временном разрезе наблюдаются интенсивные интерференционные отражения в указанном месте, свидетельствующие о высокой обводненности выделенной зоны.

Заключение

Представленные результаты позволяют сделать вывод о востребованности геофизических исследований при изучении опасных геологических процессов природного и техногенного происхождения. Эффективным методом по выявлению подземных пустот, образовавшихся в результате действия процессов карстообразования или за счет горных работ, следует признать малоглубинную сейсморазведку. Это связано с резким изменением упругих свойств в районе пустотного пространства и зон разуплотнения грунтов, что выражается в появлении контрастных аномалий пониженных значений на фоне относительно однородного распределения в окружающих породах. Электроразведка помогает в структурном и литологическом расчленении грунтов по электрическим свойствам, а также позволяет выделять трещиноватые и обводненные зоны. Радиометрия дает возможность уточнить области распространения и границы коренных пород разного состава. Комплексование разных геофизических методов позволяет получить больше данных об изменениях физических свойств грунтов, что дает возможность распознать и выделить области воздействия опасных геологических процессов.

Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 15-2-5-31 и № 18-5-5-38.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е. Сейсмическая станция «Синус» // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 5. С. 162–163.
2. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64 (3). P. 800–808.
3. Socco L. V., Foti S., Boiero D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models – Established approaches and new perspectives // Geophysics. 2010. Vol. 75 (5). P. 75A83–75A102.
4. Интерпретация данных сейсморазведки: справочник / под ред. О. А. Потапова. М.: Недра, 1990. 448 с.
5. Ivanov J., B. Leitner, W. T. Shefchik, T. J. Schwenk, Peterie S. L. Evaluating hazards at salt cavern sites using multichannel analysis of surface waves // The Leading Edge. 2013. № 32. P. 289–305.
6. Sloan S. D., Peterie S. L., Miller R. D., Ivanov J., Schwenk J. T., McKenna J. R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques // Geophysics. 2015. Vol. 80 (5). P. EN127–EN135.
7. Овсюченко А. Н., Калинина А. В., Аммосов С. М., Вакарчук Р. Н., Новиков С. С., Ларьков А. С., Мараханов А. В. Использование сейсморазведки методом MASW в сейсмотектонических исследованиях (на примере Дальнего Востока России) // Инженерные изыскания. 2013. № 2. С. 38–48.
8. Антипов В. В., Офрихтер В. Г. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7, № 2. С. 37–49.
9. Каминский А. Е. Zond-программы для геофизики. URL: <http://zond-geo.ru/software>
10. Жуков А. А., Пригара А. М., Пушкарева И. Ю., Царев Р. И. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников // ГИАБ. 2015. № 5. С. 120–130.
11. Pisetski V. B., Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Savintsev I. A., Serkov V. A. The Study of Karst Processes According to the Electromagnetic and Seismic Observations // 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016 (25–29 April 2016). Anapa, Russia, 2016. P. 161–164.
12. Катаев В. Н., Кадебская О. И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; Горный ин-т УрО РАН. 2010. 231 с.
13. Давыдов В. А. Применение малоглубинной сейсморазведки для изучения подработанных территорий // Изв. вузов. Горный журнал. 2010. № 4. С. 111–116.
14. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГГА, 1999. 570 с.
15. Давыдов В. А. Обнаружение подземных пустот антропогенного характера с помощью геофизических методов // Инженерные изыскания. 2013. № 7. С. 52–57.

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.

Study of hazardous natural and man-made geological processes using geophysical methods

Vadim Anftol'evich Davydov¹,
davyde@yandex.ru
Vladislav Anatol'evich Shchapov¹,
vlad-shchapov@yandex.ru
Grigoriy Aleksandrovich Tsay²,
tsai.grigory@gmail.com

¹Bulashevich Institute of Geophysics of the Urals Branch
of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russia
²Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia

The relevance of the work is conditioned by the need to prevent damage to the modern infrastructure of dangerous geological processes and phenomena.

The purpose of the work is to show the principal possibility of studying dangerous natural and man-made geological processes with the help of complex geophysical studies.

Research methodology: electrical and low-water seismic explorations were used as the main methods; radiometry was used on one of the objects. Electric prospecting works were carried out by method of vertical electric sounding (VES). Seismic exploration was carried out by the method of refracted waves (IWS) in combination with multi-channel analysis of surface waves (MASW).

Results. The low-depth seismic exploration was recognized as an effective method for identifying underground voids formed as a result of the action of the processes of karst formation or due to mining operations. This is connected with a sharp change in the elastic properties in the area of the void space and areas of soil desalinization. This is expressed in the appearance of contrast anomalies of lower values against the background of a relatively homogeneous distribution in the surrounding rocks. Electrical testing helps with the structural and lithological subdivision of the soil electric properties, and also allows you to highlight the fractured and flooded areas. Radiometry makes it possible to specify the areas of distribution and boundaries of indigenous breeds of different compositions.

Conclusion. The integration of geophysical methods allows getting more information about the changes of physical properties of soils. This gives the opportunity to identify and highlight areas of exposure to hazardous geological processes. The results of the work indicate the high efficiency of geophysical research in the study of dangerous geological processes of natural and man-made origin.

Keywords: underground cavities; karst; suffusion; subsidence; fluid leakage; shallow seismicity; electromagnetics.

The work has been done at a partial assistance of the fundamental research program UB RAS, projects No. 15–2–5–31 and No. 18–5–5–38.

REFERENCES

1. Senin L. N., Senina T. E. 2005, *Seismicheskaya stantsiya «Sinus»* [A seismic station called "Sinus"]. *Pribory i tekhnika experimenta* [Instruments and Experimental Techniques], no. 5, pp. 162–163.
2. Park C. B., Miller R. D., Xia J. 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, vol. 64 (3), pp. 800–808.
3. Socco L. V., Foti S., Boiero D. 2010, [Surface-wave analysis for building near-surface velocity models – Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, vol. 75 (5), pp. 75A83–75A102.
4. 1990, *Interpretatsiya dannykh seysmorazvedki: spravochnik* [Interpretation of seismic data: A handbook], *pod red. O. A. Potapova* [edited by O. A. Potapov]. Moscow, 448 p.
5. Ivanov J., B. Leitner W., Shefchik T., Schwenk T. J., Peterie S. L. 2013, Evaluating hazards at salt cavern sites using multichannel analysis of surface waves. *The Leading Edge*, no. 32, pp. 289–305.
6. Sloan S. D., Peterie S. L., Miller R. D., Ivanov J., Schwenk T. J., McKenna J. R. 2015, Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*, vol. 80 (5), pp. EN127–EN135.
7. Ovsyuchenko A. N., Kalinina A.V., Ammosov S. M., Vakarchuk R. N., Novikov S. S., Larkov A. S., Marakhanov A.V. 2013, *Ispol'zovaniye seysmorazvedki metodom MASW v seysmotektonicheskikh issledovaniyakh (na primere Dal'nego Vostoka Rossii)* [The use of seismic exploration by the MASW method in seismotectonic studies (on the example of the Russian Far East)]. *Inzhenernyye izskaniya* [Engineering Survey], no. 2, pp. 38–48.
8. Antipov V. V., Ofrichter V. G. 2016, *Sovremennyye nerazrushayushchiye metody izucheniya inzhenerno-geologicheskogo razreza* [Modern methods of NDT study of engineering-geological section]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin], vol. 7, no. 2, pp. 37–49.
9. Kaminsky A. E. *Zond-programmy dlya geofiziki* [Zond-programs for Geophysics]. URL: <http://zond-geo.ru/software>
10. Zhukov A. A., Prigara A. M., Pushkareva I. Yu., Tsarev R. I. 2015, *Opyt primeneniya kompleksa geofizicheskikh metodov dlya vyyavleniya karstovykh polostey v otvalakh kaliynykh rudnikov* [An attempt to apply geophysical methods to detect karstic cavities in the dumps of potassic mines]. *GIAB* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 120–130.
11. Pisetski V. B., Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Savintsev I. A., Serkov V. A. 2016, The Study of Karst Processes According to the Electromagnetic and Seismic Observations. *12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016* (from 25 to 29 April 2016). Anapa, Russia, pp. 161–164.
12. Katayev V. N., Kandebskaya O. I. 2010, *Geologiya i karst goroda Kungura* [Geology and karst of the Kungur city]. Perm', 231 p.
13. Davydov V. A. 2010, *Primeneniye maloglubinnoy seysmorazvedki dlya izucheniya podrobotannykh territoriy* [Applying shallow seismic exploration for the study of developed areas]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 4, pp. 111–116.
14. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu.A. 1999, *Mestorozhdeniya zolota Urala* [Gold deposits of the Urals]. Ekaterinburg, 570 p.
15. Davydov V. A. 2013, *Obnaruzheniye podzemnykh pustot antropogennogo kharaktera s pomoshch'yu geofizicheskikh metodov* [Detecting underground cavities of anthropogenic nature with the help of geophysical methods of engineering surveying], no. 7, pp. 52–57.

The article was received on January 26, 2018