

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ПОИСКА И ГЕОМЕТРИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ СКОПЛЕНИЙ ФЛЮИДОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Проблема негативного воздействия на геологическую среду результатов жизнедеятельности человека в последние годы становится всё более актуальной. Особую сложность вызывают загрязнения в условиях урбанизированных территорий и в районах со сложными геоморфологическими условиями. В районах нефтедобычи проблемы поиска и геометризации техногенных залежей углеводородов и рассолов обусловлена не только экологической опасностью развития данного процесса, но и безвозвратными потерями ценного углеводородного сырья.

Среди методов геофизики при решении экологических задач особое место занимают методы электрометрии. Эти методы весьма недороги, достаточно производительны и обладают широким арсеналом средств исследования геологической среды. Проникая вглубь земных недр электрические и электромагнитные поля (естественные, либо искусственно создаваемые) несут большой объем информации о строении и физическом состоянии слагающих разрез пород. Эффективность их применения при экологических исследованиях определяется как совершенством методов истолкования наблюдаемых полей, так решением ряда специфических задач, в частности, задач определения вещественного состава и степени загрязнения геологической среды.

В данной публикации рассмотрены некоторые результаты исследований по созданию методического и интерпретационного обеспечения для ведения площадных электро-разведочных работ и опыт их применения при решении ряда экологических задач.

Один из примеров связан с изучением водно-физических свойств пород зоны активного водообмена с целью выявления и оконтуривания аномальных участков, связанных с засолением пресных подземных вод в районах длительно и интенсивно разрабатываемых участков нефтяных месторождений.

Комплекс проведенных исследований включал опытно-методические наблюдения по изучению возможности применения ряда гальванических и индукционных методов электрометрии, разработку и создание компьютерных средств интерпретации результатов площадных наблюдений, численные и экспериментальные оценки возможного влияния техногенных объектов, оказывающих влияние на результаты измерений, а также проведение экспериментальных работ с использованием разработанных технологий.

Основной задачей опытно-методических работ являлся выбор оптимального базового метода и методик наблюдений, обеспечивающих необходимую информативность, глубинность и экономическую эффективность работ. Комплекс анализируемых методов включал метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ) и метод, основанный на использовании техногенных электромагнитных полей (МТЭП).

На двух участках нефтяного месторождения были проведены полевые наблюдения отмеченными выше методами. Метод ВЭЗ выполнялся с использованием многоканальной установки. Для контроля и визуализации измеряемых графиков зондирования была использована специально созданная программа "ВЭЗ-ПОЛЕ", позволяющая с помощью Notebook непосредственно в поле визуализировать измеряемые величины, осуществлять расчет кажущихся сопротивлений и на количественном уровне оценивать глубинность исследования при заданном диапазоне разносов питающей линии.

Для измерения процесса становления поля применялась портативная аппаратура ТЕМ-FAST48, оснащена системой автоградуировки и тестирования [11]. Работы проводились установкой "петля в петле". При выборе оптимальных параметров установки и регистрации сигнала измерения были выполнены при трех размерах одновитковой петли

50x50 м·м, 25x25 м·м и 12.5x12.5 м·м максимальное время регистрации бралось равным 512, 1024 и 2048 мкс.

Для выполнения опытных работ методом МТЭП был использован комплекс цифровой аппаратуры СЭР-1. С помощью данной аппаратуры регистрировались спектры трех ортогональных компонент электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в диапазоне от первых единиц до 80 кГц. В результате анализа полученного материала были выбраны частоты 2.44, 50, 150, 625 Гц, обладающие достаточной амплитудой сигнала и соответствующие необходимому диапазону глубин исследования. В качестве интерпретационных при обработке материалов МТЭП использован ряд относительных параметров, представляющих отношение вертикальной и радиальной компонент напряженности магнитного ($H_{отн} = H_z/H_r$) и электрического ($E_{отн} = E_z/E_r$) полей, значения импеданса $Z = E_x/H_y$, характеризующего эффективное сопротивление среды.

Сравнительный анализ полученных разными методами материалов показал, что в целом они достаточно хорошо согласуются между собой. Вместе с тем установлено, что информационные возможности кривых зондирования становлением поля в данных геоэлектрических условиях ограничены как влиянием собственных индуктивных процессов в петле, затрудняющих возможность изучения электрических свойств приповерхностной части разреза до глубин порядка 1/10 стороны измерительной петли и заметным уменьшением соотношения сигнал/помеха, проявляющимся начиная с времени регистрации 1024 мкс. По производительности работы методы ЗСБ и ВЭЗ оказались близки между собой. Наиболее высокой производительностью обладает метод МТЭП, однако ввиду слабого теоретического и методического его обеспечения, он может применяться лишь для предварительной оценки физического состояния среды.

По результатам опытных работ в качестве базового для проведения площадных экологических наблюдений выбран метод ВЭЗ, который в данных геоэлектрических условиях дает возможность получения информации о физическом состоянии геологической среды во всем интервале исследуемых глубин и обладает на данный момент наиболее разработанным и апробированным теоретическим, методическим и программным обеспечением.

С помощью данного метода на исследуемом месторождении был выполнен комплекс работ, включающий полевые наблюдения, первичную обработку полевого материала, анализ параметрических зондирований, качественную и количественную интерпретацию. Обработка и интерпретация полевых материалов выполнялась с помощью автоматизированной системы “Зонд” [1, 3, 10].

В результате компьютерной обработки и интерпретации материалов региональных работ получена геоэлектрическая модель месторождения. Визуальный анализ полученной модели с помощью построения горизонтальных и вертикальных сечений поля кажущихся сопротивлений, геоэлектрических разрезов, карт и объемных отображений поля удельных электрических сопротивлений, позволил выделить площадную зональность электрических свойств и проследить общий характер пространственного распространения засоления в интервале глубин от поверхности до 50 м. Выполненный анализ параметрических зондирований, расположенных вблизи скважин, показал достаточно уверенное отображение в геоэлектрическом разрезе основных геологических пород.

На основе корреляционной зависимости между электрическими и водно-физическими свойствами пород получены карты минерализации по трем основным горизонтам, отождествленным соответственно с “верховодкой” для глубин 0-15 м, четвертичным аллювиальным водоносным горизонтом, приуроченным к гравийно-галечниковым отложениям на глубине 15-30 м и нижележащим верхнепермским (шешминским) водоносным комплексом, залегающим на глубине более 30 м. В результате анализа полученных карт установлено, что минерализация подземных вод приповерхностной части разреза меняется в пределах площади от долей единицы до 10 г/дм³. При этом область со значениями минерализации, превышающими фоновый уровень (1 г/дм³), весьма обширна и

охватывает около 70% всей территории. Для водоносного горизонта, залегающего в интервале глубин порядка 15-30 м, область аномально повышенных значений минерализации заметно локализуется. В пределах ее выделяются две основных аномальных зоны с минерализацией от трех до десяти и более грамм на литр. Интенсивность аномального поля для нижезалегающих верхнепермских аргиллито-песчанниковые отложений несколько повышается (на отдельных участках до 20 г/дм³). Наблюдается унаследованность общей конфигурации отмеченных выше аномальных областей, свидетельствующая о единой природе и источниках соляного загрязнения подземных вод (рис.1).

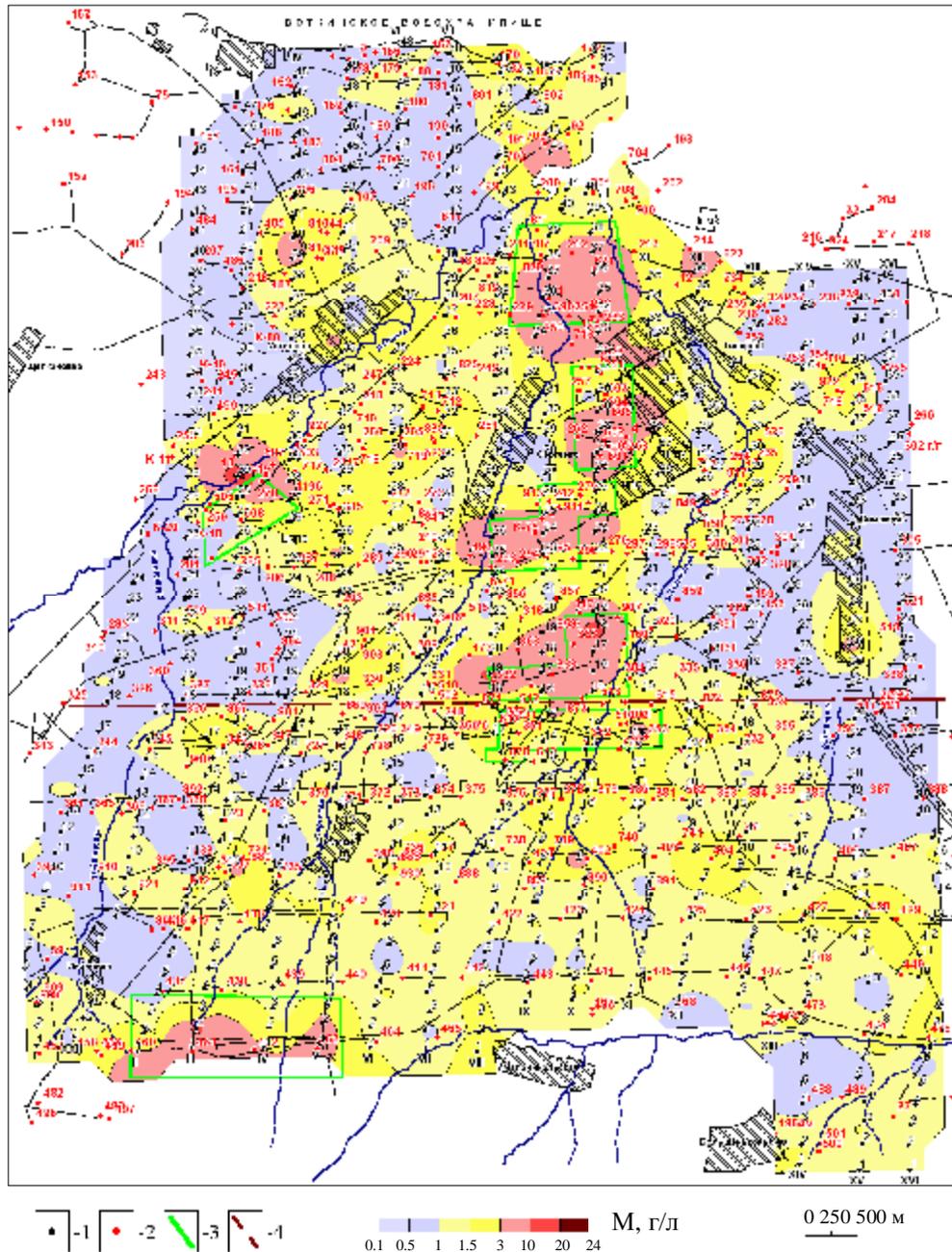


Рис. 1. Сводная карта минерализации подземных вод пород, залегающих в интервале глубин 25-55 м (центральная и южная части Осинского нефтяного месторождения).

1- точки электрического зондирования, 2 - скважины, 3 - детализационные участки, 4 - граница между площадями съемок ВЭЗ 2000 и 2001 гг.

В результате детализационные электроразведочные работы на выделенных участках был изучен геоэлектрический разрез в интервале глубин от поверхности до 100–120 м. Выявлены и оконтурены в плане и по глубине аномальные участки, связанные с хлоридным загрязнением подземных вод, определены места возможной восходящей миграции рассолов (глубинные источники), отмечено местоположение объектов (скважины, насосные станции и др.), являющиеся возможными поверхностными источниками загрязнения пресных вод.

Важное значение при проведении экологических исследований с применением электрометрии в условиях урбанизированных территорий является учет влияния на результаты наблюдений различных техногенных объектов – трубопроводов, скважин, количество которых на нефтегазовых месторождениях может достигать нескольких сотен.

С помощью разработанного аналитического способа [2] была выполнена количественная оценка влияния трубопровода и обсаженной металлической трубой скважины на результаты электрического зондирования.

Основные выводы, полученные по результатам моделирования и экспериментальных работ над трубопроводами, сводятся к следующему: а) аномальное проявление линейного проводящего объекта на разрезе кажущихся сопротивлений отображается в виде узко локализованной аномальной зоны пониженных значений кажущегося сопротивления, имеющей "сквозной" (пронизывающий весь разрез от начальных до конечных разносов питающей линии) характер; б) ширина аномальной зоны несколько увеличивается с глубиной от первых метров (при разносах АВ/2 до 10 м) до первых десятков метров (при разносах АВ/2 до 100 м), величина аномалии при этом уменьшается от 45 %, в центре аномальной зоны, до 7 % на ее окраине; в) величина аномалии существенным образом зависит от состояния антикоррозийного покрытия трубопровода, являющегося по своему составу и свойствам изолятором для электрического тока. При хорошем состоянии антикоррозийного покрытия проявление трубопровода становится слабозаметным в наблюдаемом поле. г) при выборе методики наблюдения для осуществления контроля за влиянием техногенных помех линейного типа (трубопроводы, кабели и др.) наиболее рациональным является расположение измерительных установок вкрест линейного объекта.

Результаты расчетов для случая скважины показали, что при удалении профиля наблюдений от скважины на расстояние более десяти метров максимальное отклонение кажущихся сопротивлений от фоновых значений не превышает 5 %.

Наличие техногенных аномалий приводит к необходимости учета ряда эффектов, в частности, Р-эффекта, обусловленного расположением неоднородности вблизи приемной линии, и С-эффекта - при ее расположении вблизи питающей линии [9]. Для подавления влияния Р-эффекта использована нормализация кривых зондирования. Снижение влияния С-эффекта, трудно поддающегося контролю при рассмотрении одиночных зондирований, осуществлялось в процессе согласованной количественной интерпретации совокупности зондирований.

Другой пример относится к поиску приповерхностных скоплений углеводородов на участках закарстованных территорий нефтяных месторождений. Исследуемый участок к тому же обладал достаточно сложными геоморфологическими условиями. Он был расположен в пределах склона, крутизна которого колеблется в пределах примерно от 35° до 45°, а на отдельных участках превышает 50°. Перепад высотных отметок рельефа местности достигает 45 м. Местность примерно на 85 % покрыта лесом.

Задачами электрометрии являлось изучение строения и физического состояния пород приповерхностной части геологической среды до уровня грунтовых вод в карстовом массиве, залегающих на глубине порядка 50-60 м, где возможны приповерхностные скопления углеводородов.

Полевые наблюдения при поисках углеводородов выполнялись методом вертикального электрического зондирования. С целью повышения однозначности истолкования результатов наблюдений, привлекался метод ВП в частотной его модификации [5].

Получены разрезы, карты и объемные представления наблюдаемого поля, отображающие строение и пространственное изменение электрических свойств среды. Выявлена зона аномально повышенных сопротивлений, в 2-3 раза превышающих фоновые для данного участка значения (рис.2.). Установлено, что аномальность поля заметно повышается с глубиной. Наиболее высокие значения сопротивлений (2000-3300 Ом·м) соответствуют глубине залегания грунтовых вод (40-60 м). Показано, что одной из наиболее вероятных причин аномально повышенных значений сопротивлений в данном интервале глубин является наличие углеводородов, являющихся изолятором для электрического тока. Линейно вытянутый характер аномальной зоны и совпадение ее в плане с входом и выходом реки Туравки из горного карстового массива позволило предположить, что углеводороды концентрируются вдоль русла подземной реки.

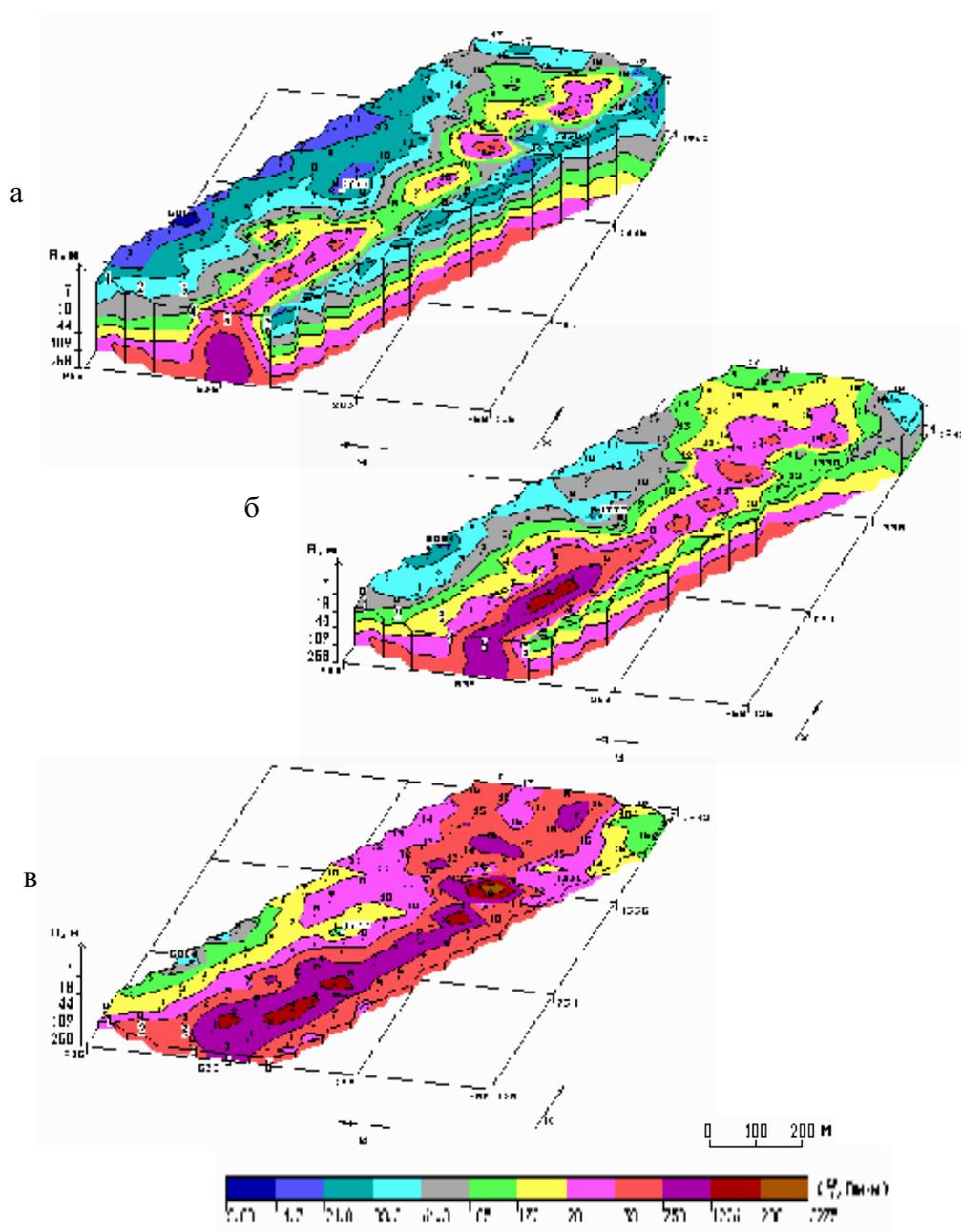


Рис. 2. Горизонтальные сечения поля кажущихся сопротивлений, характеризующие электрические свойства пород на глубинах, соответствующих $AB/2 = 7.2$ (а), $AB/2 = 37$ (б), $AB/2 = 193$ (в).

При обнаружении путей возможного движения подземных вод вблизи выхода реки Тураевки из горного массива электроразведочные работы проводились в два этапа. На первом из них были выполнены площадные наблюдения методом электрического профилирования по сети 20x20 м·м с целью получения общих представлений о характере изменения электрических свойств среды, наличии и степени контрастности имеющихся аномальных зон, их связи с возможными путями водотока, и на основе этого - выбора метода и участка для проведения детализационных наблюдений для прослеживания возможных путей водотока подземных вод. Работы выполнены трехэлектродной измерительной установкой по десяти профилям субширотного направления, проходящим вдоль склона. Разнос установки выбирался в зависимости от предполагаемой глубины исследования и равномерно увеличивался от 10 м для первого профиля, превышающего уровень воды на величину порядка одного метра, до 120 м для шестого профиля, расположенного – вдоль бровки склона на высоте порядка 45-50 м. от его основания.

На втором этапе были проведены детализационные площадные наблюдения по сети 10x10 м·м на участке 140x170 м·м. Учитывая относительно слабо выраженную аномальность, которая бы указывала на возможные пути водотока, особенно в непосредственной близости к участку выхода реки из горного массива, выявленную в результате работ первого этапа, в качестве детализационного был использован нетрадиционный метод, основанный на векторных измерениях поля, расширяющих информационные возможности метода сопротивлений [8].

Питающие электроды заземлялись вблизи русла реки за пределами участка работ на расстоянии, обеспечивающем необходимую глубинность исследования, соответствующую глубине водоносного горизонта относительно поверхности наблюдений. Измерялись две компоненты электрического поля: ΔU_x – вдоль и ΔU_y – поперек линии профиля наблюдений.

Анализ полученных карт интерпретационных параметров (кажущихся сопротивлений, компонент поля по двум ортогональным направлениям, отклонений векторов поля от их нормальных значений) позволил выделить область наиболее вероятного движения подземных вод, закономерно прослеживаемая в пределах основной части участка и совпадающая в плане с выходом реки из горного массива (рис.3). Характер площадного изменения электрических свойств среды позволил предположить о достаточно сложных путях миграции подземных вод, обусловленных наличием обводненной закарстованной области, образующей разветвленную гидросеть с возможным “нырянием” реки на отдельных участках ее движения. Предельная глубина возможного “ныряния” реки, определяемая глубиной залегания сравнительно плотных водонепроницаемых карбонатных пород на прилегающем к исследуемому участку, не должна превышать 13-16 м относительно уровня реки на участке ее выхода на дневную поверхность. Помимо основного выхода подземной реки выявлена дополнительные участки разгрузки подземных вод

Природа выделенных аномальных зон по результатам комплексного анализа объясняется вещественным составом наполнителя трещин и порового пространства выветрелых и сильно трещиноватых гипсов, слагающих исследуемый разрез: заполнение их влагой с повышенной минерализацией, либо глинистым материалом приводит к увеличению проводимости, а в случае заполнения порового пространства углеводородами, являющимися диэлектриком - изолятором для электрического тока, происходит резкое повышение электрических сопротивлений пород [5]. Исходя из этого сделано предположение, что вторая из выделенных зон связана со скоплениями приповерхностных углеводородов в интервале глубин водоносного горизонта, а унаследованность конфигурации аномалии, отмечаемая на вышележащих уровнях, – следствие вертикальной их миграции в разрезе. Линейно вытянутый характер данной зоны и совпадение ее в плане с входом и выходом реки Тураевки из горного массива позволил предположить, что углеводороды концентри-

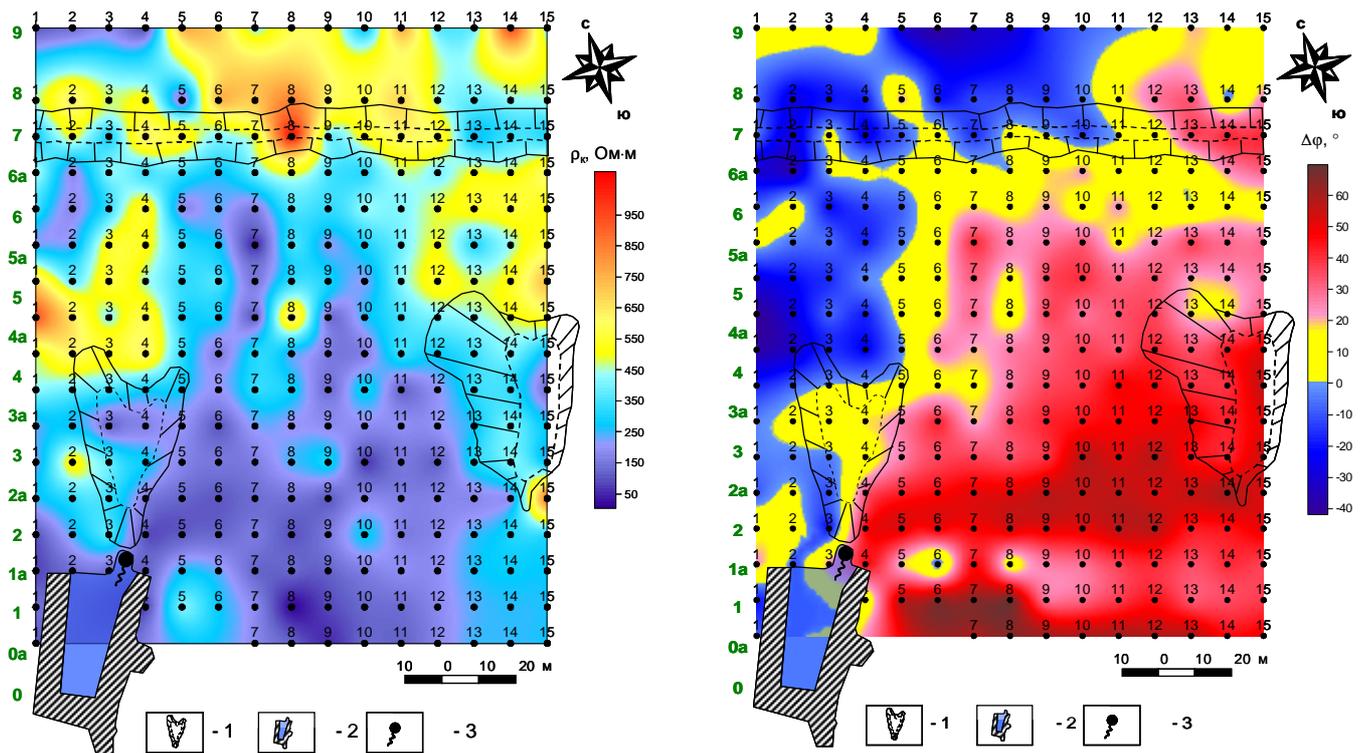


Рис. 3. Карты X-компоненты кажущегося сопротивления (а) и карта отклонений азимутов суммарного вектора напряженности наблюдаемого электрического поля от его значений для однородной среды $\Delta\varphi = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_0$ (б).
 1- лога, карстовые провалы, 2- проектируемые очистные сооружения, 3- выход реки из карстового массива.

руются вдоль русла подземной реки, скрытой горным массивом. Косвенным подтверждением этого является наличие на одном из участков в данном районе вытянутого по ходу течения реки каньенообразного провала длиной порядка 300 м и глубиной до 6-8 м. При данных предположениях, источники загрязнений должны располагаться вверх по течению реки. Конфигурация аномального поля показала возможное наличие двух таких источников. Один из них расположен за пределами северо-восточной окраины исследуемого участка. Об этом свидетельствует наличие хорошо выраженной аномальной зоны, закономерно прослеживаемой в пределах четырех профилей юго-восточной окраины участка в юго-западном направлении в виде шлейфа от расположенного примерно в 60 м. куста нефтяных скважин. Другой, менее выраженный источник, отмечаемый зоной повышенных сопротивлений расположен за пределами юго-восточной окраины исследуемого участка в направлении находящегося вблизи нефтепровода.

При истолковании результатов зондирования, выполненных вблизи склона, учитывалось максимально возможное его влияние на результаты электрического зондирования на основе использования известных асимптотических приближений и распределений плотности тока [5].

Другим важным фактором, влияющим на результаты измерения, являются овраги, пересекающие линию профиля. Их учет был произведен с помощью программы моделирования 3D-Pole. Данная программа позволяет осуществлять расчет поля потенциала, градиента потенциала, кажущегося сопротивления при различном положении питающих и приемных электродов измерительных установок и анализировать пространственное изменение этих величин в трехмерной среде.

В целом, при моделировании конфигурация выделенных аномалий не изменилась,

что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии оврагов.

Третий пример связан с задачей определения мест наиболее вероятного скопления углеводородов на территории нефтеперерабатывающего завода.

Осложняющим фактором проведения электроразведочных работ на данной территории явилось наличие большого числа технических сооружений (трубопроводов, подземных коммуникаций, металлических емкостей и др.) способных оказывать существенное влияние на результаты наблюдений. Для снижения их влияния использованы результаты численного моделирования [2] и экспериментальных работ, проводимых в условиях техногенных помех.

Геологический разрез в исследуемом интервале глубин, составленный по данным бурения расположенных на данной территории скважин представлен породами верхнепермского и четвертичного возраста. Четвертичные отложения включают почвенно-растительный слой и суглинок. Мощность четвертичных отложений 0.2-1.2 м. Залегающие ниже породы представлены в основном суглинками с включениями прослоев песка. Суглинок полутвердый, тугопластичный, начиная с глубины порядка четырех-шести метров – водонасыщенный. Мощность суглинка составляет примерно 13-14 м. Далее в разрезе следуют отложения песка, преимущественно мелкого, реже гравелистого.

Электроразведочные наблюдения проводились методом вертикального электрического зондирования по системе субпараллельных профилей.

Для оценки и учета остаточного уровня техногенных помех были использованы специальные приемы анализа, основанные на разделении нормальной и аномальной составляющих наблюденного поля. В качестве нормальной составляющей в данных геоэлектрических условиях использовано поле, отвечающее квазигоризонтально-слоистой модели среды.

С помощью компьютерных средств обработки и интерпретации полевых материалов получены геоэлектрические разрезы, карты и объемные отображения поля, характеризующие пространственное изменение электрических свойств среды в интервале глубин от поверхности до 20-25 метров (рис.4.) В результате анализа полученных материалов установлено, что геоэлектрическая модель отображает наличие и свойства основных толщ пород: верхней необводненной части разреза, водоносного горизонта, подстилающего его водоупора и второго водоносного горизонта, соответствующего залегающим ниже его песчаным отложениям.. Разрезы и карты электрических сопротивлений отмечают проявление факторов, характерных для участков с повышенным содержанием углеводородов: наличие зон повышенных сопротивлений в верхней необводненной (или слабообводненной) части разреза и сопутствующее им понижение сопротивлений водоносной части разреза. Природа повышенных сопротивлений объясняется наиболее вероятным присутствием в данной части разреза углеводородного продукта, обладающего свойствами диэлектрика, и вертикальной миграцией высокоомных легких углеводородных фракций, заполняющих трещины и поры вышележащих горных пород. Понижение сопротивления водных растворов может быть объяснено результатами деятельности преобразующих нефть бактерий, которые трансформируют часть нефтяной пленки в различные кислоты [6].

По результатам комплексного анализа материалов электрического зондирования получена прогнозная карта повышенного содержания углеводородов в приповерхностной части разреза в интервале глубин 4-7 м. (рис.5.).

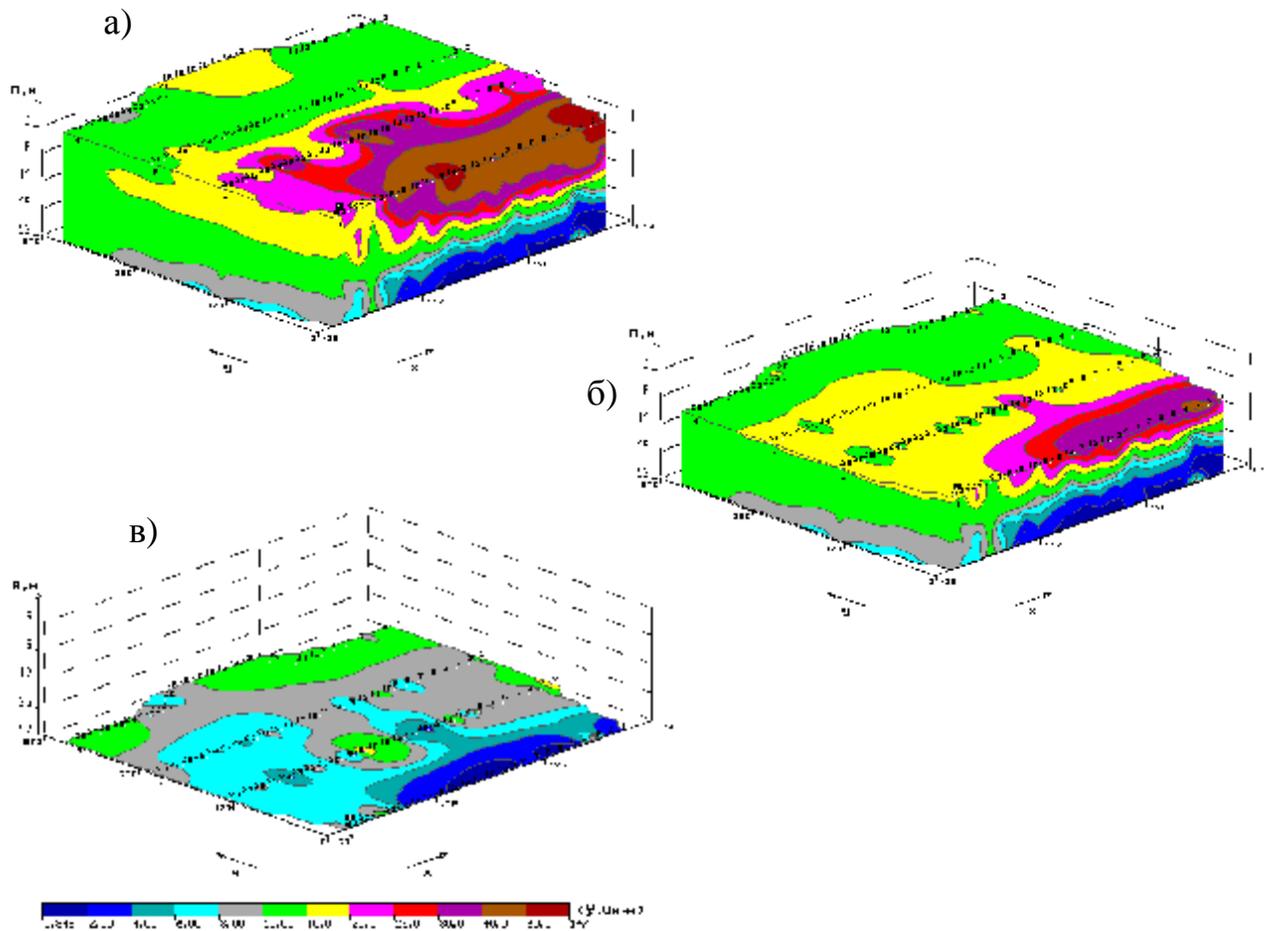


Рис. 4. Аномальные проявления значений поля кажущегося сопротивления на эффективных глубинах соответствующих разносам τ : 2.7 м (а), 7.2 м (б), 52 м (в).

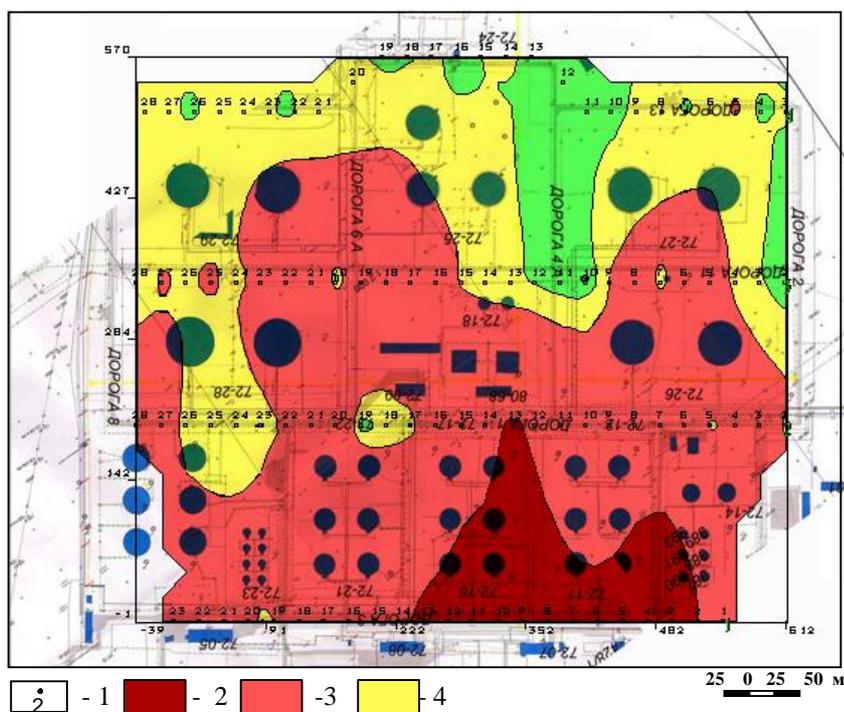


Рис. 5. Области повышенного (2), среднего (3), фоновом (4) содержания углеводов в приповерхностной части разреза (интервал глубин 4-7 м) по результатам электрического зондирования.

1 – точки наблюдений методом ВЭЗ

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников В.П. Обработка и интерпретация результатов вертикального электрического зондирования на ЭВМ. М., "Недра", 1981.
2. Колесников В.П., Кутин В.А., Геник И.В. Математическое моделирование электрических полей при решении задач наземной и подземной электротометрии. "Геофизика и математика" Вторая Всероссийская конференция. Пермь, 2001. Доклад. С.149-158.
3. Колесников В.П. Автоматизированная система интерпретации электрических зондирований: принципы и методы реализации, опыт решения геологических задач. //Вопросы теории и практики комплексной геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Тезисы докл. Международной школы-семинара. Апатиты, 3-8 окт. 2002 г. С.42-43.
4. Матвеев Б.К. Геофизическая разведка карста. //Геология. Вестник Пермского университета. 1994. Вып.3, с. 232-255.
5. Матвеев Б.К. Электроразведка. М., "Недра", 1990.
6. Модин И.Н., Шевнин В.А., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Владов М.Л., Старовойтов А.В. Изучение методами электроразведки локальных загрязнений геологической среды нефтепродуктами. Горная геофизика. 1998. С.301-311.
7. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М. "Недра", 1990, 501 с.
8. Патент на изобретение № 2256198 (РФ) Способ геоэлектроразведки. Бюллетень изобретений № 19, 2005 г., МПК G 01 V 3/08. Колесников В.П.
9. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К.Хмелевского, В.А.Шевнина: Учебн. пособие. - М.: Изд-во МГУ, 1994, 160 с.
10. Электроразведка. - Справочник геофизика. Т.1-2, "Недра", 1990.
11. Ozorovich Y.R., Linkin V.M., Smythe W.D., "Mars electromagnetic sounding - MARSSES", Proceedings of LPI conference, Houston, 1999.

Колесников Владимир Петрович

Горный Институт УрО РАН, зав. лаб. «Наземной и подземной электротометрии», д.т.н., профессор

Костарев Сергей Михайлович

ООО «ПермНИПИнефть», зав.лаб. «Охраны окружающей среды», к.г.-м.н.

Татаркин Алексей Викторович

н.с. лаб. «Наземной и подземной электротометрии», к.т.н.