

УДК 504.064.2: 550.837.21

Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиоманнитотеллурических экспресс-зондирований

В.А.ДАВЫДОВ

Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

На территории Дегтярского рудника, не функционирующего в настоящее время, выполнены аудиоманнитотеллурические экспресс-зондирования по четырем профилям, пересекающим шахтное поле. Полевые измерения проводились универсальным широкополосным приемником «ОМАР-2м» с активными датчиками электромагнитного поля, разработанными в Институте геофизики УрО РАН. По полученным данным построены глубинные разрезы электрофизических параметров среды – кажущихся сопротивлений и эффективной продольной проводимости. Характер геоэлектрического строения разреза позволяет оконтурить основной литохимический ореол загрязнения и выделить зоны тектонических нарушений, дренирующих агрессивные рудничные воды. Шахтные воды Дегтярского рудника являются источником опасного техногенного загрязнения. Несмотря на нейтрализацию поверхностного стока, существуют подземные пути миграции кислых вод по тектоническим трещинам, в первую очередь – в зоне регионального Серовско-Маукского разлома. Тектонические зоны в районе рудника содержат загрязненные трещинно-жильные воды, транзит которых осуществляется на глубине от 70 до более 200 м. Области разгрузки таких вод, в виде восходящих родников, могут находиться на большом расстоянии от контролируемых гидрологических объектов и загрязнять источники питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Городская застройка западной и восточной частей Дегтярска не попадает в зону распространения загрязненных вод. Южная часть города находится за водоразделом области стока рудничных вод, однако существует опасность локального загрязнения по зонам тектонических нарушений. Наихудшая экологическая ситуация наблюдается на северной окраине Дегтярска, попадающей в ореол сильного загрязнения подземных и поверхностных вод. Кроме того, кислотные испарения затопленного Колчеданного карьера, попадая в атмосферу, могут повлиять на здоровье жителей города.

Ключевые слова: геоэкология; шахтные воды; техногенное загрязнение; АМТЗ; продольная проводимость; тектонические зоны

Как цитировать эту статью: Давыдов В.А. Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиоманнитотеллурических экспресс-зондирований // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 379-387. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.379

Введение. Совокупность разнообразных процессов, изменяющих природную среду под воздействием человеческой деятельности, принято называть «техногенезом». Наиболее масштабные преобразования окружающей среды осуществляются горнорудной промышленностью. Активный этап горнорудного техногенеза, связанный с изъятием и перемещением больших масс горных пород, происходит в процессе разработки месторождений. Добыча полезных ископаемых приводит к изменению структуры и химического состава литосферы, загрязнению атмосферы и природных вод. В результате формируются обширные лито-, атмо- и гидрохимические ореолы загрязнения [1]. После прекращения деятельности рудника наступает постэксплуатационная пассивная стадия техногенеза, отличающаяся меньшей степенью воздействия, но значительно большей продолжительностью.

В горнодобывающей промышленности Урала особое место занимают колчеданные месторождения. В процессе добычи в них происходят гипергенные изменения рудных минералов, заключающиеся в окислении труднорастворимых сульфидов в хорошо растворимые сульфаты в присутствии свободного кислорода. Результатом этих реакций становится резкое снижение рН вод, сопровождаемое увеличением окислительно-восстановительного потенциала, что приводит к трансформации природных геохимических процессов. Следствием является изменение химического состава природных вод, техногенная миграция рудных элементов и загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами [12]. Данные процессы продолжают длиться долгое время и после закрытия горнодобывающих предприятий. Цель работы заключается в определении масштаба загрязнения от не функционирующего в настоящее время Дегтярского рудника на Среднем Урале. Основной задачей является изучение особенностей геоэлектрического строения разреза шахтного поля с помощью магнитотеллурических технологий.



Постановка проблемы. Дегтярское медноколчеданное месторождение, известное с 1888 г., занимает центральную часть городской застройки Дегтярска. Вначале на его месте располагался Истокинский рудник по разработке бурых железняков, в 1906 г. под ним были обнаружены сульфидные руды. Месторождение находится в наиболее суженной части Тагило-Магнитогорского прогиба и представлено одним рудным телом, залегающим в висячем боку Серовско-Маукского разлома. Колчеданная залежь залегает согласно с вмещающими вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами дегтярской свиты, насыщенными вкрапленностью пирита. Породы имеют ритмичное строение, геохимическая и рудная зональность свидетельствует о запрокинутости толщи на запад. На востоке дегтярская свита пронизана телами риолитов субвулканического комплекса и ограничивается гранитоидами Новоалексеевского массива.

К западу от рудной залежи находится зона разлома, контактирующая с магматическими породами Тагильского прогиба [3]. В зоне разлома развиты серпентиниты, мраморизованные известняки, сланцы и другие породы, беспорядочно чередующиеся между собой. Все эти образования характеризуются интенсивной блочной раздробленностью, образуя в совокупности гигантскую тектоническую брекчию (зону полимиктового меланжа). Зона разлома вплотную приближается к рудному телу и на глубоких горизонтах срезает рудовмещающий контакт. Средняя мощность рудного тела более 10 м, длина составляет около 5 км, простирание субмеридиональное с падением на восток под углом 55-90°. Колчеданные руды двух основных типов – массивные и вкрапленные. К главным рудным минералам относятся пирит, халькопирит и сфалерит. Выход руд на дневную поверхность представлен лимонитами зоны окисления или «железной шляпой» мощностью 10-25 м. В северной и центральной частях месторождения «железная шляпа» была полностью отработана с поверхности карьерами. Дегтярский подземный рудник функционировал с 1914 по 1995 гг. с максимальной глубиной проведения горных работ до 610 м. Перед закрытием рудника восемь шахтных стволов было обрушено, один ствол засыпан, четыре шахты сохранились: Капитальная-1, Капитальная-2, Средняя и Южная (рис. 1).

Дегтярское месторождение расположено в глубокой заболоченной депрессии с абсолютными отметками 323-355 м, снижающимися субмеридионально в северном направлении. На западе и востоке низменность окружена цепью возвышенностей с отметками 360-488 м. В пределах депрессии вдоль зоны Серовско-Маукского разлома протекает р. Дегтярка, русло которой сильно изменено за период горнодобычных работ. На севере шахтное поле в широтном направлении пересекает р. Исток, вытекающая из оз. Икбулат и впадающая в р. Дегтярка. Южнее шахтного поля в субширотном направлении протекает р. Вязовка, приток р. Чусовая [10].

По условиям скопления и циркуляции подземные воды района относятся к трещинным и трещинно-жильным. При всей сложности структуры фильтрационного потока в ненарушенных условиях зеркало подземных вод обычно повторяет сглаженный рельеф земной поверхности. Подземные водоразделы являются отражением поверхностных, а разгрузка подземного потока осуществляется в местную речную сеть – реки Дегтярка, Исток и Вязовка. За время работы рудника осуществлялся постоянный водоотлив в объеме 200-300 м³/ч, что привело к формированию устойчивой депрессионной воронки площадью более 5 км².

В пределах контура депрессионной воронки Дегтярского месторождения была сформирована техногенная зона аэрации с системой дренажных каналов, связывающих поверхность земли с подземными горными выработками. Активная аэрогенная циркуляция проникла в глубокие горизонты, которые в природных условиях были изолированы от проникновения атмосферного воздуха. На поверхности земли и в техногенной зоне аэрации был сформирован литохимический ореол, обогащенный рассеянной сульфидной минерализацией и легкорастворимыми техногенными гидросульфатами железа, меди, цинка и других.

Через четыре года после остановки откачных насосов произошло полное затопление подземных выработок. Выход шахтных вод произошел в карьер шахты Колчеданная, а после его заполнения – в русло р. Исток. Шахтоизлив представляет собой техногенный родник, режим которого находится под влиянием климатических факторов и имеет расход, многократно превышающий природные аналоги (до 30-60 л/с). Он обеспечивается инфильтрацией атмосферных осадков в пределах области дренирования подземных горных выработок с территории площадью не менее 2 км², что обеспечивает постоянный сток шахтных вод [13].

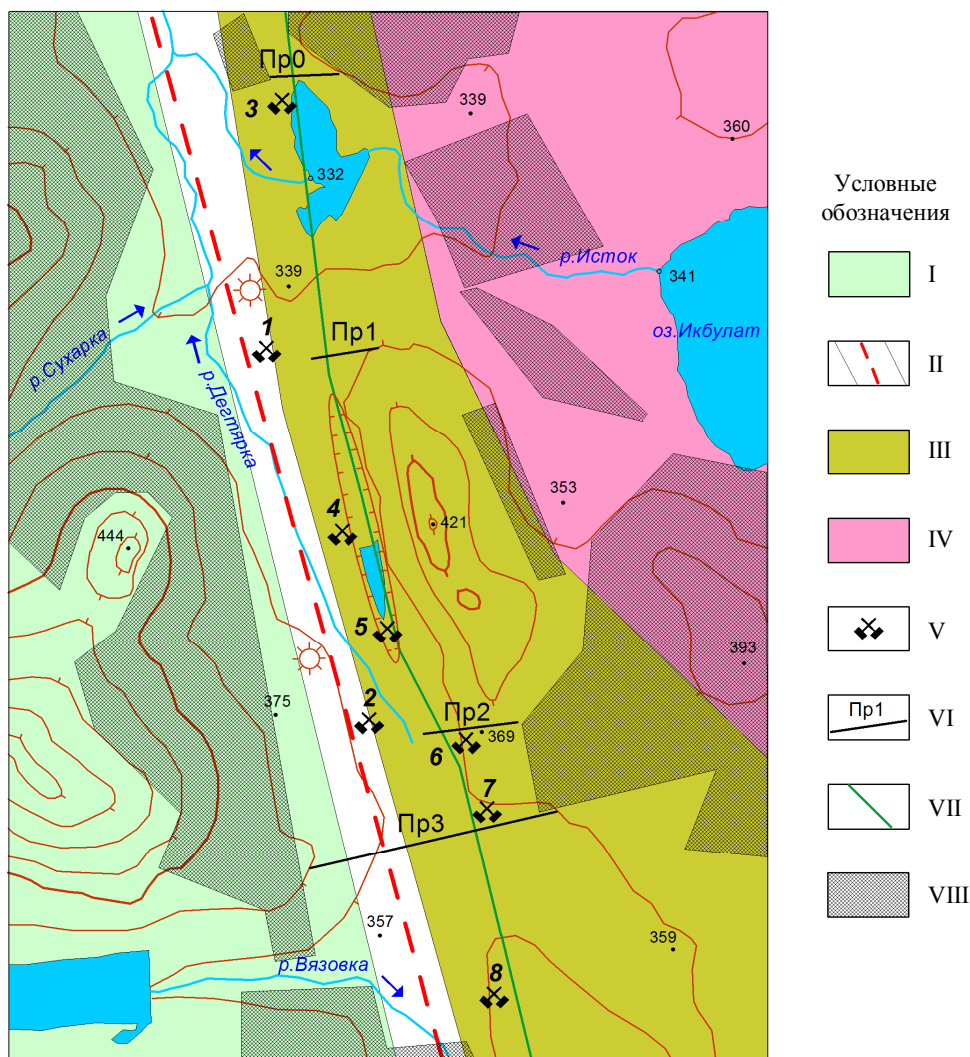


Рис. 1. Схематическая карта Дегтярского рудника

I – магматические породы Тагильского прогиба (базальты, диориты, габбро); II – зона Серовско-Маукского разлома с полимиктовым меланжем; III – вулканогенно-осадочные породы дегтярской свиты (туфопесчаники, базальты, туфы); IV – дегтярский субвулканический комплекс (риолиты, плагиограниты); V – закрытые шахты (1 – Капитальная-1; 2 – Капитальная-2; 3 – Колчеданная; 4 – Средняя; 5 – Первомайская; 6 – Москва; 7 – Комсомольская; 8 – Южная); VI – геофизические профили; VII – проекция выхода рудного тела на дневную поверхность; VIII – зона жилой застройки

Химический состав вод формировался под влиянием активного окисления сульфидов и серно-кислотного выщелачивания рудовмещающих пород. По гидрогеологическим данным дренажные воды Дегтярского рудника относятся к сульфатным магниево-кальциево-железистым, кислым и ультракислым, солоноватым, с минерализацией 3-8 г/л и рН = 2,5-3,6 [4]. Такие воды имеют очень низкие величины удельных электрических сопротивлений (< 1 Ом·м), поэтому области их распространения должны уверенно выделяться электроразведочными методами.

С помощью электромагнитных зондирований можно трассировать зоны проникновения и дренажа шахтных и рудничных вод во вмещающий горный массив по аномалиям электропроводности. Исследование электрофизических свойств геологического разреза поможет выявить основные ореолы распространения агрессивных подземных вод и определить опасность техногенного загрязнения городской территории.

Методология. Для изучения характера геоэлектрического разреза были использованы аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ), обладающие необходимой глубиной и положительно зарекомендовавшие себя при исследованиях подземных вод [7, 15, 18, 19] и сульфидной минерализации [14, 17]. Полевые измерения проводились в экспресс-варианте АМТЗ с помощью двухканального универсального приемника «ОМАР-2м», разработанного в Институте геофизики УрО РАН [9].

Регистрация естественного электромагнитного поля велась в частотном диапазоне 100-15000 Гц по широтным профилям с шагом 20 м. Длительность непрерывной записи на точке составляла 2-3 мин. Для наблюдения за горизонтальной компонентой магнитного поля H_x использовался активный датчик индукционного типа с линейризованной амплитудно-частотной характеристикой и изменяемой чувствительностью. Электрическая составляющая E_y измерялась с помощью стелющейся емкостной линии с предварительным усилителем [6]. Отношение амплитуды электрической компоненты сигнала к ортогональной магнитной составляющей определяет импеданс среды $Z = E_y / H_x$, пропорциональный электрическому сопротивлению горных пород. Кажущиеся значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) рассчитывались по формуле, принятой в магнитотеллурике [2]:

$$\rho_T = (1/2\pi f\mu)|Z|^2,$$

где f – частота сигнала, Гц; $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Этапы камеральной обработки аудиоманнитотеллурических данных включали:

- фильтрацию электромагнитных помех с частотой 50 Гц и ее гармоник;
- получение спектров сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье;
- восстановление реального спектрального распределения амплитуд сигналов с учетом нелинейности характеристик сквозных измерительных каналов;
- определение спектральных отношений $E_y(f)/H_x(f)$ для получения продольного импеданса среды $Z(f)$;
- расчет кажущихся сопротивлений (КС) с получением частотных кривых $\rho_T(f)$;
- трансформацию частотных кривых в глубинный разрез сопротивлений $\rho_T(h)$, с помощью оригинального алгоритма преобразования [8];
- пересчет и построение разреза эффективной продольной проводимости $S_{эф}$.

Результаты. Разметка исследовательских профилей проведена в субширотном направлении, вкострест простирания основных геологических структур. Всего пройдено четыре профиля на разных участках рудного поля. Аудиоманнитотеллурические зондирования являются довольно глубинными методами геофизических исследований. Частотный диапазон, в котором проводились измерения, позволяет получать сведения о разрезе на глубину от десятка до нескольких сотен метров [5]. Однако разрешающая способность АМТЗ с глубиной падает, поэтому для сохранения высокой детальности, глубина исследований ограничивалась до 200-300 м.

Особенности геоэлектрического строения территории рудника обусловлены различием УЭС горных пород и руд, обводненностью, тектоникой и шахтной подработкой. Исследование электрофизических свойств разреза в зоне техногенного воздействия рудничных вод начато с северной части отработанного месторождения, вблизи затопленного Колчеданного карьера. Профиль ПР0 проходил по северной оконечности искусственного озера бурого цвета, со стойким запахом серной кислоты. В южной части бывшего карьера действует постоянный излив шахтных вод Дегтярского рудника и подотвальных вод террикона шахты Капитальная-1. С востока в озеро впадает р. Исток, которая, смешиваясь с рудничными водами, образует общий сток с минерализацией воды 3,7-12,8 г/л и рН = 2,3-3,3 [16].

Вмещающие породы по линии профиля ПР0 представлены в основном туфопесчаниками и зеленокаменными сланцами. Поверхностные глинистые отложения отличаются самыми низкими значениями удельных сопротивлений (10-20 Ом·м), при увеличении песчано-щебенистой фракции сопротивления рыхлых пород повышаются до 100-150 Ом·м. Коренные породы имеют более высокие электрические сопротивления, изменяясь от 150-200 до 1000-3000 Ом·м (рис.2).

Учитывая боковое влияние затопленного карьера глубиной более 70 м, полученные электрические сопротивления несколько занижены. Однако, по виду разреза КС можно сказать, что проникновение кислых вод в коренные породы достигает глубины более 150 м от поверхности земли. По тектоническим трещинам загрязнение может достигнуть еще более глубоких горизонтов. Тектонические нарушения на геоэлектрическом разрезе обычно характеризуются линейными низкоомными аномалиями. При этом форма аномальных зон лучше выделяется на разрезах продольной проводимости.

За счет увеличения объема трещин, заполненных водой, зоны тектоники отмечаются повышенной электропроводностью (от 0,5 См и более). На разрезе эффективной продольной про-

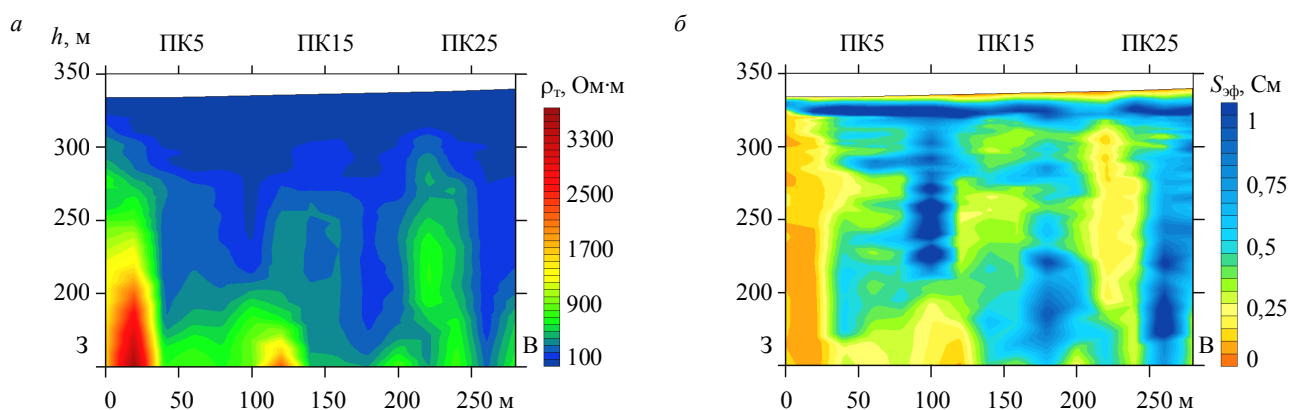


Рис.2. Глубинные разрезы электрофизических параметров по профилю ПР0 в районе карьера шахты Колчеданной: а – кажущееся сопротивление; б – эффективная продольная проводимость

проводимости (рис.2, б) выделяются несколько anomalно проводящих структур. Из них три субвертикальные линейные аномалии, располагающиеся в районе пикетов ПК10, ПК18 и ПК27, можно связать с тектоническими зонами. Горизонтальная аномалия электропроводности на глубине 5-15 м соответствует «верховодке». В западном направлении техногенное загрязнение распространяется в приповерхностном слое почвенных вод, попадая обратно в р. Исток. Ниже по течению, в районе слияния рек Исток и Дегтярка расположена станция нейтрализации. Суммарный речной и рудничный сток нейтрализуется здесь известковым молочком, который снижает водородный показатель pH до 6,5-8,5. После нейтрализации сточные воды попадают в р. Ельчовка, далее в пруд-отстойник.

Вода из Ельчовского пруда сбрасывается в Волчихинское водохранилище, являющееся главным источником водоснабжения г. Екатеринбурга. Экологическая ситуация с поверхностным водостоком находится под контролем – проводится мониторинг состояния воды в реках Дегтярка, Исток и Ельчовка, а также в пруде-отстойнике. Однако возможны неконтролируемые пути миграции загрязненных вод по тектоническим зонам, выявленных на разрезах электрофизических параметров (рис.2). Трещины тектонического генезиса вмещают трещинно-жильные воды, транзит которых осуществляется в нижней части гидрогеологического разреза на глубине 100-250 м. Области разгрузки таких вод могут находиться за пределами контролируемых гидрологических объектов, в направлении Волчихинского водохранилища.

Следующий исследовательский профиль ПР1 расположен в окрестностях шахты Капитальная-1, в 1 км к югу от ПР0. Он проходит по северному склону горы Лабаз, вблизи северной оконечности карьера, оставшегося после обработки «железной шляпы». В начале профиля зафиксированы провалы поверхности вследствие обрушения подземных выработок. На этом участке УЭС коренных пород имеют небольшие значения (50-400 Ом·м), увеличение сопротивлений до 1000-6000 Ом·м наблюдаются во второй половине профиля (рис.3).

Электрические сопротивления могут сильно варьировать даже в породах одного состава и происхождения. Такая изменчивость обусловлена гидротермальными изменениями вблизи рудных зон, рассеянной сульфидной вкрапленностью, трещиноватостью и влажностью горных пород, а также минерализацией поровой влаги. Кислотное загрязнение по поведению сопротивления захватывает в глубину около 100 м от поверхности земли. На разрезе эффективной продольной проводимости (рис.3, б) хорошо выделяется характерное тектоническое нарушение (ПК4), известное по данным рудничной документации, как взбросовая дислокация, секущая рудное тело. Приповерхностная горизонтально-проводящая зона до 0,7 См (ПК0-ПК5), по-видимому, связана с подотвальными водами террикона шахты Капитальная-1. Зоны со слабо повышенной электропроводностью (0,2-0,3 См) обусловлены локальной трещиноватостью коренных пород.

Исследовательский профиль ПР2 находится в 1,5 км южнее ПР1 и проходит по южному склону горы Лабаз (Караульной). Его начало располагается в 300 м восточнее шахты Капитальная-2, приблизительно на таком же расстоянии к югу от затопленной части карьера, где обрабатывалась «железная шляпа» Дегтярского месторождения. На прилегающей территории велись

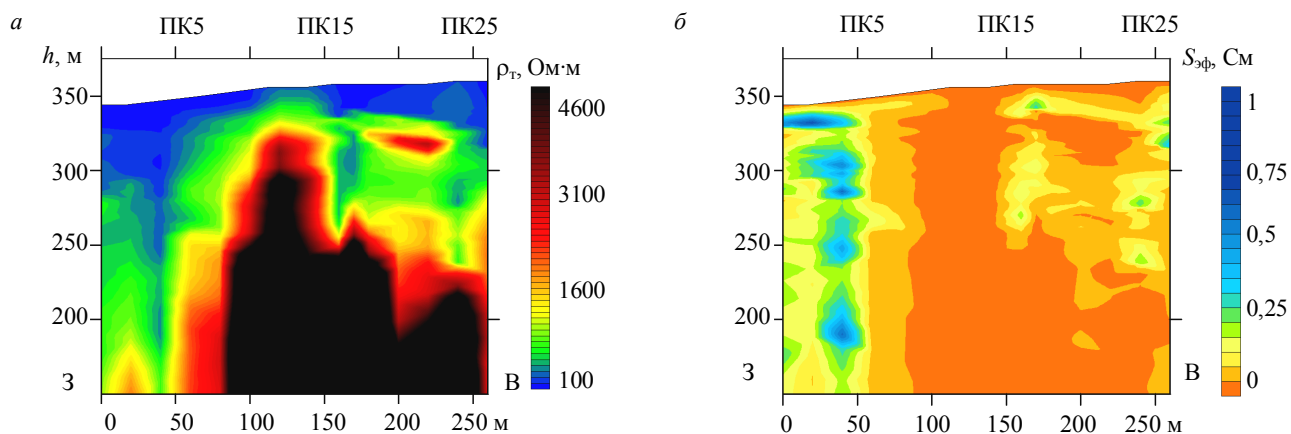


Рис.3. Глубинные разрезы электрофизических параметров по профилю ПР1 в районе шахты Капитальная-1: а – кажущееся сопротивление; б – эффективная продольная проводимость

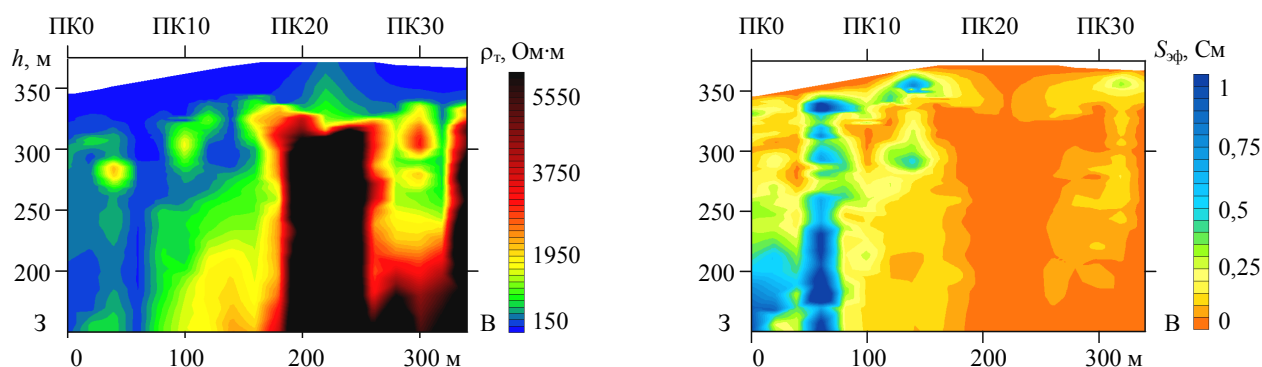


Рис.4. Глубинные разрезы электрофизических параметров по профилю ПР2 в районе шахты Москва: а – кажущееся сопротивление; б – эффективная продольная проводимость

интенсивные работы на всех горизонтах, однако провалы подземных выработок по линии наблюдения отсутствуют. Проекция на поверхность восточной границы проведения горных работ приблизительно соответствует ПК18. Электрические характеристики подработанной территории (ПК0-ПК18) и не затронутой горными работами (ПК18-ПК34) сильно отличаются (рис.4).

На первых пикетах сопротивления коренных пород составляют 100-500 Ом·м, увеличиваясь к середине профиля до 1000-1500 Ом·м на глубоких горизонтах. При переходе в область развития ненарушенных монолитных пород происходит резкий скачок удельных сопротивлений до 5000-8000 Ом·м. На участке, подвергшемся подземным работам, основная область циркуляции кислых вод соответствует подземному горизонту 70 м (абс. отметка 290 м). Судя по разрезу продольной проводимости, верхние горизонты дополнительно подпитываются с нижележащих горизонтов (гор. 130 м и 190 м), по аналогии с ситуацией, наблюдающейся на ближайшем Крылатовском руднике [11]. Перетоки между горизонтами осуществляются по вертикальным стволам ликвидированных шахт и в зоне тектоники (ПК6). Гребень горы Лабаз и его пологое продолжение (ПК22) служит водоразделом области питания р.Дегтярка и оз.Икбулат, поэтому загрязнения грунтовых вод площади городской застройки к востоку от горы не происходит (см. рис.1).

Профиль ПР3 является самым протяженным (1100 м) и проходит через все основные геологические структуры Дегтярского рудного поля. Профиль располагается на южном участке Дегтярского месторождения, проходя недалеко от шахты Комсомольская. Начало профиля слагают магматические породы Тагильского прогиба, относящиеся к зюзельской свите. Далее профиль пересекает с запада на восток зону Серовско-Маукского разлома, за которой залегают рудовмещающие вулканогенно-осадочные породы Дегтярской свиты Восточно-Уральского поднятия. Все упомянутые структуры хорошо отображаются на разрезах геоэлектрических параметров (рис.5).

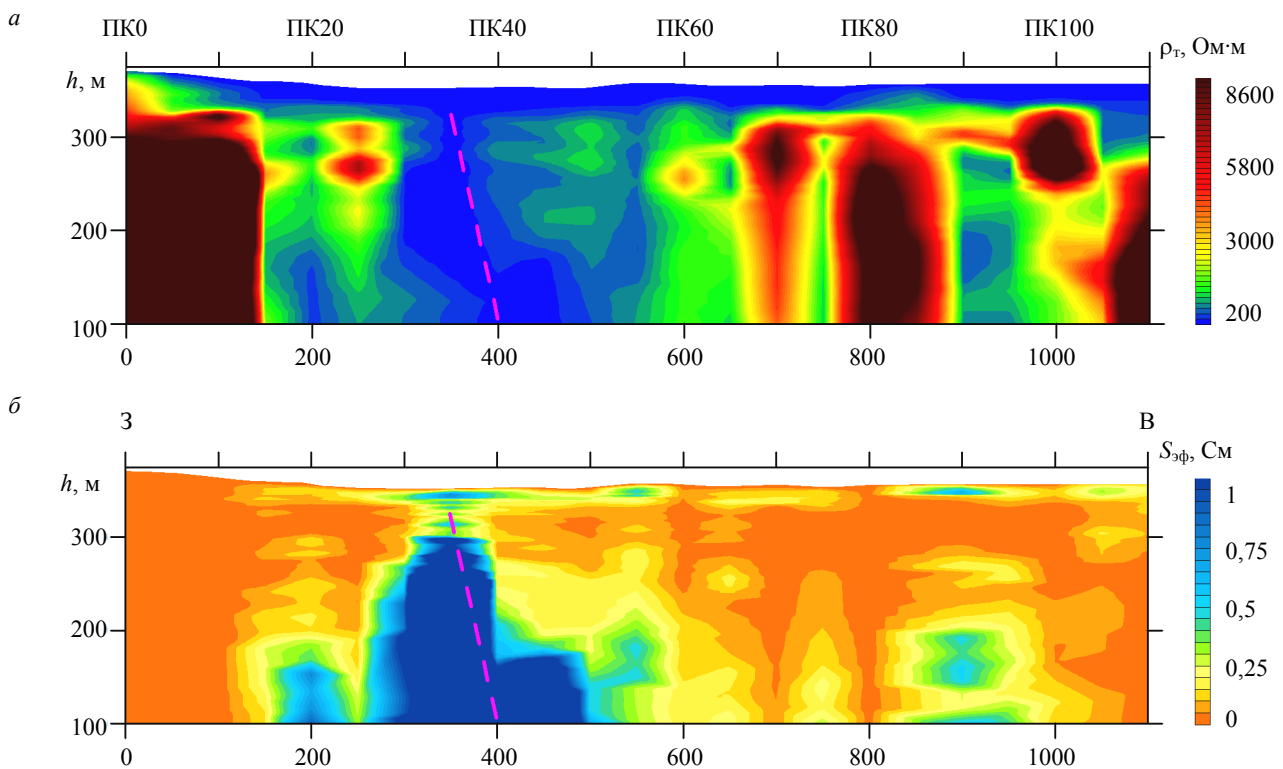


Рис.5. Глубинные разрезы электрофизических параметров по профилю ПР3 в районе шахты Комсомольская: *а* – кажущееся сопротивление; *б* – эффективная продольная проводимость; пунктиром выделена ось Серовско-Маукского разлома

Вулканиды зюзельской свиты (ПК0-ПК30) отличаются самыми высокими УЭС на профиле, их сопротивление меняется в зависимости от трещиноватости от 1000 до 10000 Ом·м. Наиболее хорошо выделяется зона влияния Серовско-Маукского разлома (ПК30-ПК58), для которой характерны самые низкие значения УЭС (до 50 Ом·м), довольно четко определяется восточное падение разлома под углом около 70° . Выход рудного тела на поверхность приурочен к заболоченной низине и располагался в интервале ПК64-ПК65, в настоящее время болото почти полностью засыпано отходами известкового производства. На геоэлектрическом разрезе рудное тело не выделяется, однако на пикете ПК75 отмечается вертикальная низкоомная аномалия, связанная с околорудной тектонической зоной, которая уже проявлялась на профилях ПР1 и ПР2. Удельные электрические сопротивления горных пород дегтярской свиты достаточно выдержанные и составляют 3000-8000 Ом·м.

В районе ПК88-90 наблюдается глубинная аномалия пониженных сопротивлений, возможно обусловленная сильной трещиноватостью пород. Данная зона имеет падение на восток под углом около 80° и характеризуется электропроводностью до 1 См, что свидетельствует о ее водонасыщенности. Самым проводящим объектом профиля является региональный Серовско-Маукский разлом, эффективная продольная проводимость которого составляет от 1 до 6,5 См. Учитывая столь высокие значения, можно сделать вывод о явном притоке загрязненных рудничных вод в зону разлома, с возможностью их дальнейшей миграции на большие расстояния.

Анализируя результаты аудиоманнитотеллурических зондирований, с учетом имеющихся данных по строению района был построен схематичный гидрогеологический разрез современного состояния Дегтярского рудного поля (рис.6).

Полученные электрофизические параметры позволяют определить границу активного и пассивного водообмена. Зона активного водообмена характеризуется постоянным поступлением кислорода, который приводит к окислению сульфидов и сернокислотному выщелачиванию пород. За счет этого кислотность грунтовых вод остается на высоком уровне, а минерализация возрастает вследствие проникновения атмосферных вод и растворения накопленных объемов водорастворимых сульфатов, что приводит к общему понижению электрического сопротивления среды. На большей глубине, в зоне пониженного водообмена, процессы выщелачивания имеют слабое



9. Давыдов В.А. Универсальный полевой геофизический приемник ОМАР-2 // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 127-128. DOI:10.7868/S0032816216060252
10. Елохина С.Н. Роль техногенеза в структурном преобразовании подземной гидросферы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 6. С. 494-505.
11. Зонирование природно-техногенных гидрогеологических систем (на примере Крылатовского рудника) / С.Н.Елохина, В.А.Арзамасцев, С.Э.Борич, Е.М.Сотова, В.А.Щапов // Известия вузов. Геология и разведка. 2010. № 1. С. 57-66.
12. Опекунов А.Ю. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения / А.Ю.Опекунов, М.Г.Опекунова // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 196-204.
13. Параметры постэксплуатационного техногенеза горнорудного профиля в зоне влияния Дегтярского рудника / С.Н.Елохина, А.А.Киндлер, Р.Н.Шараев, А.А.Царегородцева // Сергеевские чтения. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты). М.: Российский университет дружбы народов, 2013. С. 249-254.
14. Audio-magnetotelluric investigation of sulfide mineralization in Proterozoic – Archean greenstone belts of Eastern Indian Craton / S.Singh, V.P.Maurya, R.K.Singh, S.Srivastava, A.Tripathi, P.K.Adhikari // Journal of Earth System Science. 2018. Vol. 127(34). P. 1-18. DOI: 10.1007/s12040-018-0938-z
15. Audio-magnetotelluric surveys to constrain the origin of a network of narrow synclines in Eocene limestone, Western Desert, Egypt / E.A.Tarabees, B.J.Tewksbury, C.J.Mehrtens, A.Younis // Journal of African Earth Sciences. 2017. Vol. 136. P. 168-175. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.03.001
16. Elokhina S.N. Secondary mineral-forming processes in natural-anthropogenic hydrogeological systems at sulfide deposits. Simulation of the origin of the phase (Fe,Mg)SO₄·7H₂O in the course of sulfide oxidation at the Degtyarka copper sulfide deposit/ S.N.Elokhina, B.N.Ryzhenko // Geochemistry International. 2014. Vol. 52. № 2. P. 162-177. DOI: 10.1134/S0016702914020050
17. Lahti I. AMT survey in the Outokumpu ore Belt, Eastern Finland / I.Lahti, A.Kontinen, V.Nykänen // Exploration Geophysics. 2019. Vol. 50(4). P. 351-363. DOI: 10.1080/08123985.2019.1606200
18. Carlson N.R. Applications of controlled source and natural source audio-frequency magnetotellurics to groundwater exploration / N.R.Carlson, P.M.Paski, S.A.Urquhart // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2005. Society of Exploration Geophysicists, 2005. P. 585-595. DOI: 10.4133/1.2923511
19. Understanding hydrothermal circulation patterns at a low-enthalpy thermal spring using audio-magnetotelluric data: A case study from Ireland / S.Blake, T.Henry, M.R.Muller, A.G.Jones, J.P.Moore, J.Murray, J.Campanyà, J.Vozar, J.Walsh, V.Rath // Journal of Applied Geophysics. 2016. Vol 132. P. 1-16. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.06.007

Автор В.А.Давыдов, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, davude@yandex.ru (Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия).

Статья поступила в редакцию 31.10.2019.

Статья принята к публикации 04.03.2020.