

ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ И КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ ЗОН НАРУШЕНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ В УСЛОВИЯХ СОЛЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В данной статье рассматривается опыт применения электрометрии для получения экспресс-информации о геологических особенностях разреза на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийных солей при аварийной ситуации, сложившейся в осенний период 2006 года.

В задачи комплексных электроразведочных исследований входило выявление и оконтуривание зоны нарушения водозащитной толщи (зоны поступления в шахту рассолов) и осуществление контроля динамики данного процесса.

Учитывая сложные условия для ведения работ (высокий уровень промышленных помех, застроенность территории (рис.1), сравнительно большая глубина расположения объекта исследования (150-200 м)), комплекс использованных методов включал как хорошо известные (метод двухразностного профилирования, метод заряда), так и не традиционные методы, впервые использованные для ведения работ в данных условиях (метод частотного электромагнитного зондирования на основе использования техногенных полей, метод мониторингового контроля изменения электрического сопротивления пород с использованием контролируемого источника и специального программно-измерительного комплекса, изучения поля, генерируемого системой управления безопасностью работ (СУБР)).

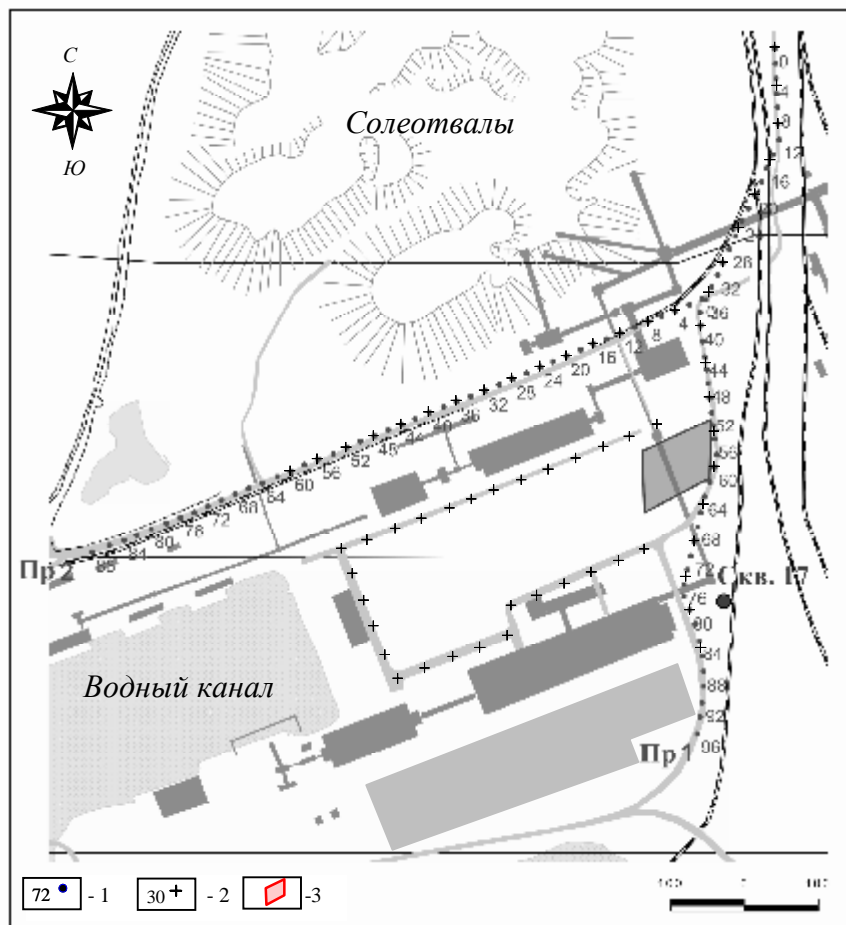


Рис. 1. Схема участка электроразведочных исследований.

1 – пикеты двухразностного профилирования, 2- точки наблюдения методом частотного зондирования на основе использования техногенных полей, 3 – участок мониторинговых наблюдений

На первом этапе с целью оценки возможностей применения электроразведочных методов был выполнен спектральный анализ электромагнитного поля на данном участке. Исследования проводились с помощью аппаратно-измерительного комплекса, разработанного в Горном институте УрО РАН.

Программно-измерительный комплекс сформирован на базе современных цифровых регистрирующих модулей, электрического и магнитного датчиков индукционного типа, ноутбука с программами регистрации и спектрального анализа наблюдаемых полей. Программа регистрации позволяет сохранять сигналы, поступающие с электрического и магнитного датчиков, в различных режимах с привязкой к всеобщему скоординированному времени при помощи GPS.

Амплитудно-частотные характеристики электромагнитного поля в районе исследуемого участка (рис. 2) показали достаточно высокий уровень техногенных электромагнитных полей. На полученной спектрограмме отчетливо выделяются блуждающие токи (рис. 2а), характеризующиеся интенсивными изменениями во времени. Уровень их составляет в среднем ± 2 мВ/м, при максимальных значениях достигающих порядка 20 мВ/м. Основным источником помех является электрифицированная железная дорога, питаемая постоянным током, расположенная в непосредственной близости к исследуемому участку (менее 100 м). На фоне интенсивного проявления блуждающих токов выделяется поле возбуждаемое генератором аппаратуры АНЧ-3 (рис. 2б) и поле промышленных токов с частотой 49.7 Гц и ее гармоник с частотами $f = 24.8$ Гц, 99 Гц, 149 Гц, 199 Гц, 249 Гц, 298 Гц, 447 Гц, 646 Гц (рис. 2в).

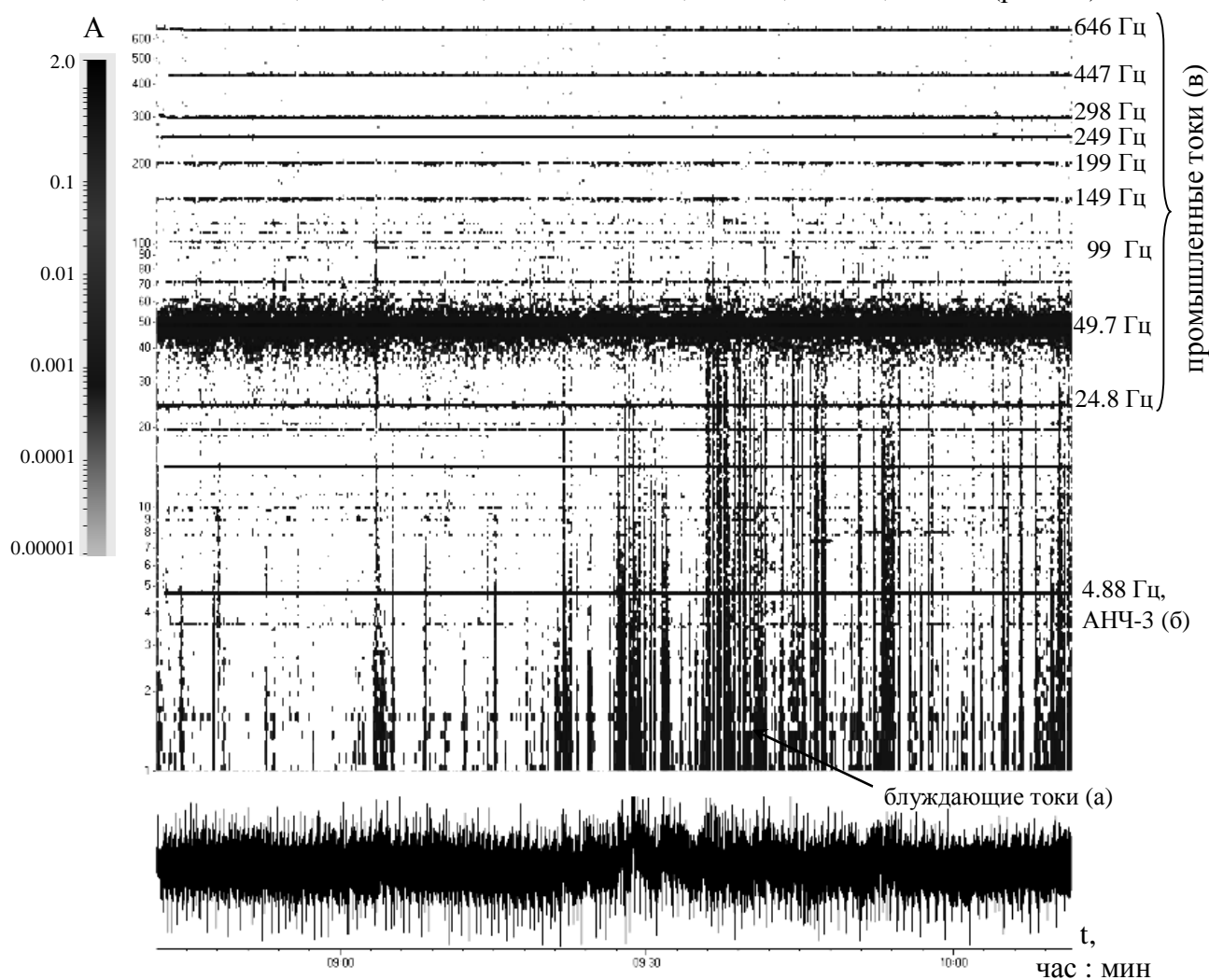


Рис. 2. Изменение амплитудно-частотных характеристик электромагнитных полей с течением времени в пределах исследуемого участка.

С целью изучения физического состояния пород исследуемой части разреза, залегающих в интервале глубин порядка 100-160 метров, было выполнено двухразное профилирование с аппаратурой АНЧ-3. Первоначально планировалось проведение трехразного зондирования толщи пород при разносах питающей линии установки АВ/2 = 250, 450 и 750 м, контролирующей часть разреза примерно от 100 до 200 м (по результатам анализа фондовых материалов на прилегающих участках территории), однако повышенная зашумленность регистрируемого поля показала низкий уровень соотношения сигнал-помеха на максимальном разносе и было решено ограничиться двухразным профилированием.

Полученные разрезы кажущихся электрических сопротивлений по двум отработанным профилям (рис.3) отчетливо фиксируют наличие низкоомной зоны с аномально пониженными для геоэлектрических условий ВКМКС электрическими сопротивлениями, диапазон изменения, которых в пределах аномальной зоны составил от долей единицы до 5-7 Ом·м. Данная зона захватывает центральную часть профиля 1 (пк.40-74) и восточную окраину профиля 2 (пк. 0-16). Природа пониженных сопротивлений в данных геоэлектрических условиях с высокой степенью вероятности связана с наличием разуплотненных пород, насыщенных высокоминерализованными водами [4].

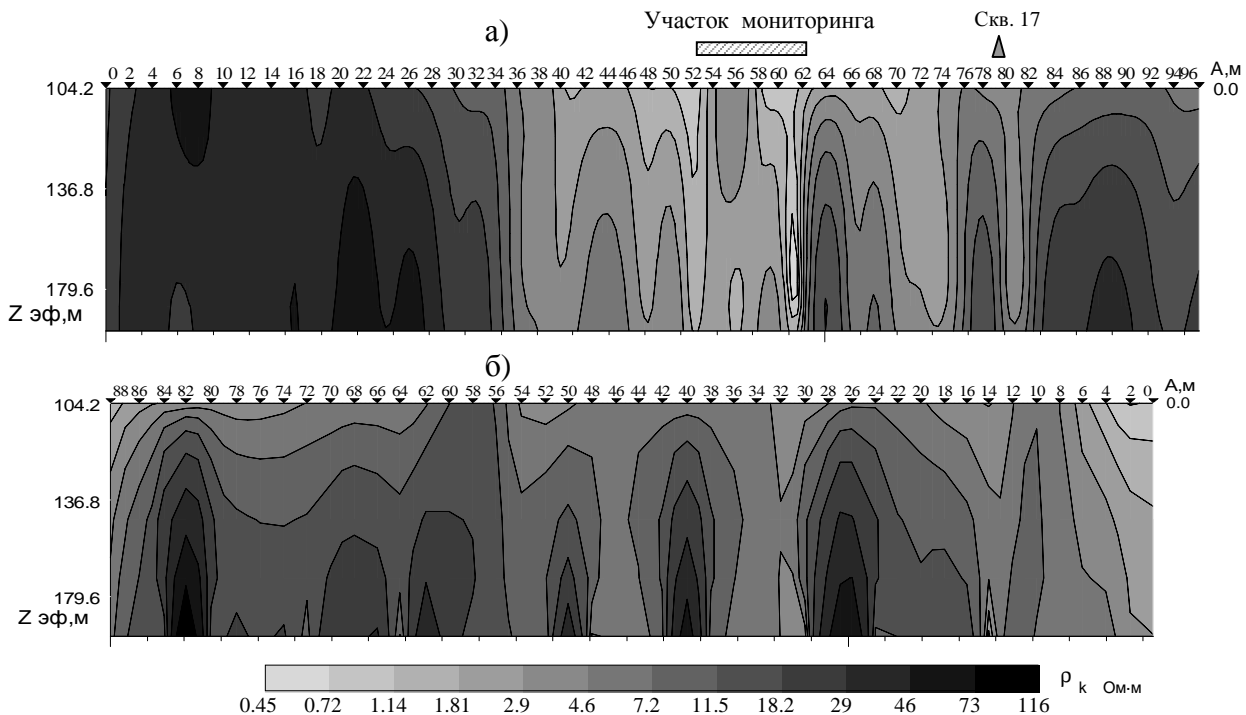


Рис. 3. Разрезы кажущихся сопротивлений по профилям 1(а) и 2 (б).

Для получения качественного представления о пространственном расположении выявленной зоны опробован нетрадиционный подход, основанный на частотном зондировании с использованием техногенных электромагнитных полей.

В основу для проведения таких работ положены общие теоретические представления о поведении квазистационарного монохроматического электромагнитного поля в геологической среде, принцип частотного зондирования [2] и имеющийся небольшой опыт изучения таких полей [1, 7, 8].

Методика полевых наблюдений включала непрерывную регистрацию в цифровом виде шести компонент электромагнитного поля, регистрируемых на каждом из пикетов по трем ортогональным направлениям: $E_x(t)$, $E_y(t)$, $E_z(t)$, $H_x(t)$, $H_y(t)$, $H_z(t)$ с осью OX ориентированной на север. Частота дискретизации сигнала составляла 30 кГц. Наблюдения были выпол-

нены по пяти профилям с шагом 40-50 м. Измерения проводились с помощью вышеописанного программно-измерительного комплекса.

Использование программно-измерительного комплекса, в отличие от ранее созданной предшественниками аппаратуры, работающей на фиксированных частотах, позволило по результатам спектрального анализа электромагнитного поля выделить амплитуды сигналов отвечающих максимальному соотношению сигнал-помеха на семи частотах ($f= 49.7$ Гц, 99 Гц, 149 Гц, 199 Гц, 298 Гц, 447 Гц, 646 Гц).

Один из примеров регистрации сигнала приведен на рис. 4а. Обработка результатов наблюдений включала: расчет и визуализацию амплитудно-частотных характеристик (спектрограмм) за вычетом постоянной составляющей электромагнитного поля для каждой из шести компонент (рис. 4б), определение амплитуд соответствующих промышленной частоте и ее гармоникам.

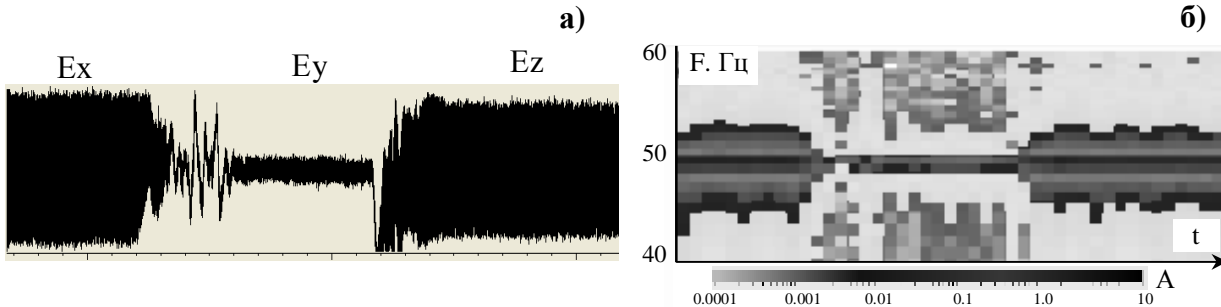


Рис. 4. Пример фрагмента записи компонент напряженности электрического поля E_x , E_y , E_z (а) и рассчитанная по нему спектрограмма в диапазоне промышленной частоты (б).

Анализ полученных материалов показал, что значения компонент поля находятся практически в одном диапазоне. Наибольший диапазон изменения соответствует компонентам электрической составляющей поля. Отмечается закономерное понижение значений в северо-восточном направлении для каждой из зарегистрированных компонент.

Для оценки пространственного изменения свойств среды использовались значения импеданса $Z=E_x/H_y$, характеризующего волновое сопротивление среды. Вместе с тем был выполнен расчет различных относительных характеристик поля с целью изучения их информативных возможностей: $E_{zx}=E_z/E_x$; $E_{zy}=E_z/E_y$; $E_{zr}=E_z/E_r$; $H_{zx}=H_z/H_x$; $H_{zy}=H_z/H_y$; $H_{zr}=H_z/H_r$.

Анализ полученных материалов показал, что на качественном уровне карты относительных параметров электрического и магнитного полей достаточно хорошо сопоставимы с картой импеданса (Z), что указывает на общую природу выделенной аномалии и схожую их информативность, то есть относительно проводящие тела отмечаются пониженными, а плохопроводящие - повышенными значениями.

Величина, характеризующая сопротивление среды рассчитывалась по формуле:

$$r_k = \frac{1}{\omega m_0} |Z|^2, \quad (1)$$

где ω - круговая частота, связанная с периодом T ($T=1/f$) соотношением $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

$m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная постоянная.

При использовании относительных характеристик электромагнитного поля, расчет величин характеризующих сопротивление среды, выполнялся по аналогии с формулой (1).

Оценка эффективной глубины зондирования осуществлялась по формуле:

$$z_{эф} = \sqrt{10^7 \cdot \rho \cdot f^{-1}} / 2\pi, \quad (2)$$

где $z_{эф}$ - эффективная глубина проникновения электромагнитного поля в метрах, ρ - продольное сопротивление исследуемой толщи горных пород, f - частота поля.

Для оценки эффективной глубины зондирования в формуле (1) электрическое сопротивление бралось равным приближенному среднему значению сопротивления, полученного на основе анализа результатов двухразного профилирования на данном участке ($\rho \approx 10$ Ом·м).

Полученные в результате обработки и качественной интерпретации объемные представления поля отображают закономерное повышение сопротивления пород с глубиной. По величине и характеру пространственного поведения интерпретационных параметров анализируемое поле до эффективной глубины зондирования, соответствующей порядка 130 м, характеризует электрические свойства обводненных пород терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толщ, включая рассольный горизонт. Характер поведения области пониженных значений поля при $Z_{эфф} = 130$ м хорошо согласуется с положением аномальной зоны, полученной по результатам двухразного профилирования.

Область повышенных значений поля, отмечаемая в интервале эффективных глубин 160-240 м, характеризует электрические свойства высокоомных соляных отложений водозащитной толщи. В пределах данных глубин отчетливо выделяется зона относительно пониженных сопротивлений, пересекающая исследуемый участок по всем профилям в северо-западном направлении. Эта зона фиксируется на картах как электрических так и магнитных относительных параметров поля (рис. 5а,б). Более отчетливо, как и следовало ожидать, зона проявляется в составляющей поля расположенной вкрест ее простираения. Наибольшая интенсивность и размер этой зоны отмечаются в районе скважины 17.

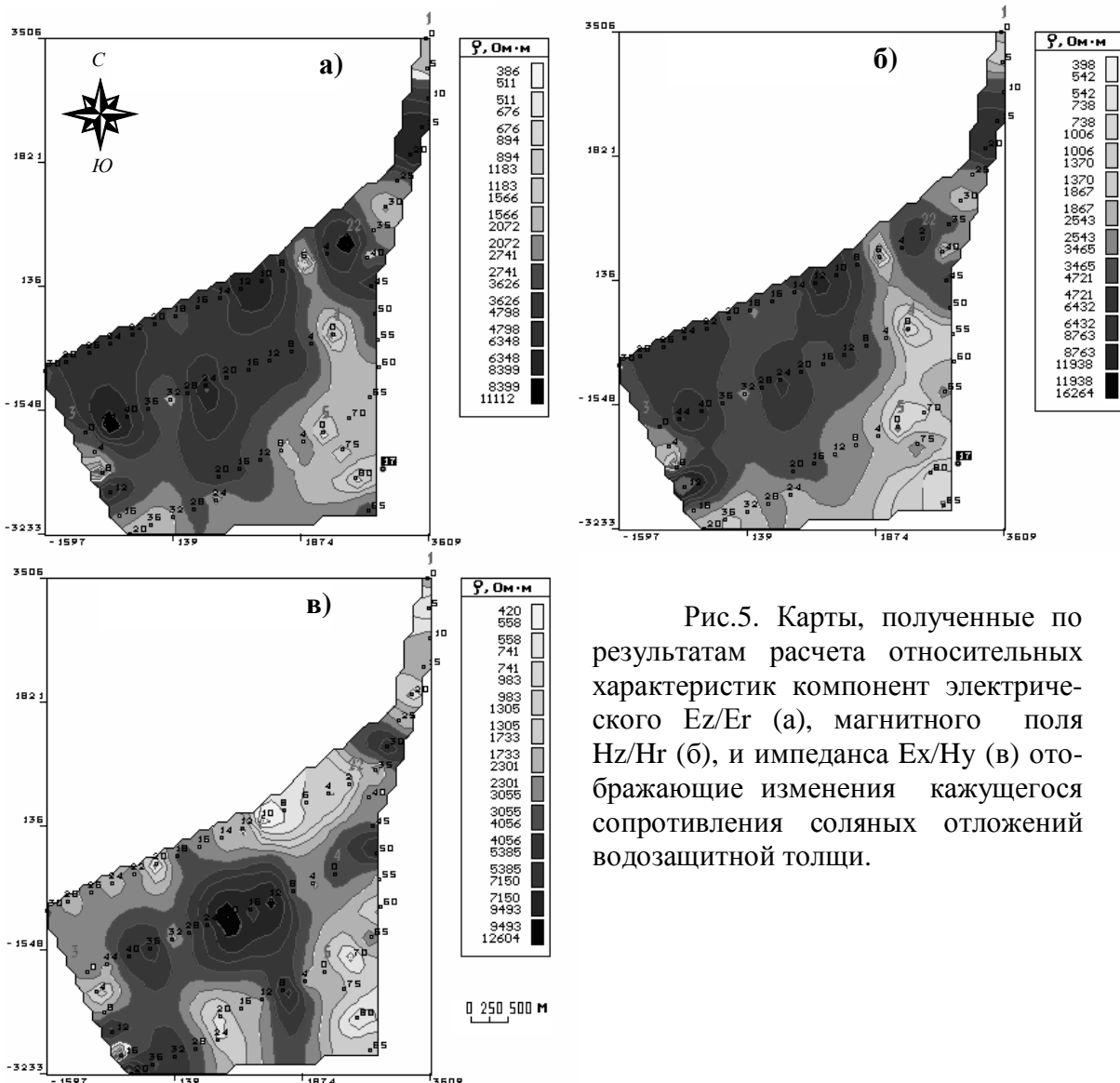


Рис.5. Карты, полученные по результатам расчета относительных характеристик компонент электрического E_z/E_r (а), магнитного поля H_z/H_r (б), и импеданса E_x/H_y (в) отображающие изменения кажущегося сопротивления соляных отложений водозащитной толщи.

Для определения степени опасности выделенной зоны был организован мониторинг электрического сопротивления исследуемой толщи пород, включающий комбинацию методов. В основу проведения мониторинга положен опыт электроразведочных исследований, полученный при изучении геодинамических процессов в районе алтайского сейсмологического полигона [5]. Электрическое поле, контролирующее данную толщу, возбуждалось с помощью стационарного генератора аппаратуры АНЧ-3. Величина тока составляла 0.4 А при частоте 4.88 Гц. Длина питающей линии АВ равнялась 500 м. Регистрация генерируемого поля осуществлялась одновременно на 3-х приемных линиях M_1N_1 , M_2N_2 , M_3N_3 удаленных от федеральной железной дороги соответственно на 40, 80 и 160 м. (рис.6а). Непрерывная запись сигнала проводилась с помощью вышерассмотренного аппаратурно-программного комплекса на частоте дискретизации 1 кГц.

С помощью данного комплекса проводилась поинтервальная регистрации изменения во времени амплитуды поля 4.88 Гц и определялось относительное изменение среднего ее значения, происходившие за суточный интервал времени. Методика обработки полученной информации включала: получение и визуализацию амплитудно-частотных характеристик в заданном интервале частот и времени, выделение участков записи с наименьшим влиянием искажающих сигнал помех, обусловленных наличием блуждающих токов и определение амплитуды полезного сигнала соответствующего частоте 4.88 Гц.

Результаты обработки, отображенные в пространственно-временном представлении (рис. 6б), показывают динамику изменения сопротивлений, в период времени с 24 по 29.10.06 г.

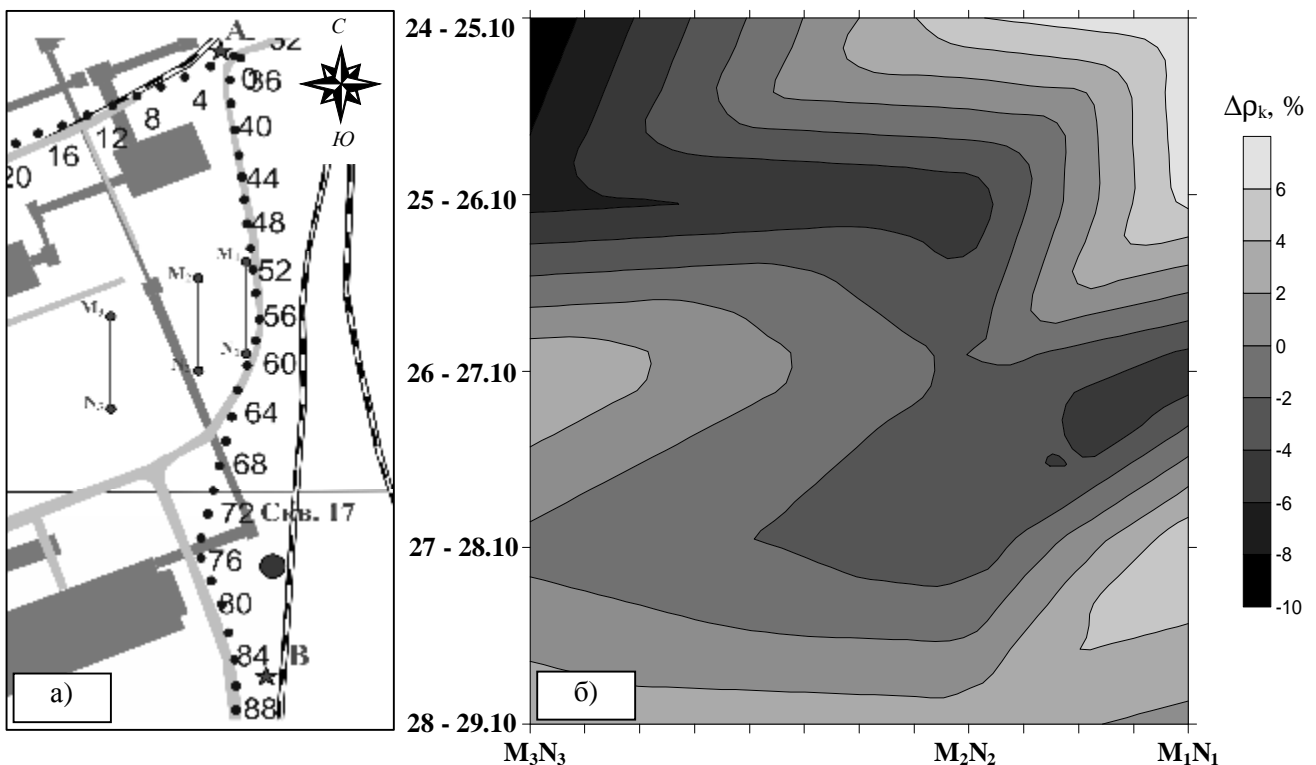


Рис. 6. Схема участка мониторинговых наблюдений (а) и карта относительного изменения сопротивления толщи пород в интервале глубин порядка 100 - 160 м (б).

Исходя из физической природы электрического сопротивления [3], можно предположить, что разгрузка высокоминерализованных вод (обладающих сопротивлением порядка сотых и тысячных долей омметра) в шахту и замещение их пресными водами (сопротивление которых составляет десятки омметров) должно приводить к сравнительно монотонному повышению электрического сопротивления. Вместе с тем, резкое изменение гидрогеологических, геомеханических условий, являющихся следствием размыва пород, может приводить к соответствующим нарушениям геодинамического равновесия и образованию разуп-

лотненных водонасыщенных зон, понижающих электрическое сопротивление пород. По результатам мониторинговых наблюдений отчетливо выделяется зона относительно пониженных сопротивлений, закономерно прослеживаемая в восточном направлении (в сторону федеральной железной дороги).

Помимо отмеченных выше результатов электроразведочных исследований была сделана попытка просвечивания толщи пород от уровня шахтного поля до дневной поверхности на основе использования подземного контура антенны системы СУБР (частота генерируемого поля порядка 1000 Гц).

Основанием для этого послужили экспериментальные оценки поля СУБР, выполненные на СКРУ-2 (2005 г). При мощности генерируемого поля 5 кВт полезный сигнал на земной поверхности превышал фоновый уровень в 3-4 раза при MN равной 40 м (рис. 7).

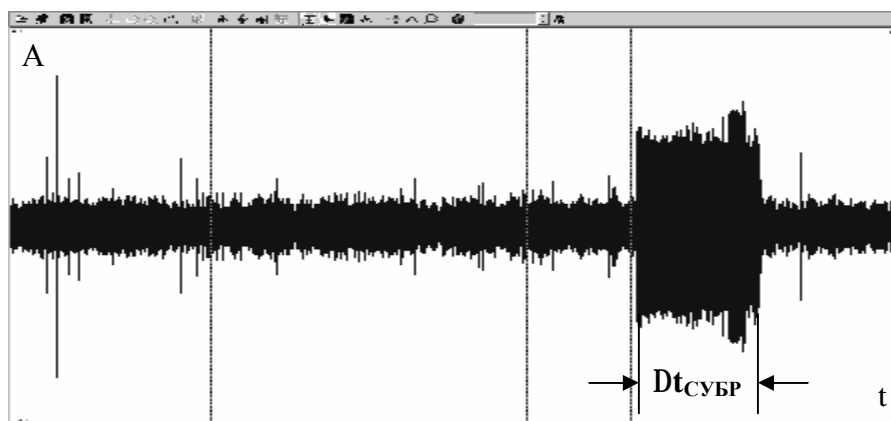


Рис. 7. Фрагмент непрерывной записи напряженности электрического поля.
 $\Delta t_{\text{СУБР}}$ – интервал времени включения системы СУБР.

Для заданного расположения подземного токонесущего кабеля системы СУБР на БКРУ-1, с помощью имеющихся в лаборатории НПЭ теоретических разработок, было вычислено фоновое электромагнитное поле для однородной толщи пород мощностью до 300 м. Однако ввиду малой мощности используемой на БКРУ-1 системы СУБР (около 100 Вт при токе 0.29 А) экспериментальные наблюдения, выполненные при длинах приемной линии от 100 до 500 м на участках площади, отличающихся по геоэлектрическим условиям, не зафиксировала заметного проявления сигнала.

Из традиционных методов электроразведки с целью картирования мест возможного прорыва вод было выполнено опробование метода заряда с заземлением одного из питающих электродов в поступающий в шахту рассол, а другого – удаленного на 2.5 км, с регистрацией сигнала на земной поверхности. В виду неблагоприятных условий заземления максимально достижимый ток генератора составил 0.1 А (вместо предельно возможного 2 А) что оказалось недостаточным для уверенной регистрации сигнала в условиях высокого уровня помех.

Подводя итог выполненных работ можно отметить, что оперативность методик наблюдений и обработки результатов, физико-геологическая содержательность получаемых материалов указывает на перспективность развития направления, связанного с использованием техногенных электромагнитных полей для получения экспресс-информации при выявлении особенностей строения и физического состояния геологической среды.

Список литературы:

1. Бобровников Н. В. Результаты наблюдений вертикальной составляющей электрического поля промышленной частоты // Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований. Свердловск, 1992. С. 78-86.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М., "Недра", 1986.
3. Кобранова В.Н. "Физические свойства горных пород". М: Гостоптехиздат, 1962.

4. Колесников В.П., А.В. Татаркин. Результаты мониторинговых электроразведочных наблюдений на участке обрушения пород Верхнекамского месторождения солей "Проблемы безопасности и совершенствования горных работ". Тез. докл. межд. конф. 11-17 сентября 1999 Пермь, 1999, с.99-101.

5. Колесников В.П., Татаркин А.В. О результатах применения методов электрметрии при изучении зон активной тектоники. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 32-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского, Пермь, 24-29 янв. 2005 г – Пермь: Горный ин-т УрО РАН, 2005. С. 124-125.

6. Колесников В.П., Татаркин А.В. Опыт использования техногенных электромагнитных полей при решении экологических задач в условиях города // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Тез. докл. регион. научн.-практ. конф. Пермь, 2000, с. 295-297.

7. Сараев А.К., Ивочкин В.Г., Пертель М.И., Никифоров А.Б. Возможности электромагнитного профилирования на промышленной частоте 50 Гц при изучении Вуоксинского апатитоносного массива.// Вестник СПб университета. Сер. 7 . [Вестник ЛГУ Сер. 7.] – 1998 - №1 – с.63 – 68.

8. Титлинов В.С. О возможности использования полей гармоник 50-периодного тока промышленных ЛЭП в многочастотной электроразведке. Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований. Екатеринбург, 1992. Изд-во "Наука". Урал. отделение РАН. С. 64-78.