ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ КАФЕДА ПРИКЛАДНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Mosey

На правах рукописи

Компаниец Софья Викторовна

УЧЕТ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ ЗСБ НА ЮГЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

> Научный руководитель: д. г.-м. н., профессор Н.О. Кожевников

ИРКУТСК 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЮГА СИБИРС	КОЙ
ПЛАТФОРМЫ	
1.1. Геологическое строение осадочного чехла юга Сибирской платформы (краткий очерк)	
1.2. Геофизическая изученность района исследования	
1.3. Геоэлектрическое строение разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным 3	
1.4. Проявления ВПИ на юге Сибирской платформы	
1.5. Выводы	
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗО	
УЧЕТОМ ВПИ	
2.1. Вызванная поляризация горных пород: общие характеристики и модели	
2.1.1. Вызванная поляризация пород.	
2.1.2. Индукционно-вызванная поляризация	
2.1.3. Феноменологические модели вызванной поляризации	
2.2. Синтетические сигналы ЗСБ в зависимости от геометрических параметров установки	
2.2.1. Представление результатов	
2.2.2. Влияние размеров генераторной петли	
2.2.3. Влияние разноса установки и глубины залегания поляризующегося слоя	
2.3. Синтетические сигналы ЗСБ в зависимости от геоэлектрических и поляризационных парам	
модели	
2.3.1. Удельное сопротивление поляризующегося слоя	40
2.3.2. Мощность поляризующегося слоя	41
2.3.3. Поляризуемость	
2.3.4. Время релаксации	
2.3.5. Показатель степени <i>с</i>	44
2.4. Выводы	45
3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЗСБ С УЧЕТОМ ВП	И.47
3.1. Общий подход к интерпретации данных ЗСБ и построению геоэлектрической модели	
3.2. Анализ сигналов ЗСБ на предмет проявления ВПИ	
3.2.1. Многоразносные установки и методика работ	53
3.2.2. Диагностика эффектов вызванной поляризации и магнитной вязкости	54
3.3. Интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ	58
3.4. Об эквивалентности при интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ	63
3.5. Выводы	
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗСБ С УЧЕТОМ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАН	НОЙ
ПОЛЯРИЗАЦИИ	66
4.1. Средне-Окинский участок	66
4.1.1. Геологическое строение участка работ	66
4.1.2. Методика работ	
4.1.3. Районирование площади работ по степени проявленности эффекта ВПИ	67
4.1.4. Результаты инверсии и геологическая интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ	
4.1.5. Прогноз коллекторских свойств	74
4.2. Тымпучикано-Вакунайский участок	
4.2.1. Геологическое строение участка работ	76
4.2.2. Методика работ	
4.2.3. Районирование площади работ по степени проявленности эффекта ВПИ	77
4.2.4. Результаты инверсии и геологическая интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ	79
4.2.5. Прогноз коллекторских свойств	84
4.3. О связи ВПИ с наличием коллекторов в отложениях подсолевого комплекса	
4.4. Выводы	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ТЕКСТОВЫХ СОКРАЩЕНИЙ	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	93

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

В настоящее время экономика России в значительной мере зависит от добычи полезных ископаемых, главным образом, углеводородов, которые являются важнейшим источником энергии и сырьём на экспорт. Геофизические методы играют важную роль в прогнозировании расположения и параметров залежей углеводородов. На основании выявляются физических свойствах горных пород данных о перспективные нефтегазоносном отношении территории, изучается их геолого-тектоническое строение и выполняются оценки запасов. На каждой стадии геологоразведочных работ применяется геофизических способный комплекс методов, решить поставленные геологогеофизические задачи. На стадии поиска и разведки, включая детальное изучение коллекторов, применяется комплекс методов в составе сейсморазведки и электроразведки. По результатам применения удается с необходимой ЭТИХ методов полнотой охарактеризовать строение и свойства поискового объекта.

Эффективным инструментом для изучения толщ, перспективных на обнаружение углеводородов, сейсморазведка. Информация о является структурном строении нефтегазоносной площади необходима для прогнозирования разреза. Этот геофизический метод динамично развивается как в плане технологий производства, так и программных средств. Объемные (трехмерные) изображения перспективных структур, построенные по данным 3D сейсморазведки, давно не являются чем-то необычным, и практически все разрабатываемые месторождения покрыты площадной съемкой. В последние годы нефтяные компании ведут добычу углеводородов с применением сейсмических работ 4Dмониторинга. Однако существуют регионы, где информативность сейсморазведки снижается ввиду особенностей геологического строения осадочного чехла. На юге Сибирской платформы снижение информативности сейсморазведки связано со сложным тектоническим строением, присутствием в разрезе соляных валов, высокоскоростных карбонатных пород, многолетнемерзлых пород и траппового магматизма. Кроме того, почти все залежи углеводородов, приурочены к тектоническим и литологическим ловушкам [Анцифиров и др., 1981; Самсонов и др., 2010]. В таких условиях электроразведка дополняет комплекс геофизических исследований, а иногда является единственным способом изучения строения осадочного чехла. Основным параметром,

изучаемым методами электроразведки, является удельное электрическое сопротивление горных пород. По значениям этого параметра судят о вещественном составе, насыщенности пород флюидами, коллекторских свойствах и др.

В зависимости от решаемых геолого-геофизических задач применяются различные методы изучения УЭС пород. Способом исследования геологического разреза в вертикальном направлении являются электромагнитные зондирования, основанные на измерении электромагнитного поля на поверхности Земли в заданной точке наблюдения при возрастающей глубине проникновения электрического поля [Матвеев, 1990]. Среди методов зондирования наиболее распространенными являются МТЗ, ЗСБ, ВЭЗ.

При нефтегазопоисковых исследованиях на юге Сибирской платформы используется преимущественно метод ЗСБ. С помощью этого метода решаются задачи изучения строения осадочного чехла и поверхности фундамента, выявления коллекторов и оценка их параметров, картирования тектонических нарушений, трапповых интрузий и др.

В последние годы при проведении работ методом ЗСБ стали массово регистрировать сигналы, осложненные влиянием вызванной поляризации. Интерпретация таких сигналов в рамках горизонтально-слоистых проводящих моделей приводит к большим ошибкам при определении УЭС горизонтов осадочного чехла в целевом интервале разреза.

Включение в геоэлектрическую модель параметров ВП позволяет объяснить изменение формы индукционных переходных характеристик и их трансформант (ρ_{τ} , $S_{\tau}(H_{\tau})$), а также получить информацию о поляризуемости горизонтов.

Поляризуемость характеризует способность пород поляризоваться при протекании через них электрического тока и используется при поисках и разведке рудных месторождений, в геокриологии, геоэкологии, гидрогеологии, при поисках нефти и газа, кимберлитовых трубок.

При решении нефтегазопоисковых задач, применение методов, направленных на изучение ВП, базируется на представлении о существовании зон измененных свойств пород (повышенные поляризуемость и УЭС, понижение времени релаксации) над месторождениями углеводородов [Корольков, 1987; Легейдо, 1996; Моисеев, 2002; Агеенков, 2004; Sternberg, 1991; Veeken et al., 2009].

Ряд авторов отмечает высокую эффективность метода ВП при оценке нефтеперспективности площадей при поисках глубокозалегающих залежей углеводородов в условиях Западной Сибири, а также при морских работах [Корольков, 1987; Моисеев,

2002; Veeken et al., 2009]. В некоторых случаях установлено соответствие контуров повышенной поляризуемости и проекции залежей на дневную поверхность, свидетельствующее о вертикальной миграции углеводородов. Измерения проводятся во временном диапазоне от десятков миллисекунд до первых секунд с помощью заземленных линий.

Таким образом, представляются актуальными учет индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) отложений осадочного чехла на юге Сибирской платформы и разработка методических рекомендаций по интерпретации данных ЗСБ на основе модели Cole-Cole при оценке коллекторских свойств.

Цель работы – повышение геологической информативности метода ЗСБ на юге Сибирской платформы и достоверности результатов интерпретации данных за счет учета ВПИ.

Объектом исследований в диссертационной работе являются экспериментальные и модельные индукционные переходные характеристики с проявлением ВПИ, типичные для юга Сибирской платформы.

Задачи исследований

- 1. Выполнить анализ данных ЗСБ, полученных с многоразносными установками на юге Сибирской платформы, на предмет оценки эффектов ВПИ и их районирования.
- 2. Средствами математического моделирования изучить влияние параметров Cole-Cole, мощности слоев осадочного чехла юга Сибирской платформы и геометрии установки на переходные индукционные характеристики.
- 3. Разработать методические рекомендации по интерпретации данных 3СБ с учетом ВПИ.
- 4. На практических примерах проиллюстрировать повышение геологической информативности за счет учета ВПИ при картировании и изучении пластов-коллекторов на юге Сибирской платформы.

Фактический материал, методы исследований и аппаратура

В решении поставленных задач автор опирался на работы Ю.А. Агафонова, В.В. Агеева, Е.В. Агеенкова, Е.Ю. Антонова, Н.Ю. Боброва, И.В. Буддо, Л.Л. Ваньяна, Ю.А. Давыденко, А.К. Захаркина, Ф.М. Каменецкого, В.А. Комарова, В.В. Кормильцева, С.С. Крылова, Н.О. Кожевникова, П.Ю. Легейдо, В.С. Могилатова, В.С. Моисеева, Н.Г.

Полетаевой, А.В. Поспеева, Б.И. Рабиновича, Б.С. Светова, В.А. Сидорова, Вас. В. Стогния, В.В. Тикшаева, К.С. Турицына, Г.М. Тригубовича, В.В. Филатова, М.В. Шарлова, М.И. Эпова, W.H. Pelton, J.M. Reynolds, Р. Weidelt и других исследователей в области наземной геоэлектрики.

В качестве методов исследования использовались: сбор геолого-геофизических материалов, полевые эксперименты, математическое моделирование, инверсия данных ЗСБ. Сбор данных произведен с привлечением материалов АО «ИЭРП» и организаций недропользователей. Полевые цифровой данные получены cприменением телеметрической станции SGS-TEM (разработка ФГУНПГП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск, НПО «Геосистемы», г. Новосибирск) в ходе решение нефтегазопоисковых задач на территории Иркутской области и республики Саха (Якутия). В основу диссертации положены результаты электроразведочных работ методом ЗСБ на более чем 30 площадях и лицензионных участках Восточной Сибири; в получении этих результатов автор принимал непосредственное участие (методический контроль полевых работ, камеральные работы). использованы индукционные переходные характеристики трансформанты на более чем 70 000 зондирований.

Математическое моделирование и инверсия кривых 3СБ с учетом параметров модели Cole-Cole выполнены с помощью программ Model 3 и Model 4 (Л.В. Суров, В.А. Емельянов, А.В. Поспеев, Ю.А. Агафонов). В программах используются алгоритмы решения прямых и обратных задач, разработанные в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, (Е.Ю. Антонов, В.С. Могилатов, М.И. Эпов и др.) и специалистами компании «Зонд-Гео» (А.Е. Каминский и др.).

Защищаемые научные результаты:

- 1. Многоразносные установки позволяют распознавать эффект ВПИ и отличать его от эффектов, создаваемых отклонением среды от горизонтально-слоистой и релаксацией намагниченности (суперпарамагнетизм).
- 2. При изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ проявления индукционно-вызванной поляризации носят массовый характер, и их учет является необходимым этапом интерпретации.
- 3. По данным ЗСБ зоны повышенной поляризуемости связаны преимущественно с верхним этажом геоэлектрического разреза.

Научная новизна работы

Впервые на основе анализа более 70 000 зондирований становлением поля в ближней зоне, проведенных на юге Сибирской платформы, показано, что при использовании многоразносных установок, ВПИ проявляется в более чем 60 % случаев.

С генераторными петлями, применяющимися для решения нефтегазопоисковых задач на юге Сибирской платформы, индукционно-вызванная поляризация значимо проявляется на временах более 20–60 мс.

Средствами математического моделирования детально изучено влияние вызванной поляризации на переходные характеристики. Показано, что наибольшее влияние на сигналы становления оказывает поляризующийся горизонт, расположенный в верхней части разреза (до глубины 300–400 м). Максимальное влияние ВПИ наблюдается при расположении приемной петли в контуре генераторной. Для разнесенных установок увеличение расстояния между источником и приемником приводит к ослаблению эффекта ВПИ, тем большему, чем ближе к поверхности расположен поляризующийся горизонт.

Впервые показано, что проявление индукционно-вызванной поляризации на юге Сибирской платформы связано с породами верхней части разреза, преимущественно с юрскими отложениями.

Личный вклад

- 1. Обработаны и проинтерпретированы данные ЗСБ, полученные АО «ИЭРП» в 2007 2018 гг.
- 2. Выполнена оценка влияния ВПИ на индукционные переходные характеристики.
- 3. Рассчитаны и проанализированы переходные характеристики для типичной геоэлектрической модели разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы с учетом ВПИ.
- 4. Разработаны методические рекомендации для интерпретации массовых данных ЗСБ с учетом ВПИ.
- 5. Проведена инверсия и геологическая интерпретация данных ЗСБ (с учетом ВПИ), полученных на эталонных участках юга Сибирской платформы.

Практическая значимость работы

Исследования по теме диссертации позволили повысить точность результатов интерпретации материалов импульсной индуктивной электроразведки и избежать ошибок геологической интерпретации. Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии данных ЗСБ с учетом ВП, адекватно отображают распределение геоэлектрических характеристик изучаемых объектов. Благодаря этому удалось повысить достоверность решения задачи оценки свойств и параметров горизонтов-коллекторов.

Методика, представленная в диссертационной работе, является неотъемлемой частью графа интерпретации данных ЗСБ и включена в производственный процесс при камеральных работах.

Апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались на конференциях и семинарах различного уровня: на 6-ой международной научнопрактической конференции «Геофизика» (Санкт-Петербург, 2007), на международном научном конгрессе «Гео-Сибирь» (2008, 2011), на первой международной конференции «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем» (Киев, 2009), на ежегодной международной геолого-геофизической конференции и выставке (Санкт-Петербург 2010, 2012), на всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли (Санкт-Петербург, 2011), на ЕАGE Conference & Exhibition incorporating SPE (Barselona, 2010), на международной конференции «Геобайкал» (Иркутск, 2010, 2014), на научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель» (Геленджик, 2017, 2018), на Еlectromagnetic Induction Workshop (Chiang Mai, 2016, Helsingør, 2018), на расширенном семинаре по геоэлектрике Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск, 2019).

По теме диссертации опубликовано более 10 научных работ, из них 1 монография, 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 7 в материалах и тезисах международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объём — 104 страницы, 50 рисунков, 2 таблицы. Библиографический список используемых источников содержит 121 наименование.

Благодарности

За формирование научных взглядов, руководство над диссертационным исследованием автор выражает благодарность научному руководителю профессору Н.О. Кожевникову, за ценные советы, замечания и обсуждение отдельных вопросов и работы в целом – профессору А.В. Поспееву.

За неизменную поддержку в выполнении диссертации автор признателен генеральному директору АО «ИЭРП» к.т.н. Ю.А. Агафонову. Успешному выполнению исследований во многом способствовали доброжелательное отношение и поддержка коллектива АО «ИЭРП». За помощь в работе с геолого-геофизическими материалами автор благодарен Н.В. Багаевой, Л.С. Лукашевой, Н.В. Костроминой, М.А. Баранову, О.В. Токаревой, Е.В. Мурзиной, Е.М. Бугаковой, В.В. Гомульскому.

За воплощение идей по моделированию и интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ в виде компьютерных программ автор благодарен В.С. Емельянову и Р.Г. Гусейнову.

Автор благодарен сотрудникам кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем ИрНИТУ и коллегам из Института нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН за ценные советы, комментарии и обсуждения.

1. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

1.1. Геологическое строение осадочного чехла юга Сибирской платформы (краткий очерк)

Южная часть Сибирской платформы в современной структуре земной коры представляет асимметричную депрессию гетерогенного фундамента, выполненную осадочными образованиями в основном рифейского, вендско-палеозойского и частично мезозойского возрастов. С юго-востока и юго-запада платформа окаймляется горными сооружениями Приморского хребта и Восточного Саяна [Самсонов и др., 2010].

Мощность осадочного чехла изменяется от 1–2 км в антиклинальных структурах и зонах выклинивания в областях горных складок до 5–10 км в районах впадин и прогибов.

В основании осадочного чехла залегают метаморфизованные и кристаллические породы архейского и раннепротерозойского возраста: амфиболитовые сланцы, гранодиориты и гнейсы.

Рифейские образования с угловым несогласием залегают на породах фундамента и вскрыты скважинами на площадях Байкитского мегасвода, на восточном и западном погружении Непско-Чонского мегасвода и восточном борту Присаяно-Енисейской синеклизы. На дневную поверхность отложения рифейского возраста выходят в бортовых частях платформы, в зоне сочленения со складчатыми сооружениями Енисейского кряжа, Саяно-Байкальской горной области. Породы представлены песчаникам и глинистыми сланцами и карбонатными породами [Фомичева, 1984].

Вендские отложения выделяются в двух крупных структурно-фациальных зонах – Прибайкальской и Приленской. В первой прогиб выполнен породами ушаковской свиты – конгломератами, песчаниками, гравелитами, во второй – терригенными породами джербинской свиты.

Верхние венд-нижнекембрийские отложения повсеместно распространены во внутренних районах платформы, нередко залегают с угловым или стратиграфическим несогласием на подстилающих породах. В составе осадков верхнего венда — нижнего кембрия выделяются два структурных комплекса: нижний — подсолевой, охватывающий терригенные, сульфатно-карбонатные и карбонатные породы непской, тирской, собинской, катангской, тэтерской свит и нижнюю часть усольской свиты по осинский горизонт включительно, и верхний — карбонатно-галогенный, к которому относятся усольская,

бельская, булайская, ангарская и литвинцевская свиты. В отложениях венд-кембрия прослежен ряд нефтегазоносных горизонтов, которые приурочены к нижнему терригенному комплексу (ярактинский, парфеновский, верхнечонские и др.), подсолевому карбонатному комплексу (преображенский, усть-кутский, осинский), галогенно-карбонатному комплексу (христофоровский, булайский и т.д.)

Верхний и средний кембрий составляют верхоленская и илгинская свиты, сложенные песчаниками, алевролитами с прослоями мергелей, аргиллитов, доломитов и гипсов.

Ордовикские отложения развиты в центральной части региона, состоят из ряда свит и сложены преимущественно песчаниками, алевролитами, аргиллитами.

Юрские отложения выполняют Иркутский (Черемховский) прогиб и ряд других впадин и со стратиграфическим перерывом залегают на породах верхнего кембрия и ордовика. Отложения представлены конгломератами, переслаиванием песков, алевритов, глин, известняков.

Осадочный чехол юга Сибирской платформы осложнен разновозрастными тектоническими нарушениями. Поскольку перспективы территории юга Сибирской платформы в нефтегазоносном отношении связаны в основном с неструктурными ловушками углеводородов, то разломы играют ведущую роль в контроле залежей углеводородов, тогда как количество антиклинальных структур составляет единицы.

Существенную роль в строении платформенного чехла играют породы трапповой формации раннетриасового возраста, включающая эффузивные и интрузивные траппы, туфогенные образования, кимберлиты, карбонатиты и зоны приконтактово-измененных пород.

Глубоким бурением вскрыты многочисленные пластовые интрузии, начиная от ордовика вблизи дневной поверхности до самых глубоких нижнекембрийских горизонтов. Толщина пластовых интрузий траппов изменяется от 30 до 150 [Анцифиров и др., 1981].

1.2. Геофизическая изученность района исследования

С момента открытия месторождения нефти в нижнекембрийских отложениях на Марковской площади в 1962 г. на юге Сибирской платформы начались планомерные геологоразведочные работы. Вплоть до 1990-х проводились систематические сейсморазведочные, гравиметрические, электроразведочные, геохимические исследования, аэромагнитные съемки различной детальности. Ведущими научными институтами

разрабатывались методы прогноза УВ потенциала применительно к древним платформам, совершенствовались методы геологоразведочных работ применительно к специфическим условиям региона [Кушмар и др., 2006].

На начальных этапах геологоразведочных работ (с 1930 по 1950 гг.) зондирования на постоянном токе (ВЭЗ, ДЭЗ) широко использовались и сыграли важную роль в становлении структурной электроразведки. Однако недостатки, присущие этим методам, ограничили сферу их применения [Рабинович, 1987].

Наличие мощных высокоомных пластов солей, являющихся экраном И необходимость увеличения разноса установки для изучения глубокозалегающих слоев, предопределило использование методов переменного поля, характеризующихся повышенной глубинностью по сравнению с методами постоянного тока [Рабинович, 1987]. Большая часть территории Присаянья, а позже и остальной территории, изучена съемкой теллурических токов, магнитотеллурических зондирований и профилирования – методами, использующими в качестве источника поля естественное переменное электромагнитное поле Земли.

Одним из первых методов, основанных на изучении переменного поля, был метод теллурических токов.

Результатом теллурической съемки является информация об относительной напряженности теллурического поля на площади исследуемого района. Эту информацию использовать при отсутствии данных других методов электроразведки для получения каких-либо сведений о геологическом строении района сложно. Поэтому теллурическая съемка проводилась в комплексе с другими методами электроразведки, причем состав комплекса мог быть различным в зависимости от того, какие методические и геологические задачи решались. По результатам этих работ составлены карты средней напряженности поля ТТ, структурная карта по опорному геоэлектрическому горизонту, отождествляемому с поверхностью кристаллического фундамента. На основании полученных карт было проведено тектоническое районирование. Основные структурные элементы, выделенные по данным метода ТТ, подтвердились материалами последующего бурения [Михалевский, 1986].

Как отмечалось, по данным съемки ТТ невозможно составить представление о стратиграфической принадлежности опорного горизонта, т.е. невозможно судить о том, какая часть геоэлектрического разреза формирует уровень напряженности теллурического поля в районе исследования [Михалевский, 1987].

Региональные работы МТЗ, МТП проводились с 1966 г. Благоприятным фактором для постановки МТП служило неглубокое (2–3 км) залегание опорного геоэлектрического горизонта, отождествляемого с кристаллическим фундаментом. Обработка материалов сводилась к определению эффективного импеданса $Z_{3\varphi}$ и вычислению суммарной проводимости S осадочного чехла. С помощью дополнительной информации о закономерностях изменения среднего продольного сопротивления осадочного чехла карта S преобразовывалась в структурную карту по поверхности кристаллического фундамента. По данным МТЗ изучалось геоэлектрическое строение земной коры и верхней мантии. В результате работ выделены основные структуры региона - Прибайкальский прогиб, Непский свод, Ереминский выступ, Ербогаченское погружение, Ангаро-Ленская моноклиналь и др.

Метод МТЗ, применявшийся на раннем этапе изучения юга Сибирской платформы, использовался для определения природы опорного геоэлектрического горизонта для метода ТТ и определения обобщенных геоэлектрических параметров осадочных отложений. В последствии методы МТЗ и ТТ стали применять для оценки глубинного геоэлектрического разреза. [Поспеева, Поспеев, 1987].

Более чем за 50 лет исследований на юге Сибирской платформы были получены материалы о дифференциации пород земной коры и верхней мантии по сопротивлению.

В конце 60-х возникла задача увеличения детальности электроразведочных работ и в целом повышения геологической эффективности геофизических методов, использование которых было направлено на поиски перспективных в нефтегазовом отношении структур. Проведены первые опытные работы методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), теоретические основы которого к этому времени разрабатывались в научных институтах г. Саратова, Новосибирска [Сидоров, Тикшаев, 1969; Кауфман, Морозова, 1970; Рабинович, 1987].

Наряду с методом ЗСБ, применялся метод ЧЗ. Метод ЧЗ дает информацию об изменении сопротивления среды с глубиной посредством исследования частотных зависимостей компонент электромагнитного поля, создаваемого искусственным источником [Рабинович, 1987].

В 1972 г. по результатам комплексных работ (Чонской электроразведочной партии, Шпак, 1977) методами ТТ, МТЗ, ВЭЗ, ЗСБ, ЧЗ проведено районирование Чоно-Нижнетунгуского междуречья. Выделены Преображенский, Чонский, Ждановский, Верхнечонский, Молчалунский и Даниловский выступы фундамента. Выявлены тектонически ослабленные зоны. По результатам дальнейших исследований составлена структурная схема поверхности кристаллического фундамента в северной части Иркутского амфитеатра, на которой выделены Непский свод, Ереминский выступ и Ербогаченское погружение.

На начальном этапе регистрация в методе 3C проводилась в дальней зоне. Однако, как и в методе ЧЗ, для соблюдения условия дальней зоны необходимо было использовать большие разносы между источником и приемником (до 10 км и более). Если на этих разносах геоэлектрический разрез существенно изменялся, то при интерпретации результатов зондирования неопределенность в выборе точки записи порождала ошибки.

В 1970 г. осуществлен переход на регистрацию в ближней зоне (Восточный геофизический трест). Основным преимуществом становления поля в ближней зоне является возможность выполнения глубинного зондирования при сколь угодно малом разносе. Благодаря этой особенности повысилась детальность исследований, и, что весьма важно в условиях Сибири, появилась возможность работы установками небольшого размера. Первые полевые работы методом ЗСБ на Сибирской платформе в модификации АВ-q (источник – заземленная линия, приемник – горизонтальная петля) были выполнены в 1970 г. по р. Нижняя Тунгуска. Первые опытные и полевые работы с применением установки петля-петля (Qq, Q-q) проведены в 76–79 гг. (Панкратов В.М., Лаврентьева А.Е. и др.). Интерпретация данных проводилась с помощью номограмм и палеток, а в 1987 г. началось использование программных средств. Метод ЗСБ оказался эффективным при решении нефтегазопоисковых и структурных задач. В работах [Рабинович, 1978; Панкратов, 1980; Мандельбаум и др., 1983] показана возможность применения метода ЗСБ для картирования глубокозалегающих водонасыщенных коллекторов в кембрийских и вендских отложениях. Наибольшая эффективность работ методом ЗСБ достигалась в комплексе с сейсморазведочными исследованиями.

За последние два десятилетия методика измерений и аппаратура значительно усовершенствовались. В производство внедрены цифровые телеметрические измерительные системы, позволяющие регистрировать сигналы, в том числе очень низкого

уровня, а применение многоразносных систем наблюдения – получать представление о пространственном распределении ЭДС в окрестностях источника. [Захаркин, 2000; Агафонов, Поспеев, 2001; Агафонов, 2005; Шарлов и др., 2010; Поспеев и др., 2018]. Всё это способствовало повышению качества полевых материалов и, в конечном счёте, геологической информативности метода ЗСБ. Отметим, что вследствие тех же самых причин, при изучении некоторых площадей стали отмечаться «нюансы» переходных характеристик, которые раньше оставались незамеченными [Кожевников и др., 2010, 2012, 2013].

Перечисленные методы, применявшиеся в разное время на юге Сибирской платформы, основаны на изучении удельного электрического сопротивления пород. Изучение же поляризационных свойств пород в рамках производственных работ, направленных на решение нефтегазопоисковых задач, связано в основном с применением методов ЧЗ-ВП и ДНМЭ.

Метод ЧЗ-ВП, основанный на изучении поляризационных параметров пород, с 70-х годов применялся на месторождениях Тимано-Печорской провинции, Узбекистана, Западной Сибири. Измерения проводились по ортогональным профилям от двух питающих линий. По результатам этих работ было установлено, что породы, залегающие над месторождениями углеводородов имеют повышенную поляризуемость [Моисеев, 2002].

В Восточной Сибири работы методом ЧЗ-ВП проведены на ряде площадей (Игнялинская, Криволукская и др.). В методе ЧЗ-ВП в качестве интерпретируемого параметра поляризации использовался только разность фаз ($\phi_{B\Pi}$). Этот параметр давал интегральную оценку поляризуемости всего осадочного чехла. Послойного его определения (не говоря уже о картировании всех параметров поляризации) не проводились, поэтому результаты ЧЗ-ВП имеют дискуссионный характер.

В начале 80-х годов в нефтегазоносных районах как Восточной, так и Западной Сибири началось производственное применение метода ДНМЭ [Легейдо и др., 1996; Мандельбаум и др., 2002]. К настоящему моменту выполнен значительный объем работ этим методом.

Метод ДНМЭ базируется на представлении об эпигенетических изменениях пород над залежами углеводородов, сопровождающихся аномалиями поляризуемости. На основе инверсии дифференциальных параметров формируются геоэлектрические модели,

характеризующие, кроме сопротивления, и поляризуемость пород, слагающих разрез осадочного чехла. Как правило, повышенными значениями поляризации отличаются горизонты, расположенные в верхней части разреза, над первым водоупором [Легейдо и др., 1996].

1.3. Геоэлектрическое строение разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным ЗСБ

С момента начала работ методом ЗСБ на Сибирской платформе представления о геоэлектрической модели совершенствовались вместе с техническими средствами измерений и интерпретации данных. На раннем этапе работ производилось определение суммарной проводимости осадков до кристаллического фундамента по правым асимптотическим ветвям кривых зондирования. Позже стала возможной интерпретация на основе модели с тремя геоэлектрическими комплексами, границы которых задавались по данным сейсморазведки. Это позволило прогнозировать наличие коллекторов в галогенно-карбонатной и подсолевой частях разреза.

Развитие программных средств инверсии данных ЗСБ и повышение точности измерения переходных характеристик позволили реализовать детальную интерпретацию данных. *Типичная геоэлектрическая модель* состоит из 8–15 горизонтов, границы которых, за исключением верхних, закрепляются по данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018].

Особенностью геоэлектрического разреза юга Сибирской платформы является высокое сопротивление (около 100 Ом м) карбонатных пород осадочного чехла и низкие (приблизительно 1 Ом·м) сопротивления коллекторов, насыщенных минерализованными растворами. Глинистые породы в низах осадочного чехла в результате метагенеза литифицированы до ариллитов с потерей значительного количества воды и имеют удельное сопротивление 10-20 Ом·м. Оно возрастает до 40-60 Ом·м с увеличением примеси карбонатного и эвапоритового материала и степени катагенетической преобразований. Таким УЭС характеризуются же песчаники И алевролиты, сцементированные глинистым материалом [Мандельбаум и др., 1983].

В разрезе осадочной толщи юга Сибирской платформы выделяются надсолевой, солевой и подсолевой комплексы, ниже которых расположен кристаллический фундамент. Первый комплекс включает в себя надсолевые отложения среднего-верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также отложения ордовика, перми, карбона, триаса,

юры и четвертичные. Мощность отложений верхней части разреза составляет 0–500 м. Комплекс характеризуется различными УЭС и дифференцируется на геоэлектрические горизонты. Пониженные значения продольного сопротивления горизонтов связаны с присутствием водонасыщенных горизонтов-коллекторов в отложениях юры и верхнего кембрия, а также терригенных пород илгинской и верхоленской свит. Повышенные УЭС верхнего горизонта связаны с наличием в нем ММП и/или трапповых интрузий и др. Согласно данным ЗСБ удельное электрическое сопротивление горизонтов надосолевого комплекса составляет 30–2000 Ом·м (рисунок 1.1)

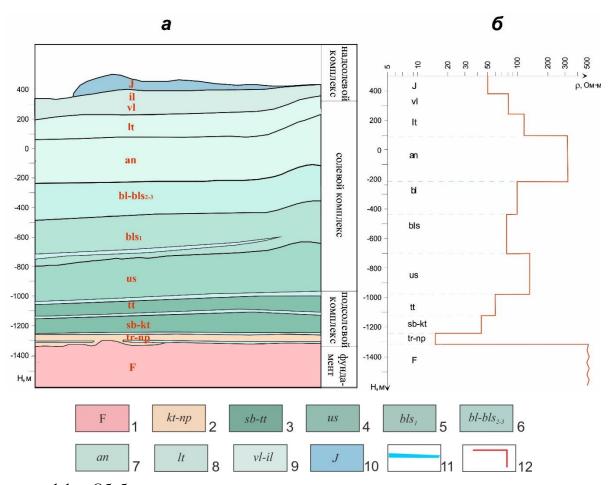


Рисунок 1.1 — Обобщенная геоэлектрическая модель разреза осадочного чехла и поверхности фундамента юга Сибирской платформы: а — сводный геологический разрез осадочного чехла, б — геоэлектрическая модель по данным ЗСБ.

1 - породы фундамента, 2 — тирская, непская свиты, 3 — собинская, катангская, тэтерская свиты, 4 — усольская ствита, 5 - нижнебельсвбельская, 6 — бельско-булайский комплекса, 7 - ангарская, 8 - литвинцевская, 9 - верхоленская, 10 - отложения юры, 11 — горизонты-коллекторы, 12 — график зависимости УЭС от глубины.

Солевой комплекс представлен галогенно-карбонатными породами среднего и нижнего кембрия. Он включает отложения литвинцевской, ангарской, булайской, бельской

и усольской свит. Суммарная мощность комплекса составляет 750–1300 м, удельное сопротивление – 45–500 Ом·м.

Присутствие среди отложений солевого комплекса пластов-коллекторов, насыщенных минерализованными растворами, способствует понижению продольного сопротивления горизонтов.

Карбонатные породы литвинцевской свиты характеризуются повышенными значениями УЭС 70–500 Ом·м, в среднем 150–300 Ом·м. Мощность свиты 100–150 м.

Ангарская свита представлена чередованием сульфатно-карбонатных пород и каменной соли. УЭС пород ангарской свиты составляет 80–400 Ом·м. Если в разрезе свиты есть интрузия траппов в целом УЭС свиты повышается. Мощность ангарской свиты меняется от 130 до 570 м.

Бельско-булайский комплекс представлен карбонатной толщей с УЭС 40–300 Ом·м. Мощность комплекса 450–550 м. При появлении горизонта-коллектора в нижнесреднебельской подсвите, она выделяется в отдельный горизонт и характеризуется пониженным УЭС 50–80 Ом·м.

Отложения усольской свиты, образованные переслаиванием доломитов известняков с пластами солей, характеризуются повышенными значениями УЭС около 150–1500 Ом·м. Мощность усольской свиты составляет 280–420 м.

Отложения подсолевого комплекса представлены карбонатными и терригенными осадками венд-нижнего кембрия. К ним относятся: нижняя часть усольской свиты — осинский горизонт, сульфатно-кабонатные и терригенные отложения тэтэрской, собинской, катангской, тирской и непской свит. Мощность комплекса составляет 250—400 м, удельное сопротивление - пониженное (от 20 до 150 Ом·м). В пределах подсолевого комплекса выделяется до 6 пластов-коллекторов; наличие коллекторов понижает среднее УЭС комплекса.

По данным ГИС и ЗСБ подсолевой комплекс дифференцируется на 2–3 геоэлектрических горизонта с различным УЭС (таблица 1.1). Верхний геоэлектрический горизонт включает карбонатные отложения осинского и усть-кутского стратиграфических горизонтов и по сравнению с нижними горизонтами характеризуется более высоким УЭС (45–150 Ом·м). Средний геоэлектрический горизонт сложен сульфатно-карбонатными породами катангской, собинской, тэтэрской свит и характеризуется УЭС около 40–60 Ом·м. Нижний горизонт объединяет терригенные породы и кору выветривания и

характеризуется УЭС в диапазоне 15–40 Ом·м. В случае отсутствия коллекторов УЭС горизонта составляет 50–120 Ом·м.

Таблица 1.1 – Типичная геоэлектрическая модель разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы.

№ слоя	ρ, Ом·м	<i>h</i> , м	Стратиграфическая принадлежность	Горизонты- коллекторы
1	50	80	юрские отложения, J	
2	80	80	илгинская, верхоленкая свиты, C_3	
3	120	110	литвинцевская свита, $\mathcal{C}_{\textit{1-2}}$	келорский
4	320	385	ангарская свита, \mathcal{C}_1	бильчирский
5	100	285	булайская свита, верхнесреднебельская подсвиты, \mathcal{C}_I	биркинский, атовский
6	80	280	нижнебельская подсвита, C_1	христофоровский
7	150	220	усольская свита, C_I	балыхтинский
8	60	130	усольская, тэтэрская, свиты, \mathcal{C}_I	осинский, усть-кутский
9	45	140	собинская, катангская свиты, C_I	
10	20	95	тирская, катангская нэпская свиты, V- C_I	преображенский, ербогаченский верхнечонский I, II
11	2000	500	архейский фундамент	

В Прибайкалье развиты рифейские терригенно-карбонатные породы, относимые к байкальскому комплексу. Эти породы характеризуются широким диапазоном сопротивления (от 20 до 500 Ом·м).

По данным ЗСБ и МТЗ породы кристаллического фундамента являются основным опорным горизонтом с УЭС 1000–2000 Ом⋅м. В тех местах, где присутствует графит в гнейсах, в тектонически ослабленных зонах, УЭС фундамента снижается до 400–600 Ом⋅м (рисунок 1.2).

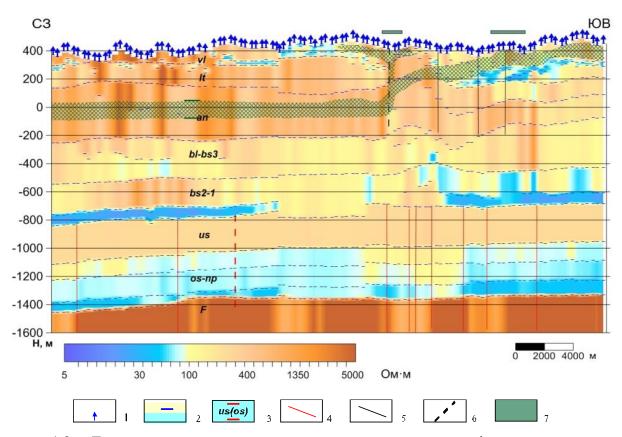


Рисунок 1.2 — Геоэлектрический разрез осадочного чехла и поверхности фундамента в пределах Непского свода по данным ЗСБ (по материалам АО «ИЭРП»):

1 — точки 3СБ, 2 — геоэлектрическое горизонты, 3 — стратиграфическая принадлежность, 4 — тектонические нарушения по данным МОГТ 3D, 5 — тектонические нарушения по данным геологической карты м-ба 1:200000, 6 — линия надвига по данным геологической карты, 7 — трапповая интрузия.

1.4. Проявления ВПИ на юге Сибирской платформы

Начиная с 60-70-х гг. прошлого столетия, в литературе появляются сообщения о регистрации переходных характеристик с заметным нарушением монотонности — вплоть до смены полярности ЭДС [Молчанов и др., 1984; Spies, 1980; Антонов и др., 2011]. Поскольку такие «искажения» наблюдались, в том числе и совмещенными установками, был сделан вывод о том, что причина их появления — индукционно-вызванная электрическая поляризация геологической среды [Вопросы поляризации..., 1985; Flis et al., 1989; Lee, 1981; Weidelt, 1983, Губатенко, Тикшаев, 1979]. В Сибири многочисленные проявления ВПИ отмечены в Западной Якутии при поисках кимберлитовых тел с помощью ЗМПП [Жандалинов, 2011; С.И. Митюхин, 1985; Сидоров, 1985; Стогний, 2008; Стогний, Коротков, 2010; Коzhevnikov, Antonov, 2006, 2012]. В этих работах описываются измерения, направленные на изучение ВЧР — установками зондирования с генераторной петлей 200×100 м и 100×100 м, диапазон регистрации — от первых десятков мкс до десяти мс (рисунок 1.3).

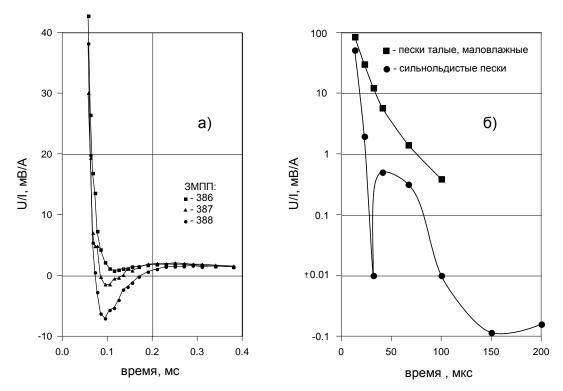


Рисунок 1.3 — Переходные процессы, измеренные в районах развития многолетней мерзлоты: а) Накынское кимберлитовое поле (Западная Якутия), установка 200 м×100 м; б) долина р. Муя (Бурятия), установка 100 м × 100 м [Кожевников, Артеменко, 2004].

Что касается измерений с установками ЗСБ больших размеров (источник нестационарного магнитного поля 500×500 M И больше) c целью решения нефтегазопоисковых задач, то в отчетах 80-х годов упоминается о кривых 3СБ с проявлением ВПИ. В этих случаях правые ветви кривых ЗСБ, полученные соосной установкой, не удавалось проинтерпретировать. Такие зондирования отбраковывались, поскольку в то время не существовало способов интерпретации данных ЗСБ учетом ВПИ. Отметим, что измерения с разнесенными установками, в меньшей степени подверженные ВПИ, выполнялись в ограниченном объеме (по материалам Лаврентьевой, Панкратова, Сазоновой и др.).

В начале 2000-х годов об осложнениях кривых индукционно-вызванной поляризацией сообщалось реже, чем о проявлениях геоэлектрических неоднородностей и суперпарамагнетизма. Поэтому эффекты ВПИ не рассматривались как основание к пересмотру подходов интерпретации [Захаркин, 2000]. Однако анализ данных ЗСБ, полученных к настоящему времени, свидетельствует о необходимости разработки таких подходов.

Напомним, что первые упоминания и дискуссии о проявлениях медленно устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации при измерениях с многоразносными установками содержатся в публикациях [Стогний, 2008; Компаниец, Кожевников, 2010].

По данным якутских геофизиков проявления медленно устанавливающихся процессов вызванной поляризации отмечены на территории Якутии при поисках кимберлитовых тел. На индукционных переходных характеристиках, измеренных соосными установками, уменьшение ЭДС наблюдается с 40 мс. По мнению авторов работы [Стогний, Коротков, 2010], инверсия данных ЗСБ без учета вызванной поляризации приводит к завышению глубины до кровли высокоомного основания (фундамента) в районе соосного зондирования.

В работе Каменецкого и др. [2014] приводятся результаты интерпретации данных 3СБ, полученных в районе кимберлитовой трубки Байтахская в Западной Якутии, с установкой 500×500 м. Отмечается, что без учета ВП происходит смещение аномалии относительно истинного положения кимберлитовой трубки.

О проявлениях ВПИ на юге Сибирской платформы свидетельствуют данные массовых съемок ЗСБ последних лет. Правые ветви кривых кажущегося сопротивления, измеренные соосными и разнесенными установками, систематически расходятся (рисунок 1.4). Как выяснилось, в большинстве случаев кривые для разнесенных установок с выносом приемной петли в разные стороны от генераторной, идентичны. Поэтому отмеченные расхождения не находят объяснения отклонением модели среды от горизонтальнослоистой.

По данным АО «ИЭРП», полученным за 2007–2018 гг. в Восточной Сибири, проявление ВПИ отмечены на участках в пределах Иркутской области: на Ангаро-Ленской ступени (Заславский, Средне-Окинский, Боханский участки и др.), Непско-Ботуобинской антиклизе (Западно-Чонский, Северо-Могдинский, Большетирский, Тымпучиканский, Вакунайский, Игнялинский и др.); на территории республики Саха (Якутия) (Мархачанский, Чаро-Токкинский, Чаяндинское НКГМ и др.).

Таким образом, в настоящее время накоплен большой объем данных ЗСБ, требующих систематизации и разработки методики интерпретации с учетом индукционновызванной поляризации.

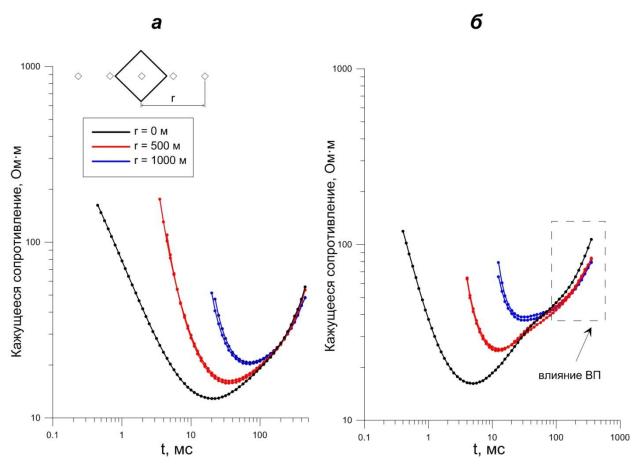


Рисунок 1.4 — Кривые кажущегося удельного сопротивления $\rho_{\tau}(t)$, зарегистрированные на Непском своде: а — влияние ВПИ отсутствует, б — осложненные влиянием ВПИ.

1.5. Выводы

Благодаря внедрению аппаратурно-программных комплексов нового поколения стало возможным измерять сигналы ЗСБ с высокой точностью, в том числе низкого уровня (10⁻¹-10⁻⁵ мкВ), а применение многоразносных систем наблюдения — получать представление о пространственном распределении ЭДС в окрестностях источника. Это способствовало повышению качества полевых материалов, геологической информативности метода ЗСБ и позволило сформировать детальные геоэлектрические модели, характеризующие особенности геологического строения осадочного чехла юга Сибирской платформы.

Вместе с тем, вследствие тех же самых причин, при изучении многих площадей все чаще стали проявляться эффекты ВПИ, которые раньше оставались незамеченными, либо не учитывались при интерпретации данных ЗСБ.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗСБ С УЧЕТОМ ВПИ

Проявление ВПИ в данных ЗСБ вызывает необходимость учитывать ее влияние в геоэлектрических моделях, но на данный момент не сформировано общее представление о том, как поляризационные параметры влияют на сигналы, регистрируемые на юге Сибирской платформы.

С целью обоснования возможности изучения ВПИ методом ЗСБ и выявления особенностей проявления эффекта на сигналах становления выполнено математическое моделирование. Для типичной геоэлектрической модели осадочного чехла юга Сибирской платформы рассчитаны переходные характеристики в зависимости от параметров геоэлектрического разреза, а также от геометрических размеров зондирующей установки и других факторов.

Перед изложением результатов моделирования приведено описание основных физических процессов, с которыми может быть связано возникновение ВПИ, поляризационная характеристика пород по различным данным, а также кратко изложена физика ВПИ при использовании незаземленной генераторной петли.

2.1. Вызванная поляризация горных пород: общие характеристики и модели

Согласно определению «вызванная поляризация — общее название для разнообразных электрокинетических и электрохимических процессов в горных породах, вызываемых приложенным электрическим полем. Она выражается в способности горных пород пространственно разделять заряды разных знаков в процессе пропускания через них электрического тока, а после его выключения «разряжаться» (восстанавливать электронейтральность среды, создавая спадающий во времени ток)» [Светов, 2008].

По механизму разделения зарядов выделяют два принципиально разных процесса, происходящих в горных породах и приводящих к появлению ВП: электрохимические (электродная поляризация) и электрокинетические процессы. Первые возникают при контакте сред с электронной и ионной проводимостью, а вторые развиваются при контакте ионопроводящей жидкости с твердой фазой независимо от ее типа проводимости [Добрынин и др., 2004; Матвеев, 1990; Светов, 2008; Pelton et al., 1978; Reynolds, 1997].

К электрокинетическим процессам также относится мембранная поляризация, возникающая по двум причинам: первая - сужение порового канала и другая - соединение

внутри поровых каналов с присутствующей глиной, например в загрязненном песке (рисунок 2.1) [Pelton et al., 1978].

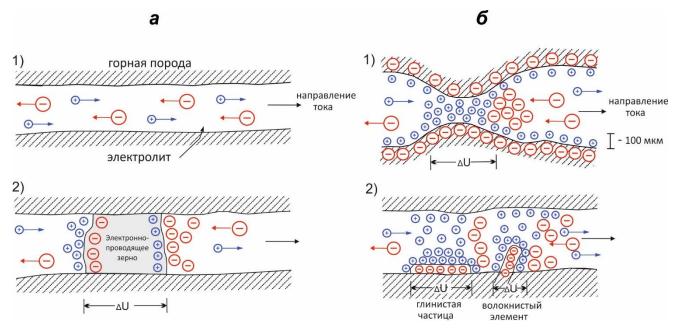


Рисунок 2.1 — Механизмы образования поляризации: а - электродная поляризация: 1 - свободный электролитический поток в открытом канале; 2 - поляризация электронно-проводящих зерен, блокирование канала; б - развитие мембранной поляризации, связанной с (1) сужением канала между минеральными зернам, и (2) отрицательно заряженными глинистыми частицами и волокнистыми элементами вдоль стенок каналов [Reynolds, 1997].

Общие представления о поляризации горных пород сводятся к понимаю закономерностей того, что она зависит от вещественного состава твердой фазы, пористости, проницаемости и структур поровых каналов, а также от влажности, минерализации внутрипоровой влаги и других факторов [Комаров, 1982; Матвеев, 1990; Pelton et al., 1978; Reynolds, 1997].

По проявлению поляризуемости во временном диапазоне сигнала становления выявлены две основные группы процессов – быстрые и медленные (рисунок 2.2). Для первых значение колеблется от первых десятков до первых сотен мкс, для вторых – превышает десятки миллисекунд [Стогний, 2010].

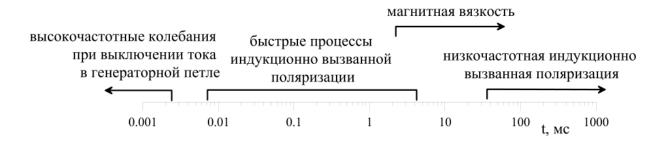


Рисунок 2.2 — Временные диапазоны действия осложняющих факторов на процесс становления [Стогний, 2010].

Если порода сложена электронопроводящими минералами низкого сопротивления (сульфиды, графит и др.), то величина поляризуемости может достигать 0.1–0.5 и слабо зависит от минерального состава. Вкрапленность электронопроводящих минералов служит важнейшим фактором влияющим на поляризуемость горных пород. При вкрапленности, занимающей 1–2 % объема породы, поляризуемость может существенно превысить уровень, характерный для сплошных руд.

Поляризуемость пород определяется как объемным содержанием электронопроводящих минералов, так и площадью раздела между электронными и ионными проводниками, на которой происходят электрохимические реакции.

Кроме того, вызванную поляризацию порождают только те электронопроводящие включения, которые контактируют со сквозными микропорами, заполненными влагой и служащими проводниками электрического поля. Акцессорные сульфиды, графит и магнетит, входящие в состав кристалла, участие в процессе поляризации не принимают [Добрынин и др., 2004].

Для ионопроводящих пород формирование вызванной поляризуемости происходит только в многофазных средах, где существует контакт электролита с твёрдыми изоляторами или проводниками. Физико-химические процессы достаточно хорошо изучены. Под влиянием протекающего в среде гальванического или индукционновызванного тока в среде возбуждаются процессы окисления-восстановления, сдвига ионного равновесия. При наличии мембранных сред под воздействием внешнего тока могут создаваться потенциалы, вызванные разным диаметром анионов и катионов и, как следствие этого, разной скоростью их диффузии. При исчезновении источника тока среда возвращается в исходное состояние, генерируя соответствующие сигналы ВП. Для поляризующихся сред ионного характера величина η может составлять первые проценты [Комаров, 1982; Вахромеев и др., 1997].

Что касается процессов быстропротекающей ВП, то причины её формирования до конца не выяснены. По характеру это явление похоже на разряд и заряд конденсаторов, обкладками которых являются границы фаз электролит — диэлектрик или электролит — проводник. Однако, как диэлектрическая релаксация льда, так и эффект Максвелла-Вагнера удовлетворительно объясняют временные характеристики переходных процессов, но не объясняют аномальных значений диэлектрической проницаемости. Н.О. Кожевниковым показано, что результаты инверсии экспериментальных данных дают

значения диэлектрической проницаемости, на несколько порядков большие, чем следует из расчётов проведенных исходя из вышеотмеченных гипотез [Кожевников, 2012].

2.1.1. Вызванная поляризация пород

Информации о поляризационных характеристиках пород, слагающих осадочный чехол Сибирской платформы мало, поэтому обратимся к работам общего характера, где этот вопрос рассматривался.

Существует три способа изучить поляризуемость – петрофизические (лабораторные) измерения, скважинные и наземные. Характеристика ВП горных пород дается в терминах модели Cole-Cole.

Часто при оценке возможной поляризуемости пород прибегают к известному труду по изучению поляризационных свойств пород В.А. Комарова [Комаров, 1982]. На рисунке 2.3 представлена информация о поляризуемости различных пород и руд. Видно, что породы различного литологического состава обладают одинаковыми пределами изменения поляризуемости. ВП осадочных пород меняется от 0.1 до 3.5 % при $t_3 = 2$ мин и t = 0.5 с.



Рисунок 2.3 — Сводная диаграмма поляризуемости горных пород и руд по результатам изучения образцов и параметрическим измерениям [Комаров, 1980].

Сульфидные руды: 1 — сплошные, 2 — вкрапленные; горные породы: 3 — с вкрапленностью графита, 4 — с вкрапленностью сульфидов, 5 — без заметной вкрапленности электронных минералов. Трапеции — гистограммы поляризуемости различных руд и пород.

В статье [Pelton et al, 1978] опубликованы результаты физического моделирования, проведенного с целью исследования влияния концентрации и размеров зерен сульфидов в породах на поляризационные характеристики. Так увеличение концентрации сульфидов породе приводит к увеличению поляризуемости, а увеличение размеров зерен – к увеличению времени релаксации процесса (рисунок 2.4).

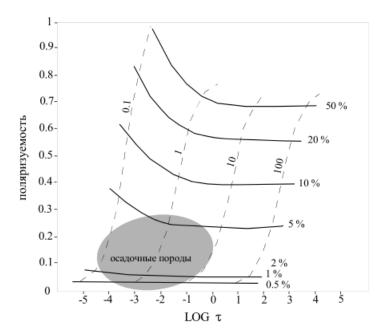


Рисунок 2.4 — Диаграмма зависимости поляризуемости искусственной породы, содержащей сульфиды, от размера зерна сульфидов (мм) и объемной концентрации сульфидов (%) [Pelton et al., 1978]. Измерения гальванической установкой были выполнены на искусственной породе, состоящей из цемента, кварцевого песка и пирита.

Представленные выше данные относятся к измерениям в лабораторных условиях. Объектами изучения этих работ являлись медленно устанавливающиеся процессы вызванной поляризации электрохимической природы.

Среди петрофизических измерений, проведенных на образцах пород, слагающих разрез юга Сибирской платформе, известны измерения на керне, взятом из колонковых скважин на Гаженской площади в районе битумного месторождения [Моисеев, 2002]. В результате установлена корреляция между поляризуемостью и содержанием двухвалентной серы (S^2) , т.е. мелкодисперсного пирита. При этом повышенная поляризуемость не связана с какой-либо разновидностью горных пород (песчаники, аргиллиты или доломиты), а зависит от наличия в них сульфидов (рисунок 2.5).

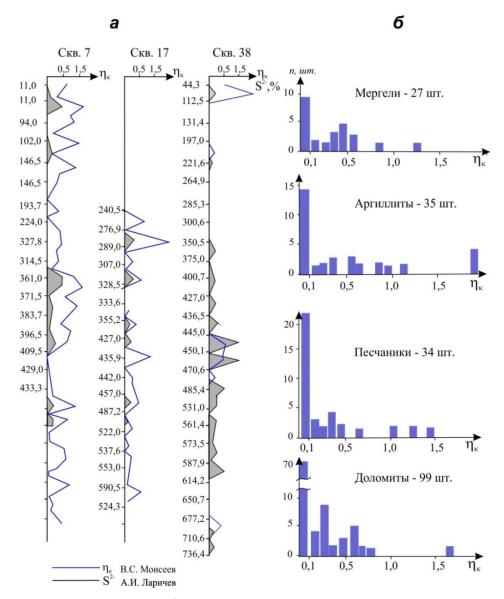


Рисунок 2.5 — Результаты петрофизических измерений образцов горных пород из скважин Гаженской площади [Моисеев, 2002]: а — корреляция поляризуемости η_{κ} и содержания S^{2} , б — гистограммы распределения поляризуемости.

Основным источником информации о поляризационных характеристиках пород, полученных наземными методами на юге Сибирской платформы, служат результаты съемок методом ДНМЭ.

В монографии [Легейдо и др., 1996] представлены геоэлектрические модели для Верхнечонского месторождения. В семислойной модели повышенной поляризуемостью обладает первый слой, связанный с отложениями ордовика, юры и верхнего кембрия (верхоленской свиты); значения поляризуемости составляют 0.025–0.15, времени релаксации 0.6–0.62 с, 0.56. Второй слой, ассоциируемый с галогенно-карбонатными отложениями литвинцевской и ангарской свит, обладает аномальными значениями 0.64, которые изменяются от 0.015–0.045 до 0.12–0.155, 0.025–0.036, 0.05

В этой же работе представлены результаты измерений ВП на образцах керна, которые свидетельствуют о том, что наибольшей поляризуемостью обладают долериты и скарны. Повышенной поляризуемостью также обладают глинистые породы и аргиллиты, что, по мнению авторов, связано с большей концентрацией зерен пирита и повышенной емкостью ионного обмена глинистых пород.

В 2012 г. АО «ИЭРП» были проведены работы ДНМЭ на Игнялинском ЛУ. По результатам инверсии поляризуются три верхних горизонта: первые два относятся к верхоленской свите, третий - к литвинцевской свите. *Первый горизонт* характеризуется незначительной изменчивостью параметров: поляризуемость составляет 0.01–0.06, в отдельных точках достигает 0.04–0.08, время релаксации составляет 0.1 с, параметр c = 0.5. *Второй горизонт* характеризуется поляризуемостью 0.005–0.05, τ изменяются от 0.02–0.44 с, c = 0.45–0.5. *В третьем горизонте* η изменяется от 0.003 до 0.065, время релаксации 0.01–0.5 с, c = 0.4–0.65.

Относительно измерений с индукционными установками больших размеров на юге Сибирской платформы, информативной является публикация [Стогний, Коротков, 2010], в которой описаны результаты инверсии сигналов продолжительностью до 1 с, осложненных процессами ВПИ. Результатом интерпретации является пятислойная геоэлектрическая модель разреза общей мощностью 3000 м, где повышенной поляризуемостью характеризуются первые два слоя. УЭС первого слоя составляет 55–123 Ом·м, поляризуемость — 0.008–0.06, постоянная времени $\tau = 0.3$ с, параметр частотной зависимости — 0.5. УЭС второго слоя 1550–2550 Ом·м, поляризуемость — 0.51–0.59, постоянная времени $\tau = 0.3$ с, параметр частотной зависимости — 0.5.

Также проанализированы результаты интерпретации данных 3СБ, полученные в последние годы АО «ИЭРП» на различных участках Восточной Сибири. Значения поляризуемости изменяются от 0.01 до 0.13, время релаксации 0.01–0.3 с, параметр c=0.2–0.9. При этом поляризующийся слой расположен в интервале верхней части разреза от 0 до 400 м.

На рисунке 2.6 представлены гистограммы распределения параметров η , τ и c по трем участкам. Наиболее часто встречающиеся значения присваивались горизонту в геоэлектрической модели при математическом моделировании.

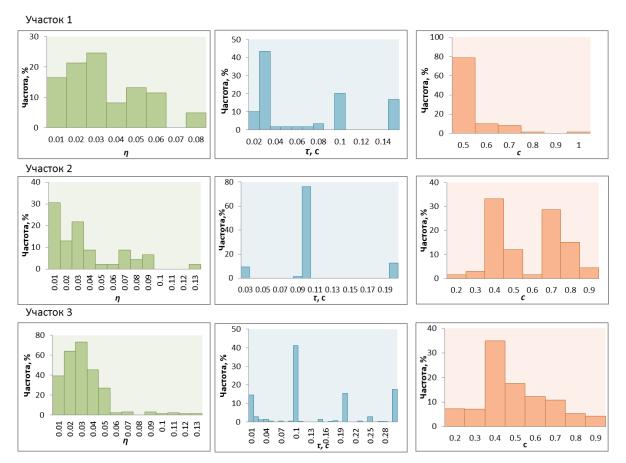


Рисунок 2.6 – Гистограммы распределения параметров модели Cole-Cole по результатам интерпретации данных ЗСБ на различных участках юга Сибирской платформы (по материалам АО «ИЭРП»).

2.1.2. Индукционно-вызванная поляризация

Вызванная поляризация в той или иной мере сказывается на результатах любых электроразведочных методов – 3СБ, ЧЗ, МТЗ и др. Так, в методе 3СБ кривые становления существенно осложняются под влиянием ВП, в этом случае говорят об индукционновызванной поляризации [Светов, 2008].

Физическая природа и проявления ВПИ при геофизических исследованиях изучаются многими исследователями последние 30–40 лет.

Интерес к этому явлению определяется следующим:

- широким распространением явления в различных геологических средах;
- существенным влиянием на результаты практически всех электромагнитных исследований;
- положительным опытом использования ВП в классических исследованиях на постоянном токе для рудных месторождений;
- перспективой использования параметров ВП для изучения таких важных свойств как проницаемость, насыщение пород-коллекторов.

Индукционный способ возбуждения и измерения процессов ВП, несмотря на очевидные технологические преимущества, считается заведомо менее эффективным по сравнению с гальваническим. В масштабе времени, в котором протекают медленные процессы ВП, первичное вихревое электрическое поле, создаваемое при выключении установившегося тока в генераторной петле, воздействует на среду в течение короткого времени. За это время среда поляризуется незначительно. Если поляризуемость устанавливается медленно, скорость затухания токов ВП и создаваемого ими магнитного поля мала. Поэтому, в соответствии с законом Фарадея, магнитное поле этих токов индуцирует в приемной петле ЭДС низкого уровня [Кожевников, Антонов, 2009, 2012].

Подробно процесс возникновения ВПИ описан в [Smith et al., 1988; Flis et al, 1989; Кожевников, Антонов, 2009, 2012].

Процесс возникновения ВПИ представлен на рисунке 2.7. Незаземленная петля 1, по которой протекает ток, расположена на поверхности среды с проводимостью σ_0 . В момент выключения тока в петле первичное поле B_1 мгновенно убывает до нуля. Изменение B_1 вызывает возникновение в среде вихревых токов, создающих вторичное поле B_2 , которое на ранних временах не отличается от магнитного поля, существовавшего в среде до выключения тока. Пусть в пределах элемента 2 среды плотность токов составляет $j_{\text{вихр}}$. Эти токи представляют собой свободные заряды 3, перемещающиеся под действием вихревого электрического поля $E_{\text{вихр}}$, которое контролируется удельной электропроводностью σ_0 :

$$\boldsymbol{E}_{\text{вихр}} = \boldsymbol{j}_{\text{вихр}} / \sigma_0 \tag{1.1}$$

Предположим, что включение 4 в элементе среды 2 содержит связанные заряды, т.е. среда способна поляризоваться. Если поляризуемость невелика, распределение вихревых токов и, соответственно, $E_{\text{вихр}}$, по-прежнему контролируется распределением электропроводности σ_0 . В этом случае можно принять, что $E_{\text{вихр}}$ является воздействием, а поляризация включений со связанными зарядами — откликом на него.

Под действием $E_{\text{вихр}}$ в области 4, где имеются связанные заряды, возникает ток поляризации $I_{\text{пол}}$, или ток смещения, пропорциональный скорости изменения $E_{\text{вихр}}$. Токи поляризации, также как и вихревые, создают магнитное поле, которое вносит вклад в суммарную переходную характеристику.

На ранних временах поляризационные токи имеют одинаковое направление с вихревыми токами (рисунок 2.7 б). Процесс поляризации прекращается в момент времени,

когда дальнейшее разделение связанных зарядов больше не возможно и $I_{\text{пол}}$ =0 (рисунок 2.7 в).

После того, как вследствие тепловых потерь интенсивность вихревых токов уменьшилась на много порядков, внешнее воздействие на связанные заряды исчезает (рисунок 2.7 г), и они возвращаются к равновесному распределению, т.е. возникает ток поляризации, протекающий противоположно по направлению к исходному (см. рисунок 2.7 б). На этой стадии вторичное магнитное поле имеет отрицательную полярность.

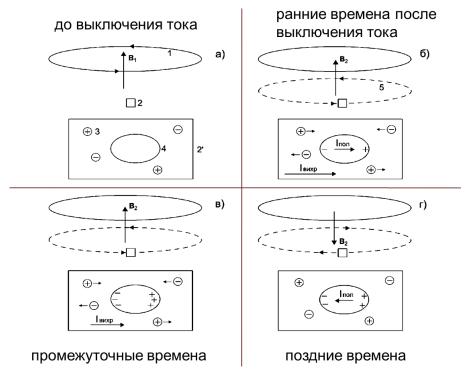


Рисунок 2.7 — Индукционно-вызванная поляризация в массиве горных пород [Кожевников, 2009]: а — до выключения тока в генераторной петле свободные и связанные заряды распределены равномерно, токи в земле отсутствуют; б — при выключении и в течение некоторого времени после выключения тока в петле, как свободные, так и связанные заряды перемещаются, образуя ток, протекающий в положительном направлении; в — в некоторый момент времени разделение связанных зарядов прекращается, ток поляризации равен нулю; г — на поздних временах вихревое электрическое поле мало настолько, что уже не может поддерживать разделение связанных зарядов, которые, возвращаясь в состояние равновесия, создают поляризационный ток, направленный в отрицательном направлении. 1 — генераторная петля; 2 — элемент среды; 2′ - тот же элемент, показанный в более крупном масштабе; 3 — свободный заряд; 4 — поляризующееся включение; 5 — токовая линия. В₁ — первичное поле; В₂ — вторичное поле; І_{вихр} — вихревой ток; І_{пол} — ток поляризации.

«Включения» со связанными зарядами могут представлять собой различные объекты: электронопроводящие минеральные зерна в ионопроводящих породах или системы заполненных электролитом пор различных размеров, или электрические двойные слои на стенках пор и вокруг глинистых частиц, включениями льда и т.п.

2.1.3. Феноменологические модели вызванной поляризации

Поляризуемость широко используется при решении задач рудной и нефтяной геологии. Впервые она была отмечена в рудных районах, где наблюдается затягивание спада сигнала при выключении питающего тока в линии. В дальнейшем были обнаружены различные виды вызванной поляризации, возникновение которых связано с электрохимическими и электрокинетическими процессами.

Первоначально для изучения ВП использовались установки зондирования и профилирования на постоянном токе. При этом, помимо измерения разности потенциалов ΔU в приемном диполе при включённом токе в источнике, производилось измерение величины $\Delta U_{B\Pi}$ через некоторое время после выключения (0.5–1 c). Далее определялась кажущаяся поляризуемость, как отношение:

$$\eta_k = \frac{\Delta U_{\rm B\Pi}}{\Delta U} \cdot 100 \% \tag{1.2}$$

Интерпретация кривых зондирования ВП η_{κ} =f(AB/2) производится аналогично кривым кажущегося сопротивления [Хмелевской, 1984].

С появлением нестационарных электромагнитных зондирований эффекты вызванной поляризации также дали знать о себе. Особенно это касается установок с гальваническим возбуждением электромагнитного поля. Было ясно, что сигналы вызванной поляризации накладываются на индукционные.

В практике известны различные модели описания процессов ВП [Комаров, 1982; Жданов, 2012], но наиболее популярной является модель релаксации Cole-Cole, определяющая зависимость сопротивления или проводимости среды в частотной области от поляризуемости, времени релаксации и ширины релаксационного спектра. Для комплексного удельного сопротивления и проводимости она имеет вид:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right], \tag{1.3}$$

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left[\frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c} \right], \tag{1.4}$$

где i — мнимая единица, ω — круговая частота, σ_0 — удельная электропроводность на постоянном токе, ρ_0 — удельное УЭС на постоянном токе, η — поляризуемость, c — показатель степени, τ — время релаксации. Диапазон возможных значений η от нуля до единицы, τ — от нуля до бесконечности, параметр c от нуля до единицы.

Параметр τ имеет размерность времени и характеризует затухание процесса поляризации. В какой-то мере отражает структурно-текстурные особенности пород [Pelton, 1978, Reynolds, 1997]. Известно, что время релаксации вызванной поляризации может изменяться в широких пределах [Антонов, 2011].

Показатель степени *с* менее существенен с точки зрения диагностики и идентификации разных источников вызванной поляризации, так как оно, главным образом, характеризует распределение частиц. Актуальность анализа параметра возрастает при необходимости классификации различных источников ВП с перекрывающимися диапазонами времен релаксации, исследовании размеров частиц, их распределений в исследуемом поляризующемся объекте, либо исследованиях концентрации вкрапленников во вмещающей среде [Антонов, 2011].

Большинство математических алгоритмов инверсии данных ЗСБ основано на зависимости Cole-Cole. При этом при решении прямой и обратной задач отклик среды рассчитывают сначала в частотной области, а затем преобразуют его во временную область [Могилатов, Злобинский, 1995, 2007; Антонов и др., 2010; Каменецкий и др., 2014; Oldenburg, Li, 1994]. Для исследований в данной работе также применялись алгоритмы на основе формулы Cole-Cole.

2.2. Синтетические сигналы ЗСБ в зависимости от геометрических параметров установки

Различная зависимость ЭДС переходного процесса от неполяризующейся среды и ЭДС за счет эффекта ВПИ от размеров приемно-генераторной установки показана для совмещенной установки, что позволяет, за счет изменения ее размеров, усилить или ослабить влияние ВП. При проведении в одной точке многоразмерных зондирований удается, в какой-то мере, разделить переходный процесс на индукционный и поляризационный [Сидоров, Яхин, 1985, Каменецкий и др., 1984, 2014].

Подавление ВПИ наблюдается также с удалением приемного датчика от центра генераторного контура [Жандалинов, 2011; Стогний, 2010]. Данные выводы сделаны для установок МПП при исследовании верхней части разреза.

При решении нефтегазопоисковых задач на юге Сибирской платформы методом 3СБ для возбуждения переходных процессов используется квадратная генераторная петля со стороной 500–600 м, что обеспечивает изучение разреза осадочного чехла до глубин 3–5 км. Разносы, на которых расположены приемные петли составляют от 0 до 1000 м. Под

разносом в данной работе подразумевается расстояние от центра генераторной петли до центра приемной.

В разделе представлены результаты расчетов переходных характеристик в зависимости от размера генераторной петли, разносов зондирования и глубины залегания поляризующегося горизонта. Кривые ЗСБ рассчитаны для типичной геоэлектрической модели.

Типичная модель осадочного чехла и поверхности фундамента, принятая для расчетов, включает 11 геоэлектрических горизонтов (таблица 1.1). Целевые объекты поиска располагаются в подсолевом комплексе, на глубине более 1000 м, поэтому важно понимать насколько сильно могут быть осложнены сигналы ЗСБ под влиянием ВП. Данная глубина соответствует поздним временам зондирования, более 50 мс — максимальному проявлению ВПИ на кривых становления.

Для решения прямой задачи использовалась программа Model 4 (Поспеев А.В., Емельянов В.С., 2018), в алгоритмах которой для учета параметров ВП используется формула Cole-Cole.

2.2.1. Представление результатов

Результаты расчетов переходных характеристик представляют собой большой массив данных, для представления которого использован способ, предложенный в [Артеменко, 2003; Кожевников, 2009].

Для анализа и обобщения результатов моделирования переходных характеристик в зависимости от разноса, глубины залегания поляризующегося объекта, параметров геоэлектрической модели применялись так называемые нормированные переходные характеристики. Нормированная переходная характеристика Y(t) отражает относительный вклад ВПИ в суммарный сигнал становления и рассчитывается как отношение ЭДС $\Delta U_{B\Pi}$ для поляризующейся модели к ЭДС ΔU для неполяризующейся (референтной) модели: $Y(t) = \Delta U_{B\Pi}(t)/\Delta U(t)$. Референтная модель идентична поляризующейся за исключением того, что поляризуемость всех ее слоев равна нулю. Очевидно, чем больше отношение $\Delta U_{B\Pi}(t)/\Delta U(t)$ отличается от единицы, тем сильнее выражен эффект ВПИ на времени t.

Используя такую форму представления, рассмотрим влияние геометрии установки зондирования и параметров геоэлектрической модели.

2.2.2. Влияние размеров генераторной петли

Для оценки влияния размеров генераторной петли на индукционные переходные характеристики рассчитаны сигналы становления при различных размерах источника электромагнитного поля (рисунок 2.8).

Математическое моделирование переходных характеристик проводилось на основе модели с закреплением всех ее параметров. При этом было принято, что поляризующимся был первый слой с параметрами $\rho = 50~{\rm Om}\cdot{\rm m}$, $h = 80~{\rm m}$, $\eta = 0.03$, $\tau = 0.1~{\rm c}$, c = 0.4.

Сигналы становления рассчитаны в диапазоне времен от 0.1 до 500 мс – длина записи сигналов становления, в большинстве случаев применяемая при нефтегазопоисковых работах на юге Сибирской платформы.

Расчет выполнен для соосной установки. Размер стороны генераторной петли изменялся от 100 м до 1100 с шагом 200 м. Кривые ЗСБ представлены на рисунке 2.8.

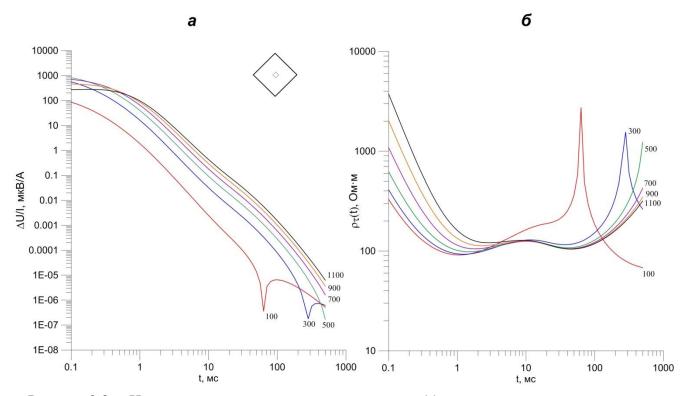


Рисунок 2.8 — Индукционные переходные характеристики (а) и кривые кажущегося удельного сопротивления (б), рассчитанные для генераторных петель размером от 100 м до 1100 м (шифр кривой — размер стороны генераторной петли).

Согласно рисунку 2.8 при использовании генераторных петель размером со стороной квадрата 100–300 м влияние ВП на кривых $\rho_{\tau}(t)$ проявляется на временах более 3 мс, присутствует переход через ноль. При использовании генераторной петли 500×500 м влияние ВПИ начинает проявляться на временах более 40 мс, значения $\rho_{\tau}(t)$ завышаются.

При размере генераторной петли более 700×700 м влияние проявляется в меньшей степени в данном временном диапазоне.

Таким образом, при увеличении размеров источника поля влияние ВПИ сдвигается в сторону поздних времен.

2.2.3. Влияние разноса установки и глубины залегания поляризующегося слоя

На рисунке 2.9 проиллюстрированы результаты математического моделирования переходных характеристик при различных значениях разноса, на котором располагается приемная петля, и различном положении поляризующегося слоя в разрезе.

Сигналы становления рассчитаны для установки с генераторной петлей размером 500×500 м с пятью разносами: 0, 250, 500, 750 и 1000 м. Сначала были рассчитаны переходные характеристики модели с неполяризующимися слоями, которая в дальнейшем использовалась В качестве референтной. Затем были рассчитаны переходные характеристики для моделей, в которых один из слоев (первый, третий, пятый, восьмой) был поляризующимся. Горизонты находятся на различной глубине и обладают одинаковым сопротивлением 40 Ом·м. Расчеты были выполнены для $\tau = 0.1$ с, c = 0.4 двух значений поляризуемости η (0.03 и 0.1). Согласно статистике результатов инверсии данных 3CБ на различных участках юга Сибирской платформы такие параметры модели Cole-Cole являются наиболее часто встречающимися.

На графиках (по оси ординат отложено отношение $Y(t) = \Delta U_{B\Pi}(t)/\Delta U(t)$, по оси абсцисс – разнос) показано, как значения нормированной переходной характеристики на времени t=0.4 с изменяются в зависимости от разноса и глубины залегания поляризующегося слоя. Выбор временной задержки при построении графиков основывается на том, что, начиная с t=0.4 с, вклад ВПИ в результирующую переходную характеристику становится преобладающим.

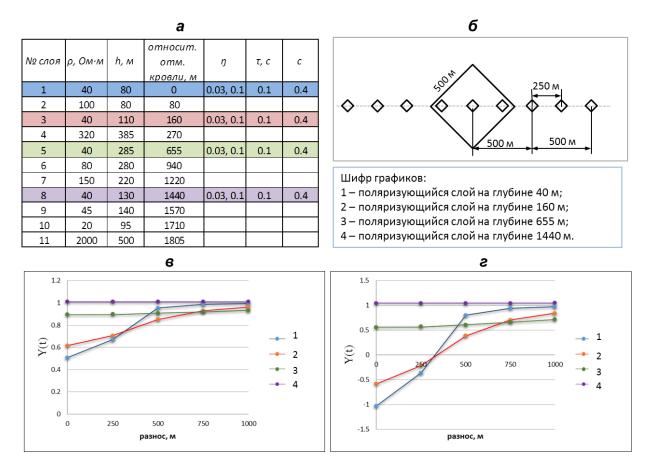


Рисунок $2.9 - \Gamma$ еоэлектрическая модель и зависимости Y(t) на времени t=0.4 с от разноса приемной петли и глубины залегания поляризующего слоя: а — геоэлектрическая модель, б — схема установки 3СБ, в — при поляризации слоя 0.03, г — при поляризации слоя 0.1. Шифр графиков — номер поляризующегося слоя на рисунке 2.9 а.

Таким образом, по результатам математического моделирования, наиболее чувствительной к ВП является приемная петля, расположенная внутри контура генераторной петли – отношение ЭДС, рассчитанной от модели с параметрами ВП к ЭДС без ВП, максимально отличается от единицы.

Увеличение расстояния между источником и приемником поля приводит к ослаблению вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику, тем большему, чем ближе к поверхности расположен поляризованный объект. Когда поляризующимся является первый горизонт, то с ростом разноса от 0 до 1000 м для данной геоэлектрической модели влияние ВПИ убывает более чем в два раза [Компаниец и др., 2019].

При расположении поляризующего слоя на глубине 655 м (пятый геоэлектрический горизонт) Y(t) незначительно отличается от единицы и практически не изменяется в зависимости от разноса. Однако с ростом величины поляризуемости горизонта отношение ЭДС уменьшается и остается на том же самом уровне для всех разносов. Поэтому при высоких значениях ВП имеется небольшая чувствительность при залегании поляризующего слоя в средней части разреза (рисунок 2.10).

При глубине до кровли слоя 1440 м (восьмой геоэлектрический горизонт) Y(t) = 1, т.е. влияния ВП не наблюдается на всех разносах. При увеличении поляризуемости слоя (более 0.6), отношение остается равным и немного большим единицы (от 1.07 до 1.13 при $\eta = 0.6 - 0.9$) для всех разносов.

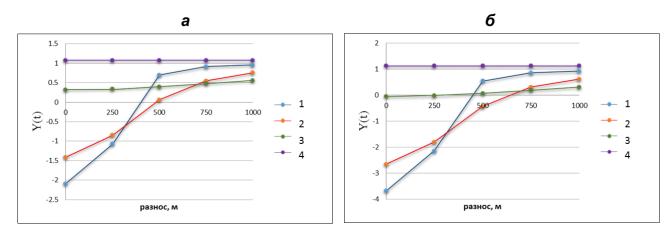


Рисунок 2.10 — Зависимости Y(t) на времени t=0.4 с от разноса приемной петли и глубины залегания поляризующего слоя: а — при поляризации слоя 0.6, б — при поляризации слоя 0.9, Шифр графиков — номер поляризующегося слоя на рисунке 2.9 а.

2.3. Синтетические сигналы 3СБ в зависимости от геоэлектрических и поляризационных параметров модели

С целью оценки влияния параметров геоэлектрического разреза и модели Cole-Cole на сигналы становления, проведены расчеты на основе типичной геоэлектрической модели. Расчеты выполнены для соосной установки (разнос 0 м), как наиболее чувствительной к наличию ВП, в качестве источника поля задана генераторная петля со стороной квадрата 500 м, приемная петля 18×18 м, ток 1 А.

Поскольку параметры модели Cole-Cole могут изменяться в широких пределах, в данной главе расчеты ограничены наиболее часто встречающимися значениями: $\tau = 0.1$ с, c = 0.4 (по результатам интерпретации данных ЗСБ на различных участках, рисунок 2.6). Дополнительно выполнен расчет при $\tau = 0.01$ с. Поляризующийся слой расположен в первом геоэлектрическом горизонте, поскольку в предыдущем разделе показано, что влияние на переходные характеристики оказывает преимущественно верхняя часть разреза.

2.3.1. Удельное сопротивление поляризующегося слоя

Ниже представлены результаты моделирования переходных характеристик для модели, в которой УЭС первого слоя изменялось от 10 до 150 Ом·м, мощность h составляет 80 м, параметры модели Cole-Cole закреплялись: $\eta = 0.03$, $\tau = 0.1$, 0.01 с, c = 0.4.

На рисунке 2.11 показаны графики Y(t) от времени в диапазоне от 0.1 до 500 мс. Максимальное влияние УЭС оказывает на временном интервале от 0.3 до 100 мс. Уменьшение УЭС поляризующегося горизонта приводит к увеличению Y(t) как при времени релаксации 0.1 с, так и 0.01 с. При УЭС более 50 Ом·м отношение ЭДС становится меньше 1 и практически не изменяется с увеличением сопротивления.

На интервале времен от 0.1 до 0.4 мс и от 150 до 500 мс при УЭС менее 50 Ом·м значения Y(t) становятся менее 1.

Стоит отметить, что при разных значениях τ влияние УЭС на графики Y(t) схожее.

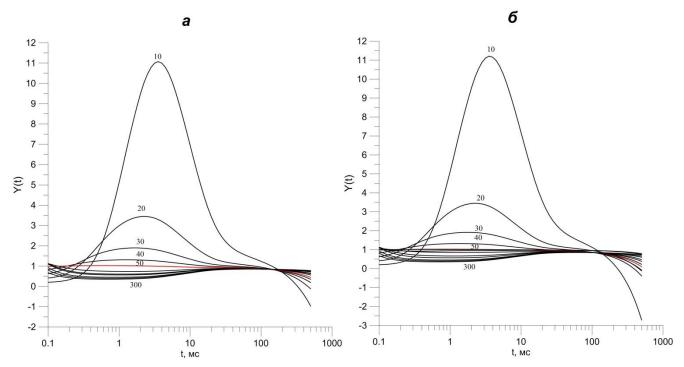


Рисунок 2.11 — Графики Y(t), рассчитанные для типичной геоэлектрической модели при вариации УЭС первого слоя (шифр кривой): a — при τ = 0.01 c, δ — при τ = 0.1 c.

2.3.2. Мощность поляризующегося слоя

На рисунке 2.12 представлены результаты расчетов переходных характеристик для модели, у которой мощность первого слоя изменялась от 10 до 300 м. УЭС и параметры модели Cole-Cole закреплялись: $\rho = 50$ Ом·м, $\eta = 0.03$, $\tau = 0.1$, 0.01 с, c = 0.4.

Изменение мощности поляризующего слоя приводит к изменению переходных характеристик на всем временном интервале.

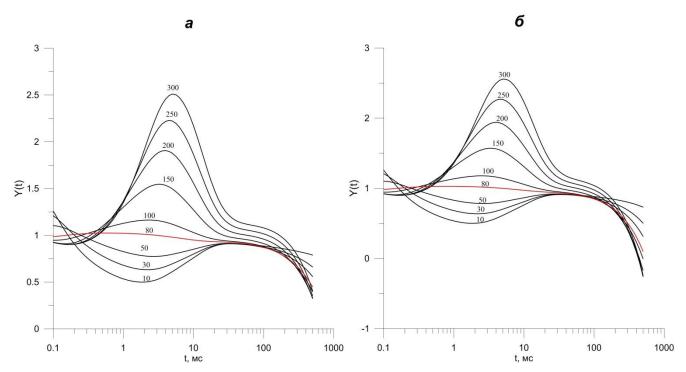


Рисунок 2.12 — Графики нормированных переходных характеристик, рассчитанных для типичной модели при различной мощности первого слоя (шифр кривой): $a - \tau = 0.01$ с, $\delta - \tau = 0.1$ с.

По времени можно выделить три диапазона, на которых влияние мощности горизонта проявляется по-разному:

0.1—0.3 мс — при мощности слоя более 80 м, Y(t) меньше 1; при h менее 80 м Y(t) больше 1.

<u>0.3–100 мс — </u>интервал максимального влияния мощности поляризующегося горизонта — при h более 80 м, Y(t) больше 1; при h менее 80 м, Y(t) становится менее 1.

100-500 мс - Y(t) становится меньшим 1 при любом значении мощности.

При различных значениях τ влияние мощности на графики Y(t) схожее.

2.3.3. Поляризуемость

Для типичной модели рассчитаны переходные характеристики при закрепленных УЭС, мощность, время релаксации τ и параметр c. Изменялась поляризуемость первого слоя от 0 до 1 с шагом 0.1. Графики Y(t) рассчитаны для τ = 0.1 с и τ = 0.01 с (рисунок 2.13).

По графикам видно, что при различных значениях поляризуемости изменение Y(t) происходит на всем временном интервале. При этом время релаксации на форму графиков влияет незначительно, но влияет на величину Y(t) – при большем значении τ значения Y(t) в три раза больше в абсолютных значениях при равных значениях η .

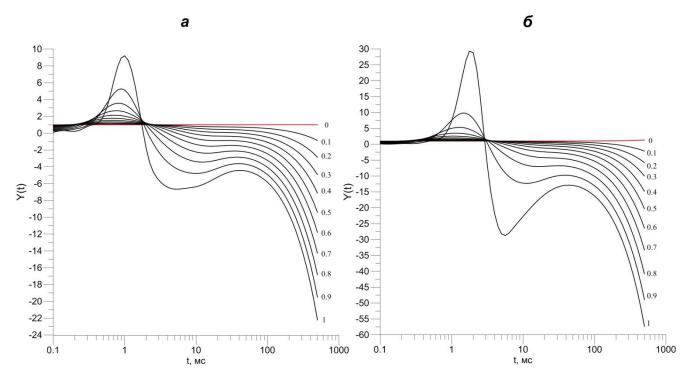


Рисунок 2.13 — Графики нормированных переходных характеристик, рассчитанных для типичной модели при различных значениях поляризуемости (шифр кривой): а — при τ = 0.01 с, б — при τ = 0.1 с.

Условно диапазоны влияния ВП можно поделить на три интервала:

<u>первый</u> – ранние времена (0.1–0.4 мс) – наблюдается незначительное отклонение Y(t) от единицы в сторону уменьшения, что свидетельствует о том, что ЭДС, рассчитанная от модели, в котором находится поляризующийся слой на данном интервале меньше, чем ЭДС, рассчитанная от модели без поляризующегося слоя. Таким образом, УЭС в данном интервале будет повышаться.

<u>второй</u> — средние $(0.5–3\ \text{мc})$ — Y(t) возрастает, что свидетельствует об увеличении значений ЭДС, рассчитанной от модели с ВП относительно ЭДС без ВП. С повышением η значения Y(t) больше 1. УЭС будет уменьшаться.

третий — поздние (3–500 мс) — наблюдается максимальное изменение Y(t) по величине в сторону отрицательных значений. При значениях поляризуемости 0.1–0.5 происходит плавное уменьшение Y(t), больше 0.6 со сменой направления. На данном временном интервале чувствительность к ВП переходных характеристик максимальная, УЭС с ростом поляризуемости будет увеличиваться.

2.3.4. Время релаксации

На рисунке 2.14 представлены результаты моделирования нормированных переходных характеристик для модели, в которой время релаксации первого слоя

изменялось от 0 до 1 с. УЭС, мощность и остальные параметры модели Cole-Cole закреплялись: $\rho = 50$ Ом·м, h = 80 м, $\eta = 0.03$, c = 0.4.

Результаты расчетов показали, что максимальное влияние на графики Y(t) время релаксации оказывает на поздних временах. С увеличением времени релаксации влияние ВП проявляется сильнее.

Сравнивая с графиками, на которых отражено влияние поляризуемости, можно сделать вывод о том, что влияние η и τ на графики Y(t) имеет схожий характер на времени более 1–3 мс.

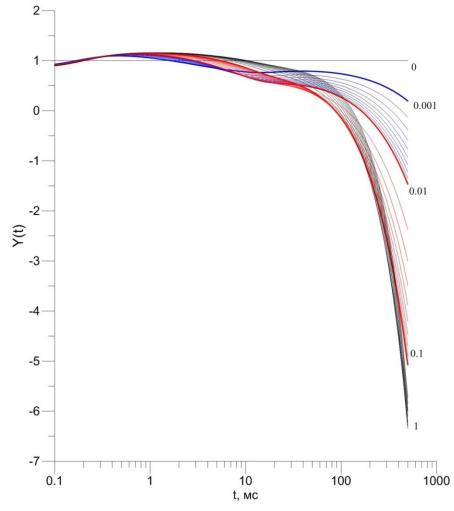


Рисунок 2.14 — Графики нормированных переходных характеристик с различными значениями параметра τ (шифр кривой).

2.3.5. Показатель степени c

Расчет переходных характеристик выполнен для времен релаксации 0.1 и 0.01 с. УЭС, мощность, поляризуемость и время релаксации закреплялись: $\rho = 50~{\rm Om}\cdot{\rm m},~h = 80~{\rm m},~\eta = 0.03,~\tau = 0.01,~0.1.$

Как проиллюстрировано на рисунке 2.15 увеличение показателя степени c сопровождается уменьшением Y(t), за исключением c=0.7-1 и $\tau=0.01$, когда на времени более 20 мс Y(t) возрастает до 1. Чем больше c, тем сильнее проявление ВПИ.

<u>При $\tau = 0.1$ </u> с влияние ВП сказывается на временах более 100 мс. Таким образом, при увеличении времени релаксации влияние параметра c проявляется на более поздних временах зондирования. При c более 0.5 Y(t) становится меньше 0 на временах более 100 мс.

<u>При $\tau = 0.01$ </u> с и c = 0.1—0.5 графики Y(t) плавно убывают на временном интервале от 0.3 до 500 мс. Когда c больше 0.5 графики Y(t) имеют экстремум на времени 20 мс.

На временах от 0.1 до 5 мс для всех значений c Y(t) больше 1.

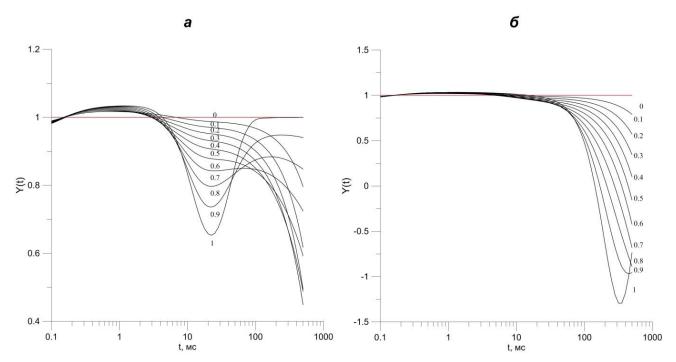


Рисунок 2.15 — Графики нормированных переходных характеристик с различными значениями параметра c (шифр кривой): $a - \tau = 0.01$ с, $\delta - \tau = 0.1$ с.

2.4. Выволы

Имеющаяся информация о поляризуемости пород свидетельствует, о том, что осадочные отложения разреза юга Сибирской платформы могут характеризоваться значениями в диапазоне от 0 до 0.03–0.04. Однако, как отмечено в главе 1, присутствие пород трапповых формаций, древний возраст пород и, как следствие, наличие вторично измененных пород, позволяет предположить, что наличие электронно-проводящих минералов может приводить к существенному повышению поляризуемости.

Использованная при математическом моделировании модель Cole-Cole адекватно объясняет изменение формы кривых 3СБ под влиянием ВПИ.

Как показал расчет переходных характеристик, на проявление ВПИ оказывают влияние все параметры поляризующегося слоя.

Для формирования методических рекомендаций среди полученных результатов математического моделирования наиболее важными, применительно к геологическим условиям юга Сибирской платформы, являются:

- сильнее всего эффекты ВПИ проявляются при расположении приемной петли внутри генераторной;
- наибольшее влияние на сигналы становления оказывает поляризующийся горизонт, расположенный в верхней части разреза (до 300–400 м);
- для поляризующихся слоев, расположенных в средней части разреза, эффекты ВПИ проявлены на всех разносах, однако они незначительны; влияние ВПИ может быть заметно в том случае, когда поляризуемость превышает 0.6. При положении горизонта в нижней части разреза влияние ВП не заметно.
- при неизменной поляризуемости, уменьшение УЭС и возрастание мощности поляризующегося горизонта приводит к усилению эффекта ВПИ.

Эти результаты положены в основу методического обеспечения интерпретации данных ЗСБ в рамках геоэлектрической модели, учитывающей вызванную поляризацию.

3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЗСБ С УЧЕТОМ ВПИ

Интерпретация данных является одним из основных этапов производственного цикла электромагнитных зондирований, в ходе которого анализируются полученные в поле геофизические материалы, определяются параметры геоэлектрического разреза (инверсия) и выполняется их геологическое истолкование.

На современном этапе геологоразведочных работ перед электромагнитными зондированиями ставятся геологические задачи, требующие высокой точности подбора и детальности моделей.

Качество инверсии данных зависит от того, насколько выбранная априорная геоэлектрическая модель адекватна исследуемому разрезу. Построение стартовой геоэлектрической модели основано на использовании всех имеющихся геолого-геофизических данных. Необходимым является этап анализа различных факторов, влияющих на данные ЗСБ; среди этих факторов вызванная поляризация пород играет важную роль.

3.1. Общий подход к интерпретации данных ЗСБ и построению геоэлектрической модели

Интерпретация данных ЗСБ проводится в несколько этапов (рисунок 3.1).

Первым этапом является качественная интерпретация кривых зондирования, которая предназначена для общей оценки строения геоэлектрического разреза в плане и по глубине. На этом этапе выясняется степень осложнения кривых зондирования геоэлектрическими неоднородностями и различными эффектами.

На данном этапе осуществляется просмотр кривых ЭДС, кажущейся проводимости, кажущегося сопротивления, их типизация. При этом оценивается характер изменения кривых, их корреляция, составляется карта типов кривых, которая позволяет выделить зоны с различным УЭС. Построение разрезов кажущихся параметров позволяет оценить распространение региональных маркирующих горизонтов, проследить структурные элементы при их контрастном проявлении. Проводится выбор предварительной модели разреза, подлежащей уточнению посредством инверсии.

- **1. Качественный анализ**: выявление основных типов кривых ЗСБ, общая оценка геоэлектрической обстановки
- 2. Анализ априорной информации и формирование стартовых геоэлектрических моделей: литолого-стратиграфическая привязка горизонтов по данным бурения, определение УЭС горизонтов по данным БК, анализ структурных карт, закрепление мощностей
- **3. Инверсия сигналов 3СБ:** определение параметров геоэлектрических моделей для каждой точки наблюдения
- **4. Построение** геоэлектрических разрезов и карт геоэлектрических параметров по горизонтам осадочного чехла и фундамента.
- **5. Геологическая интерпретация данных.** Определение критериев выявления перспективных объектов. Комплексный прогноз

Рисунок 3.1 – Схема интерпретации данных ЗСБ

Перед проведением инверсии электроразведочных данных осуществляется *сбор и* анализ априорной геолого-геофизической информации: данные по скважинам глубокого бурения на исследуемой площади, данные ГИС, определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты по данным построений кажущихся параметров, отмечается положение кровли кристаллического фундамента и осуществляется литологостратиграфическая привязка слоев. Изучаются проявления магматизма и тектонической активности, оказывающие влияние на строение изучаемой территории и характер электромагнитного поля.

Осуществляется анализ структурных карт по данным сейсморазведки, карт прироста проводимости, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений (рисунок 3.2). Мощности горизонтов средней и нижней частей разреза закрепляются, что позволяет снизить проявление S-эквивалентности [Поспеев и др., 2018].

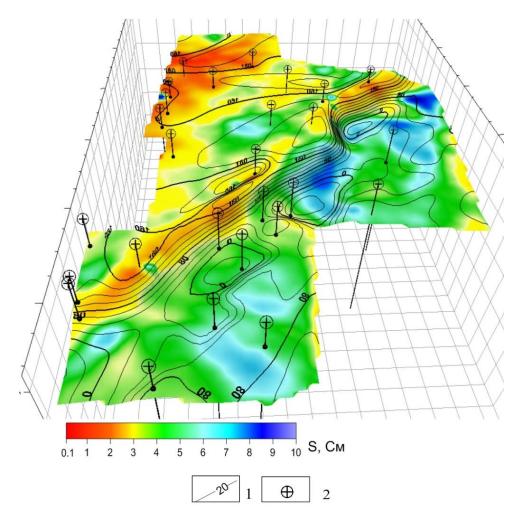


Рисунок 3.2 — Карта прироста проводимости и структурная поверхность: 1 — изолинии глубины кровли ангарской свиты, 2 — скважины глубокого бурения

Формирование стартовых геоэлектрических моделей производится для каждого зондирования индивидуально. В зависимости от наличия априорной информации УЭС слоев задается на основе интерполяции с уже имеющихся геоэлектрических моделей при наличии архивных данных электроразведки, а также на основе петрофизических оценок, либо снимаются с диаграмм осредненного БК при наличии электрического каротажа (рисунок 3.3).

Предпосылкой для использования результатов БК является корреляция между распределением УЭС по данным ЗСБ и каротажа. Основное преимущество бокового каротажа (по сравнению с другими видами электрического каротажа) - использование фокусировки электрического тока, что снижает влияние бурового раствора и неоднородности разреза вблизи ствола скважины. Это позволяет детально расчленять разрез, а в благоприятных случаях точнее определять удельное сопротивление пластов [Дахнов, 1985].

В условиях высокоомного разреза юга Сибирской платформы данные БК применяются преимущественно для оценки УЭС, а также для определения соотношения сопротивления горизонтов при разделении слоев на более тонкие слои.

При создании априорной модели по данным бокового каротажа, прежде всего, необходимо согласовать масштаб исследований с ЗСБ. Для этого важно использовать единые отметки горизонтов по глубине. В связи с меньшей детальностью геоэлектрических моделей наземных зондирований необходимо интегрирование каротажных данных.

Расчет геоэлектрической модели по боковому каротажу заключается в получении значений среднего удельного сопротивления горизонтов. Осреднение значений сопротивления выполняется по формуле:

$$\rho = \exp(\frac{\Sigma ln\rho_{\rm BK}}{N}), \qquad (1.5)$$

ho — сопротивление горизонта, $ho_{\rm БK}$ — кажущееся сопротивление в точке замера бокового каротажа, N — количество точек замера по БК

В результате формируется геоэлектрическая модель, в которой количество и мощность горизонтов соответствует модели ЗСБ.

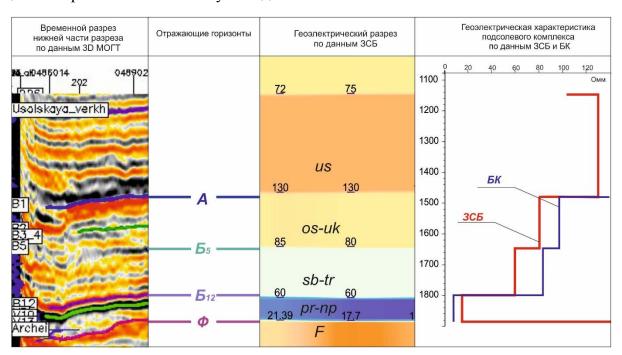


Рисунок 3.3 — Формирование стартовой геоэлектрической модели подсолевого комплекса

Сопоставление геоэлектрических моделей ЗСБ и БК, полученных на ряде скважин, позволяет оценить сходство геоэлектрических параметров на различных интервалах глубин.

Расхождение геоэлектрических моделей карбонатно-галогенного комплекса по данным ЗСБ и БК связано с тем, что результаты измерений на постоянном токе пропорциональны поперечному сопротивлению пород, а результаты индукционных зондирований, связаны с продольным сопротивлением. В подсолевой части разреза, особенно при наличии коллекторов, значения ρ по данным БК, как правило, ниже УЭС по данным ЗСБ за счёт понижающего влияния бурового раствора, глинистой корки и зоны проникновения бурового раствора в зонах с углеводородном насыщением [Компаниец и др., 2014].

В случае отсутствия данных БК, оценить обобщенные геоэлектрические параметры разреза можно на основе дифференцирования кривых кажущей проводимости [Агафонов, 2005], а также по асимптотам и по координатам минимумов кривых кажущегося сопротивления. [Матвеев, 1990; Электроразведка. Пособие..., 2018].

После подготовки стартовых геоэлектрических моделей проводится инверсия данных ЗСБ и затем построение геоэлектрических разрезов и карт.

Инверсия данных или количественная интерпретация кривых ЗСБ заключается в восстановлении параметров среды, соответствующих наблюденному сигналу.

Подбор моделей проводится согласно основным критериям:

• <u>оптимальная невязка</u> между теоретической и практической кривыми – обеспечивает не только приемлемое расхождение между ними, но и соответствие полученной геоэлектрической модели априорной информации о геологическом строении изучаемого разреза.

Невязка представляет собой процентное расхождение практической и теоретической кривых δ и определяется по формуле.

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\rho_{\pi p}(t_{i}) - \rho_{\text{Teop}}(t_{i})}{\rho_{\pi p}(t_{i}) (n-1)} \right)^{2}}$$
 (1.6)

где δ - относительная погрешность (расхождение, невязка), $\rho_{\rm пp}(t_i)$, $\rho_{\rm тeop}(t_i)$ — значения кажущегося сопротивления на практической и на теоретической кривых, соответственно, на одном временном отсчете

• <u>гладкость получаемых разрезов</u> – приемлемые (согласно данным геологии) различия моделей соседних точек, если это не диктуется априорными данными, и самими кривыми зондирования.

Инверсия данных ЗСБ, результаты которой представлены в диссертации, выполнялась с помощью программ Model 3 и Model 4 (Суров Л.В. и др., Емельянов В.А., Поспеев А.В.). Эти программы позволяют моделировать электромагнитные отклики, а также проводить количественную интерпретацию результатов нестационарных электромагнитных зондирований.

Программы созданы на основе алгоритмов расчета прямых и обратных задач, разработанных в Институте геофизики СО РАН (Антонов Е.Ю., Могилатов В.С., Эпов М.И.), «Зонд-Гео» (Каминский А.А. и др.).

Инверсия проводится в ручном и автоматическом режимах. Инверсия в ручном режиме используется для подбора моделей на опорных точках; в этом случае опыт и знания интерпретатора позволяют учесть априорные данные о геологическом строении района работ. При выполнении площадных съемок, объем данных возрастает в разы, поэтому для их интерпретации в разумные сроки используются программы, работающие в автоматическом режиме. Геоэлектрические модели, полученные с помощью ручной инверсии, используются в качестве стартовых на этапе автоматической инверсии.

При автоматической инверсии решение обратной задачи выполняется с заданием графа, в котором формируются условия и последовательность подбора параметров [Емельянов и др., 2016; Мурзина и др., 2016]. Циклы инверсии повторяются многократно для всех точек ЗСБ до достижения оптимальной точности подбора. В данном случае значительно сокращаются временные затраты на процесс. Результирующие модели описываются мощностями, продольным удельным электрическим сопротивлением и параметрами поляризации слоев.

На основе моделей, полученных по результатам инверсии, строятся геоэлектрические разрезы, карты, кубы. На заключительном этапе производится геологическая интерпретация данных, при наличии результатов работ других геофизических методов – комплексная интерпретация и совместный прогноз.

Как при ручной, так и автоматической инверсии данных ЗСБ, неотъемлемым этапом является анализ и учет индукционно-вызванной поляризации.

3.2. Анализ сигналов ЗСБ на предмет проявления ВПИ

Проявления ВПИ замечены достаточно давно [Сидоров, Скурихин, 1964, Spies, 1980]. Решающую роль в исследовании индукционно-вызванной поляризации сыграла установка с совмещенными петлями, широко используемая в методе МПП (ЗСБ).

Надежным критерием проявления ВПИ является смена знака регистрируемого сигнала. Как показано В.П. Губатенко, В.В. Тикшаевым, Р. Weide1t, если удельная проводимость и магнитная проницаемость среды не зависят от частоты, то переходный процесс на зажимах однопетлевой (совмещенной) установки не может сменить знак и характеризуется монотонным затуханием во времени. Смена знака переходного процесса возможна под влиянием поляризующегося объекта [Губатенко, Тикшаев, 1979; Weide1t, 1982].

При использовании многоразносных установок диагностика влияния ВПИ возможна с помощью совместного анализа кривых, зарегистрированных от одной генераторной петли на нескольких разносах.

3.2.1. Многоразносные установки и методика работ

Многоразносная установка ЗСБ представляет собой комбинацию незаземленной генераторной петли, являющейся источником поля, и нескольких незаземленных приемных петель (рисунок 3.4). Каждая приемная петля соответствует точке наблюдения ЗСБ.

Параметры зондирующей установки определяются несколькими факторами: геоэлектрическими характеристиками изучаемого разреза, задачами и этапом исследований, имеющейся сетью сейсморазведочных профилей, на основе которой производится привязка и расположение установок ЗСБ.

В глубинной модификации ЗСБ для возбуждения переходных процессов используется квадратная генераторная петля со стороной 500–600 м, что обеспечивает исследование разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы до глубин 3–8 км.

Съемки ЗСБ проводятся с использованием телеметрической цифровой станции «SGS-TEM» [Агафонов, 2005; Шарлов, 2010], позволяющей организовывать системы наблюдений сложной конфигурации. Регистрация сигналов происходит одновременно на нескольких разносах. При профильных работах традиционно применяется пятиразносная установка – приемные петли располагаются на разносах, равных 0 м (соосная приемная петля), 500 и 1000 м (разнесенные приемные петли). Количество записей на одной точке 15–30, количество накоплений в одной записи – 100–200. Размер приемной петли равен 18×18 м. Сила тока в генераторной петле составляет от 40 до 200 А. На юге Сибирской платформы, переходный процесс регистрируется до времени 500–2000 MC c арифметическим шагом по времени.

При площадных работах на поисково-разведочном этапе плотность наблюдений составляет 8–12 физических точек на 1 км², при мониторинговых работах 20–25 физических точек и обусловлена размером изучаемых объектом и ожидаемых аномалий.

Для контроля качества материала при работе с такими установками сформирован параметр, оценивающий влияние систематических погрешностей и эффектов геологического происхождения [Guseinov et al., 2012; Гусейнов, 2015].

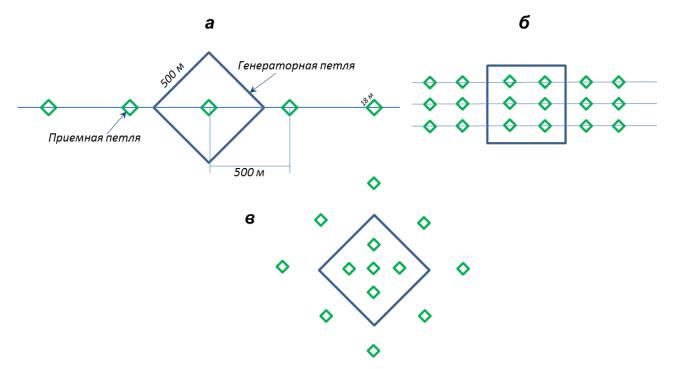


Рисунок 3.4 — Многоразносные установки 3СБ, применяющиеся для работ 3СБ на юге Сибирской платформы: а — профильные, б — широкий профиль, в — площадные.

3.2.2. Диагностика эффектов вызванной поляризации и магнитной вязкости

Одной из особенностей многоразносных установок является различное влияние на переходные характеристики вызванной поляризации, магнитной вязкости и геоэлектрических неоднородностей, что позволяет распознать эти эффекты и применять при интерпретации данных ЗСБ [Компаниец и др., 2010, 2011, 2018; Kozhevnikov et al., 2016; Буддо, 2012, Семинский, 2017].

При изучении горизонтально-слоистой среды кривые 3СБ, измеренные многоразносными установками на юге Сибирской платформы, на поздних временах совпадают. На ранних временах переходные характеристики расходятся, однако при этом наблюдается симметрия: при одинаковом разносе регистрируются идентичные кривые ρ_{τ} [Компаниец, 2011].

Процессы индукционно-вызванной поляризации сконцентрированы вблизи источника, поэтому влияние ВПИ проявляется в повышении значений ρ_{τ} на кривых, зарегистрированных на соосных пикетах. В условиях разреза юга Сибирской платформы это наблюдается, начиная со времени 20–60 мс. Завышение ρ_{τ} или уменьшение значений ЭДС происходит вследствие того, что на поздних временах поляризационные токи имеют противоположное направление вихревым токам, возникающим в среде при индукционном возбуждении поля.

Эффективным способом оценки присутствия влияния и степени проявленности ВПИ на кривых ЗСБ является параметр Δ S, используемый в программе EMQC для оценки качества данных ЗСБ и характеризующий присутствие частотной дисперсии удельного электрического сопротивления [Гусейнов, 2015].

Параметр ΔS определяется по графикам зависимости кажущейся проводимости S_{τ} от кажущейся глубины H_{τ} . Он характеризует расхождение ветвей кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$, записанных на соосном и разнесенных пикетах. Кажущаяся глубина для оценки ΔS выбирается на отметке (более 2000 м), на которой расхождение ветвей кривых проявляется статистически уверенно. Расчет ΔS выполняется по формуле:

$$\Delta S = \frac{S(H) - S_p}{S_p} \cdot 100\%, \tag{1.7}$$

где S(H) — суммарная кажущаяся проводимость на кажущейся глубине H, полученная на соосных кривых, S_p — среднее значение проводимости, полученное на разнесенных пикетах.

В случае влияния ВПИ на переходные характеристики отмечается отрицательный прирост проводимости на кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$, зарегистрированных на соосном пикете. Поэтому чем сильнее проявлены эффекты ВПИ, тем меньше величина параметра ΔS . Параметр ΔS имеет отрицательный знак (рисунок 3.5).

На основе полученных значений параметра строится *карта*, с помощью которой оценивается распространение влияния ВП по площади и осуществляется районирование.

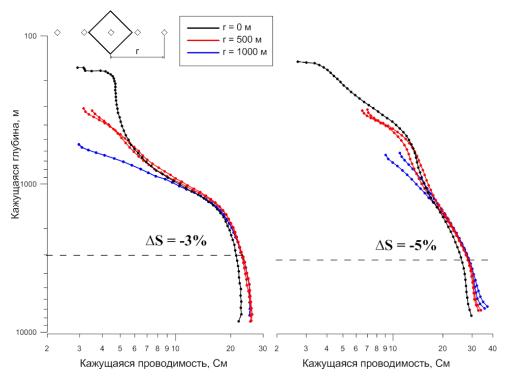


Рисунок 3.5 — Кривые $S_{\tau}(H_{\tau})$, зарегистрированные на различных участках юга Сибирской платформы, отличающиеся параметром ΔS .

На некоторых площадях Сибирской платформы кроме ВП на кривые становления оказывают влияние эффекты суперпарамагнетизма [Захаркин и др., 1988, Кожевников и др., 2012, Коzhevnikov, 2016]. В отличие от ВП, влияние магнитовязких пород наблюдается на кривых ЗСБ в виде аномально медленно убывающей ЭДС, при этом знак различен для соосного пикета и разнесенных. Наименьшему влиянию подвержены кривые, зарегистрированные на разносе 1000 м. На поздних временах расхождение кривых увеличивается.

Для 30 участков (70 000 точек 3СБ) на юге Сибирской платформы, где проведены работы методом 3СБ, рассчитан и проанализирован параметр Δ S.

На рисунке 3.6 представлена схема расположения участков, изученных методом ЗСБ за последние 17 лет. На этих участках зафиксированы массовые проявления ВПИ.

На рисунке 3.7 представлена диаграмма количества кривых 3СБ, осложненных влиянием ВПИ. Как видно, более 60 % кривых 3СБ, полученных на юге Сибирской платформы, подвержены влиянию вызванной поляризации.

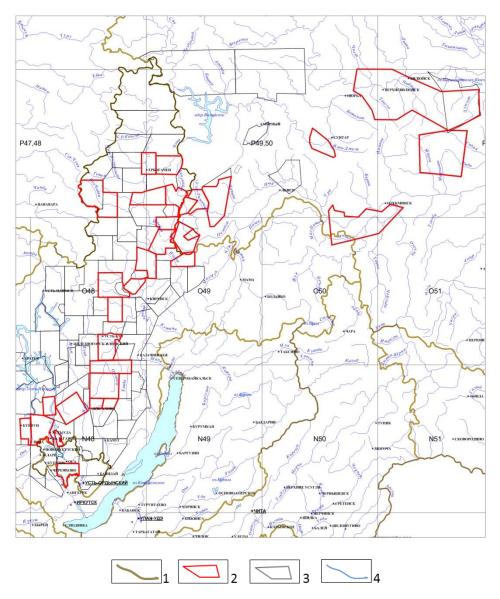


Рисунок 3.6 — Карта участков юга Сибирской платформы с проявлениями ВПИ (по материалам АО «ИЭРП» 2000—2018 гг.): 1 — административные границы, 2 — участки с проявлением ВП, 3 — участки без проявления ВП, 4 — гидросеть.

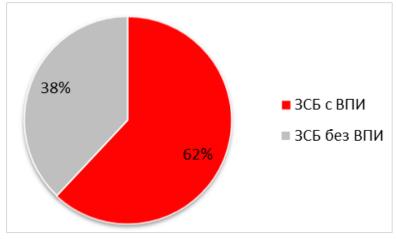


Рисунок 3.7 — Диаграмма, иллюстрирующая соотношение данных ЗСБ с проявлением ВПИ и без проявлений.

3.3. Интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ

В качестве одного из способов интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ в работах [Каменецкий и др., 1997, 2014; Тригубович, Чернышев, 2016] предлагается проводить разделение индукционных и поляризационных сигналов и последующую их индивидуальную интерпретацию. Разделение основано на том, что индукционные и поляризационные характеристики различным образом зависят от размеров и конфигурации генераторно-измерительной установки. Наблюдения выполняются установками различных размеров: для параметризации неоднородной поляризующейся ВЧР — измерения проводятся с источником 100×100 м, для дальнейшей инверсии в рамках модели проводимости — с источником 500×500 м.

Однако такой способ при производстве работ ЗСБ приведет к значительному увеличению временных и материальных затрат.

В зависимости от этапа работ и методики (профильные или площадные) количество наблюдений может составлять от 50–300 до десятков тысяч точек. При площадных наблюдениях с высокой плотностью точек ЗСБ количество получаемых данных кратно увеличивается по сравнению с профильными работами. Поскольку возможности трехмерной инверсии с учетом ВПИ пока технически ограничены, автором предложен и используется способ интерпретации данных массовых съемок ЗСБ на основе модели горизонтально-слоистой поляризующейся среды. Он включает в себя несколько этапов (рисунок 3.8):

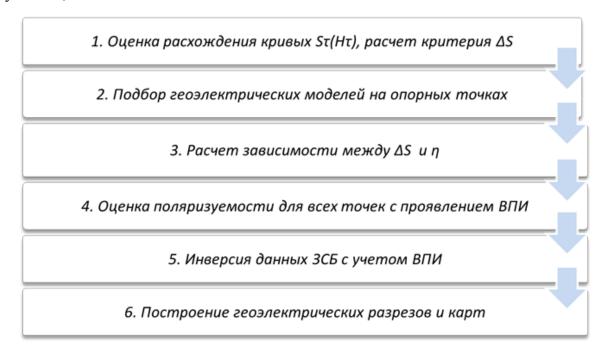


Рисунок 3.8 – Последовательность этапов при интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ

1.Оценка расхождения кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$.

На данном этапе рассчитывается параметр ΔS (см. раздел 3.2.2.) На основе полученных значений строится карта ΔS и производится районирование, оценивается распространение влияния ВП по площади.

2.Подбор геоэлектрических моделей на опорных точках

На данном этапе среди всех точек, на которых кривые ЗСБ подвержены влиянию ВПИ, выбираются опорные точки и/или профили.

Для интерпретации кривых на опорных точках формируется априорная геоэлектрическая модель (согласно методики, описанной в подглаве 3.1)

Для каждой многоразносной установки сначала выполняется инверсия переходных характеристик, измеренных на разнесенных установках без параметров ВП. Напомним, что при больших разносах происходит ослабление вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику. Полученные значения УЭС используются в качестве стартовых при инверсии переходных характеристик, зарегистрированных на соосных установках. Геоэлектрическая модель дополняется параметрами ВП и подбирается до достижения оптимальной невязки между практической и теоретической кривыми (на опорных точках).

Примеры геоэлектрических моделей, подобранных без учета ВП и с учетом ВП на разных разносах (0 и 1000 м), представлены на рисунке 3.9.

	а		
R = 0 M		R = 1000 M	

Nº	без ВП		с ВП			
	ρ1, Ом∙м	Н, м	ρ2, Ом∙м	ŋ	τ, c	С
1	10.4	80	10.3	0.036	0.1	0.4
2	45	85	45			
3	6.7	105	6.6			
4	500	285	500			
5	500	170	500			
6	35	422	30			
7	50	280	50			
8	150	300	50			
9	330	210	210			
10	220	192	45			
11	120	120	45			
12	2000	750	1000			

Nº	без ВП		с ВП			
IN≌	ρ1, Ом∙м	Н, м	ρ2, Ом∙м	ŋ	τ, c	С
1	8	76	8	0.036	0.1	0.4
2	50	85	50			
3	6.5	105	6.5			
4	500	285	500			
5	500	170	500			
6	33	422	33			
7	55	280	55			
8	50	300	50			
9	210	210	210			
10	42	190	42			
11	42	120	42			
12	500	750	500			

Рисунок 3.9 — Геоэлектрические модели: а — для кривой ЗСБ, зарегистрированной на соосном пикете (с разносом 0 м), б — на разнесенном пикете (с разносом 1000 м). ρ_1 — УЭС по результатам инверсии без учета ВП, ρ_2 — УЭС с учетом параметров ВП.

Как правило, параметры τ и c закрепляются, что позволяет снизить эквивалентность подбора. Предполагается, что текстурно-структурные особенности поляризующихся пород, которые характеризуют данные параметры, по площади значительно не изменяются. Ниже будет показано, что распространение ВПИ связано с юрскими отложениями в верхней части разреза. Значения τ и c выбираются на основе результатов интерпретации на соседних площадях, а также на опорных точках изучаемого участка.

В результате формируются геоэлектрические модели с учетом параметров поляризуемости.

Вариант такой последовательности действий при интерпретации данных ЗСБ с учетом параметров ВП возможен в условиях «спокойной» геоэлектрической обстановки, когда не происходит резкой смены геоэлектрических характеристик. Критерии неоднородности среды сформулированы в работе [Семинский, 2017].

3.Определение зависимости ΔS от поляризуемости η

Зависимость $\Delta S(\eta)$ необходима для получения стартового значения поляризуемости на всех точках площади, на которых наблюдается проявление ВПИ.

В случае влияния ВПИ, сигналы становления характеризуется более быстрым затуханием переходных процессов на поздних временах (по сравнению с сигналами, измеренными на поверхности неполяризующейся среды), что также отражается на величине суммарной проводимости на кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$ для заданной глубины Н. На рисунке 3.10 показаны кривые $S_{\tau}(H_{\tau})$, рассчитанные для типичной модели (таблица 1.1) при различных значениях поляризуемости первого горизонта. Рост поляризуемости приводит к увеличению расхождения между кривыми $S_{\tau}(H_{\tau})$ для поляризующейся и неполяризующейся сред.

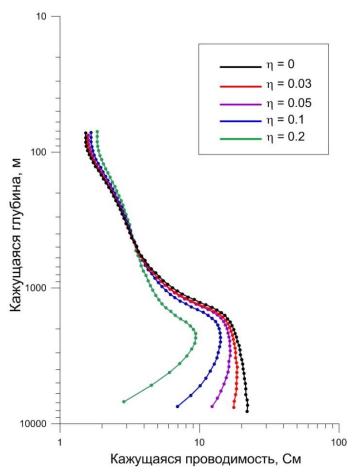


Рисунок 3.10 — Пример кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$, рассчитанных для геоэлектрической модели при различных значениях η первого горизонта.

Для расчета зависимости используются опорные геоэлектрические модели, сформированные на этапе 2. Для каждой модели изменяются значения η с заданным шагом и рассчитываются кривые $S_{\tau}(H_{\tau})$ и расхождение кривых ΔS . Время релаксации τ и параметр c закрепляются. На рисунке 3.11 представлен график зависимости $\Delta S(\eta)$, рассчитанный для типичной модели.

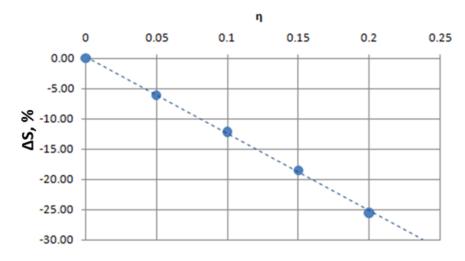


Рисунок 3.11 - 3ависимость ΔS от η .

4. Оценка поляризуемости для всех точек с проявлением ВПИ

С использованием полученной на этапе 3 зависимости $\Delta S(\eta)$ и фактического значения ΔS оценивается поляризуемость для всех точек зондирований, на которых выявлено влияние ВП. Эти оценки используются в качестве стартовой при инверсии данных 3СБ с учетом ВПИ.

5. Инверсия данных ЗСБ с учетом ВПИ

На данном этапе выполняется подбор геоэлектрических моделей для всех точек площади. В качестве стартовых моделей, используются те, что получены на опорных точках или профилях. Поляризуемость присваивается по результатам расчета на этапе 4. Поскольку мощности определяются по структурному каркасу, то при интерпретации данных ЗСБ они закрепляются.

На данном этапе обратная задача решается с помощью модуля автоматической инверсии с выбором графа, в котором задаются ограничения и условия подбора [Мурзина и др., 2016, 2017; Поспеев и др., 2018].

Работа автоматической инверсии основана на методе Монте-Карло с элементами имитации отжига. Преимущество избранного алгоритма в его устойчивости к овражным поверхностям функции минимизации. Кроме того, методика интерпретации данных ЗСБ предполагает фиксацию геометрической части моделей - структурного каркаса, исходя из известных сейсмических поверхностей. Таким образом, подбираемыми параметрами модели являются УЭС слоев и их поляризуемость. Для снижения эквивалентности решений выполняется регуляризация функционала минимизации и сокращения области значений искомых параметров. В процессе инверсии для каждого искомого параметра находится значение, при котором достигается оптимальная невязка между экспериментальными и модельными данными.

6.Построение геоэлектрических разрезов и карт параметров.

При построении геоэлектрических разрезов и карт, в случае если инверсия данных произведена без учета ВПИ и/или не полностью учтена, в нижних и средних слоях разреза появляются субвертикальные высокоомные интервалы, которые не поддаются геологической интерпретации (в случае закрепления мощностей на основе структурного каркаса по данным МОГТ).

В случае если границы геоэлектрических горизонтов не закреплены, то отсутствие учета ВП приводит к завышению кровли опорного высокоомного горизонта (фундамента) в моделях для кривых ЗСБ, полученных на соосных пикетах [Стогний, 2008].

3.4. Об эквивалентности при интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ

Вопрос возникновения эквивалентности при учете ВПИ в данных ЗСБ является одним из самых сложных и малоисследованных. Количество параметров каждого слоя с двух (ρ, h) возрастает до пяти (ρ, h, τ, η, c) . Ввод параметров Cole-Cole в геоэлектрическую модель расширяет область эквивалентности подбора, по сравнению с инверсией на основе неполяризующейся модели. Кроме того, результаты моделирования показывают, что существует временной диапазон переходных характеристик, на котором параметры модели Cole-Cole «действуют однонаправленно».

Главным фактором, определяющим эквивалентность поляризационных параметров в рамках модели Cole-Cole, является описанная [Pelton et al, 1978] связь между поляризуемостью, временем релаксации τ и показателем степени c.

Вопросы изучения эквивалентности неполяризующихся разрезов применительно к индукционным зондированиям рассмотрены в работах [Матвеев, 1990; Захаркин, 1981; Эпов, Антонов, 2000; Рабинович, 1987].

Исследованием эквивалентности поляризующихся сред при индукционных зондированиях занимались Легейдо П.Ю., Агеенков Е.В., Каменецкий Ф.М.

Существуют способы уменьшения влияния эквивалентности, направленные, с одной стороны, на развитие и усложнение методических приемов получения геофизической информации, повышение качества регистрируемых данных, с другой — на развитие методик интерпретации.

Один из способов в работах [Каменецкий, Тимофеев, 1984; Каменецкий, 1997, 2014] предлагается проводить разделение индукционных и поляризационных полей и последующую их раздельную интерпретация. По мнению авторов, разделение основано на том, что индукционные и поляризационные характеристики различным образом зависят от размеров и конфигурации генераторно-измерительной установки.

Однако такой способ при производстве работ приведет к значительному увеличению временных и материальных затрат.

Другие способы направлены на развитие методик инверсии данных: проведение совместной инверсии кривых ЗСБ, полученных на одной установке с разными разносами

[Антонов, Шеин, 2008] и закрепление одного или двух параметров модели Cole-Cole [Компаниец и др., 2019; Легейдо и др., 2016], комплексирование данных различных методов, ввод дополнительной геолого-геофизической информации. Способы дополняют друг друга и используются в различном сочетании.

В рассматриваемой методике при инверсии данных ЗСБ совместная инверсия кривых, полученных от одной генераторной петли не применялась по причине того, что результатом совместной инверсии является модель, которая минимизирует суммарный функционал невязки для всех кривых установки. При резком изменении геоэлектрического разреза оно не будет зафиксировано.

Для снижения проявления эквивалентности нами использовались следующие приемы:

1. Закрепление параметров с и τ , а также УЭС горизонтов в моделях, полученных для разнесенных установок. Этот прием основывается, в том числе, и на исследованиях, выполненных [Легейдо и др., 2016].

Значения c и τ выбираются на основе статистики результатов интерпретации по близлежащим площадям, а также на уровне значений, обеспечивающих оптимальную невязку.

2. Использование в качестве стартового значения УЭС, полученного для кривой с разнесенной установки, которая менее подвержена влиянию ВПИ.

3.5. Выводы

Методическим приемом, который уже при регистрации данных ЗСБ позволяет распознавать и отличать влияние ВПИ от эффектов, создаваемых релаксацией намагниченности и/или отклонением среды от горизонтально-слоистой является использование многоразносных установок.

Анализ проявления ВПИ и расчет параметра ΔS, характеризующего расхождение кривых 3СБ, зарегистрированных на различных разносах, позволяет оконтурить поляризующиеся породы и сформировать стартовую геоэлектрическую модель, которая используется в дальнейшей инверсии кривых 3СБ. Данный подход сокращает время, необходимое для проведения инверсии площадных данных 3СБ.

Влияние *вызванной поляризации* проявляется в виде расхождения кривых, измеренных соосными и разнесенными установками, на поздних временах. Завышение ρ_{τ} , происходит вследствие того, что на поздних временах поляризационные токи протекают в

противоположном направлении по сравнению с вихревыми токами, возникающими в среде при индукционном возбуждении поля. Тот факт, что с увеличением разноса влияние ослабевает, положен в основу методики интерпретации данных ЗСБ с учетом ВП.

Предложенная методика интерпретации позволяет диагностировать эффекты ВПИ, районировать площадь по степени проявления ВПИ и проводить интерпретацию данных 3СБ в терминах модели Cole-Cole.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗСБ С УЧЕТОМ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Метод ЗСБ применяется на юге Сибирской платформы в комплексе с сейсморазведкой для решения геологических задач, связанных с поиском и разведкой перспективных в нефтегазоносном отношении объектов.

В настоящей главе приводятся результаты интерпретации материалов ЗСБ с учетом индукционно-вызванной поляризации. В качестве типичных примеров рассмотрены два участка юга Сибирской платформы, характеризующихся различными геоэлектрическими условиями. Сравниваются результаты с учетом ВПИ и без учета, дается оценка невязки.

4.1. Средне-Окинский участок

Средне-Окинский участок располагается на юго-западе Иркутского амфитеатра (рисунок 4.1).

4.1.1. Геологическое строение участка работ

Геологическое строение участка типично для юга Сибирской платформы [Анцифиров и др., 1981]. Залегание пород – горизонтально-слоистое. Разрез осадочного чехла слагают породы венд-кембрийского, кембрийского, ордовикского и юрского возраста.

В современном тектоническом плане рассматриваемый район расположен вблизи зоны сочленения южной окраины Сибирской платформы с Восточно-Саянской горноскладчатой областью.

Осадочный чехол подразделяется на три структурных комплекса: надсолевой, солевой и подсолевой. Два верхних комплекса представлены преимущественно терригенными породами верхоленской, илгинской свит и отложениями юры, карбонатногалогенными породами литвинцевской, ангарской и бельско-булайской свит.

Нижний структурный комплекс представлен отложениями усольской свиты, а также карбонатной и терригенной толщами подсолевых отложений, с которыми связаны основные перспективы нефтегазоносности.

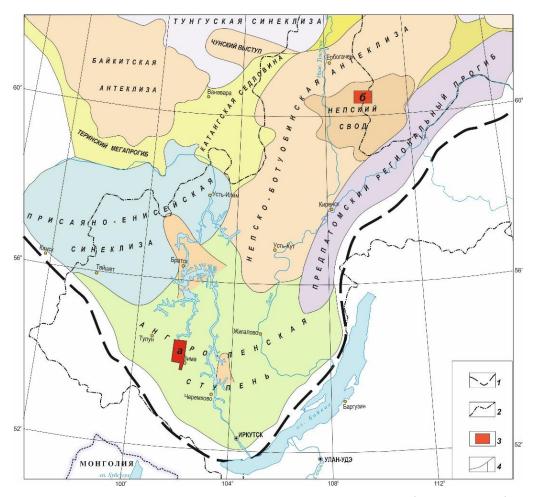


Рисунок 4.1 — Структурно-тектоническая схема юга Сибирской платформы [Анцифиров и др., 1981] и участки работ методом 3СБ: а — Средне-Окинский, б — Тымпучикано-Вакунайский.

1 — граница Сибирской платформы, 2 — административная граница Иркутской области, 3 — участки исследований, 4 — границы структур.

4.1.2. Методика работ

Для решения поставленных геологических задач была применена методика профильных зондирований. Источником электромагнитного поля являлась незаземленная квадратная петля со стороной размером 500 м. Приемные петли размером 18×18 м располагались на пяти разносах 0, 500 и 1000 м (рисунок 3.4 а). Временной диапазон измерений переходных характеристик составил 0.1-500 мс, ток в генераторной петле — от 10 до 150 А.

4.1.3. Районирование площади работ по степени проявленности эффекта ВПИ

Анализ большинства кривых ЗСБ свидетельствует о присутствии эффекта ВПИ. Правые ветви кривых кажущегося сопротивления, измеренных соосной и разнесенной установками, расходятся. При этом кривые, полученные на разнесенных установках (500 и 1000 м) на поздних временах совпадают (рисунок 4.2 б). Подобная ситуация наблюдается

повсеместно. Исключением являются данные ЗСБ, измеренные в юго-восточной части площади, где подобный эффект не наблюдается (рисунок 4.2 а).

Как известно, кривые, полученные над горизонтально-слоистым неполяризующимся разрезом, в поздней стадии становления совпадают. Наблюдаемое расхождение кривых $\rho_{\tau}(t)$ может быть вызвано присутствием в разрезе геоэлектрических неоднородностей, ВПИ а также магнитной вязкости.

В силу того, что расхождение соосных и разнесенных кривых становится заметным на одном и том же времени на большей части площади, его невозможно объяснить влиянием первого из вышеотмеченных факторов.

Очевидно, такое осложнение кривых объяснятся явлением ВПИ. Как показало математическое моделирование, эффект ВПИ на разнесенных пикетах проявляется в меньшей степени, чем на соосном.

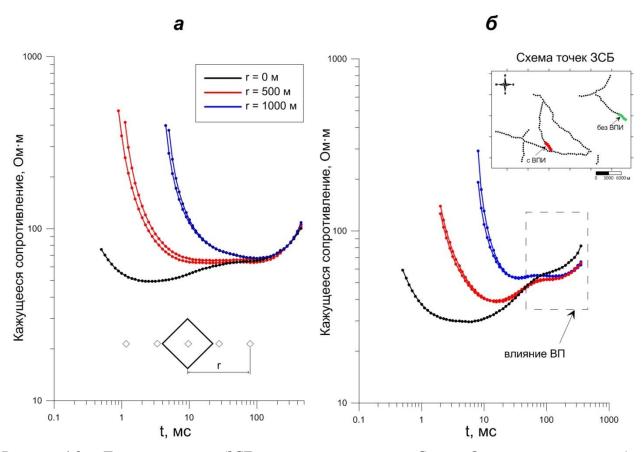


Рисунок 4.2 — Типичные кривые 3СБ, зарегистрированные на Средне-Окинском участке: а — без влияния ВПИ, б — с влиянием ВПИ.

Для оценки проявления ВПИ рассчитан параметр ΔS на кажущейся глубине 3000 м. Отрицательный знак параметра свидетельствует о том, что кажущаяся проводимость для соосного измерения меньше, чем для разнесенного, что типично для проявления ВПИ.

В центральной части площади наблюдаются минимальные значения параметра, увеличение происходит в юго-восточном направлении (рисунок 4.3).

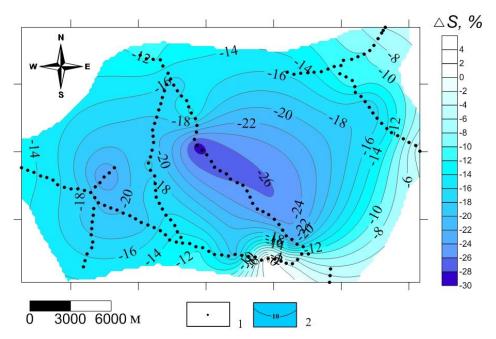


Рисунок 4.3 — Качественный анализ распространения ВПИ - карта расхождений левых ветвей кривых ЗСБ, полученных на соосных и разнесенных пикетах:

1 – точки 3СБ, 2 – изолинии Δ S, %.

4.1.4. Результаты инверсии и геологическая интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ

Геоэлектрический разрез осадочного чехла в пределах исследованной территории по своему строению подразделяется на три структурных комплекса: надсолевой, карбонатно-галогенный и подсолевой. Верхние два характеризуется повышенной дислоцированностью пород, обусловленной развитием разрывных нарушений. В их пределах выделяются четыре геоэлектрических горизонта, которые приурочены к преимущественно терригенным породам надсолевой толщи, литвинцевской, ангарской свитам, бельскобулайскому комплексу и усольской свите.

Нижний структурный комплекс характеризуется более стабильным строением и породы, залегающие в данном комплексе, выдержаны по своим параметрам. Здесь выделяется два геоэлектрических горизонта, связанных соответственно с отложениями карбонатной и терригенной толщам подсолевых отложений.

Стратификация горизонтов осуществлялась с учетом данных сейсморазведки, ГИС и глубокого бурения на соседних площадях.

В ходе инверсии для каждой точки зондирования получены геоэлектрические модели. Модель описывается пятью параметрами — мощностью слоев h, электрическим сопротивлением ρ , поляризуемостью η , временем релаксации τ и показателем степени c.

Первоначально модели формировались стандартным способом, т.е. закреплялись мощности слоев по данным сейсморазведки и бурения, далее подбирались УЭС на основе информации об общих закономерностях распределения его значений в районе исследований. За счет того, что на кривых ЭДС происходит уменьшение на временах более 40 мс, модель на соосном пикете по сравнению с моделью на разнесенных установках имеет повышенные значения удельного электрического сопротивления в нижних слоях. Поэтому параметры модели, полученные по результатам интерпретации кривых с разнесенных установок переносятся на соосную и далее вводятся параметры модели Cole-Cole $-\eta$, τ , и c.

Интересным и важным результатом интерпретации данных 3СБ с учетом ВПИ, является карта, построенная по значениям поляризуемости (рисунок 4.4). Поляризуемость изменяется от 0.01. до 0.18. В юго-восточной части участка поляризуемость уменьшается до 0–0.02. Незначительное уменьшение поляризуемости наблюдается и на северо-западе. Аномалии поляризуемости (η более 0.16) расположены в центральной части площади.

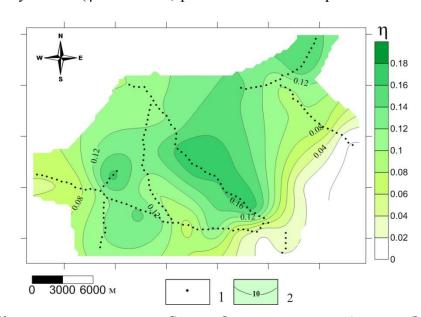


Рисунок 4.4 — Карта поляризуемости на Средне-Окинском участке: 1 — точки 3СБ, 2 — изолинии поляризуемости.

При сопоставлении распределения проявления ВП на изученной площади и геологической карты было замечено, что повышенные значения η отмечаются на участках распространения юрских пород (рисунок 4.5). В связи с проявлениями ВПИ, в отложениях юрского возраста особый интерес представляет заларинская свита, в составе которой по данным геологического картирования встречаются сильно пиритизированные аргиллиты. Толщина свиты достигает 60 м. В интервале свиты распространены угленосные формации

с проявлениями графитовой и сульфидной минерализации. Кроме того, согласно описанию геологической карты масштаба 1:200 000, в кембрийских отложениях нижней подсвиты верхоленской свиты отмечаются мергели с включениями кристалликов пирита.

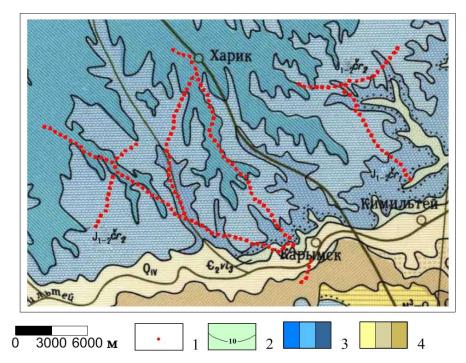


Рисунок 4.5 — Геологическая карта в пределах Средне-Окинского участка:

1 – точки 3СБ, 2 – породы среднего кембрия, 3 – юрские породы, 4 – породы четвертичной системы.

Таким образом, можно предположить, что поляризуемость верхней части разреза здесь связана с вкрапленной сульфидной минерализацией. Это предположение согласуется с результатами, представленными в известной работе [Pelton et al., 1978], в которой показано, что значения τ от 0.02–0.15 с и c=0.5 соответствуют концентрации пирита в осадочных породах порядка 0.5–2 %.

Необходимо отметить, что на геоэлектрических разрезах и картах сопротивления, построенных по результатам инверсии без учета поляризуемости, появляются «артефакты», которые затрудняют геологическую интерпретацию материалов ЗСБ. При инверсии данных ЗСБ в рамках горизонтально-слоистой неполяризующейся модели «задирание» кривых ρ_{τ} приводит к завышению значений УЭС слоев по сравнению с истинными. Это иллюстрируют примеры геоэлектрических моделей, полученных на Средне-Окинском участке при подборе без учета и с учетом ВП (рисунок 4.6).

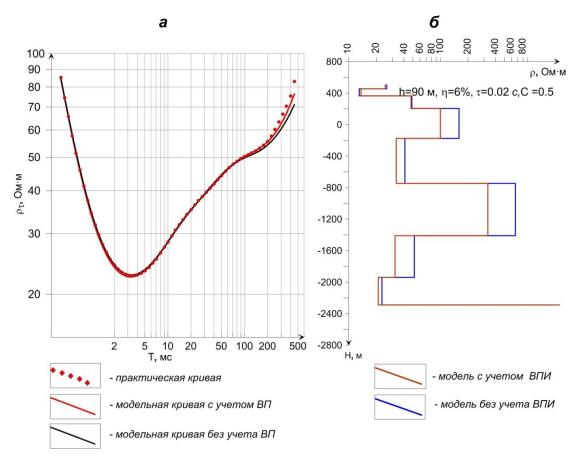


Рисунок 4.6 — Пример инверсии данных ЗСБ: а — кривые кажущегося удельного сопротивления, б — геоэлектрические модели.

На рисунке 4.7 представлены гистограммы распределения УЭС карбонатных отложений подсолевого комплекса, полученные при инверсии с учетом и без учета ВП. В случае отсутствия учета ВП более половины значений составляют или превышают 50 Ом⋅м; при учете ВП основная часть значений УЭС распределяется в диапазоне от 30 до 50 Ом⋅м.

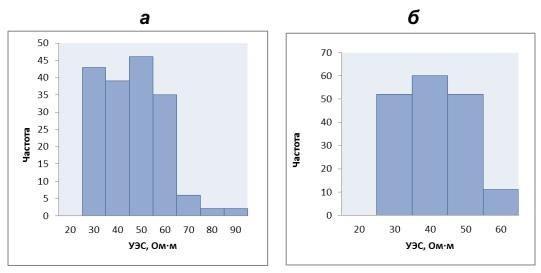


Рисунок 4.7 — Гистограммы распределения УЭС целевого горизонта по результатам инверсии кривых ЗСБ без учета ВП (а) и с учетом ВП (б).

Так на геоэлектрическом разрезе, построенном без учёта ВПИ вдоль одного из профилей в пределах участка (рисунок 4.8 а), на пикетах, где измерения выполнены соосной установкой, наблюдаются субвертикальные зоны повышенного сопротивления. Эти зоны, не имеющие отношения к геологии, «появились» потому что переходные характеристики, измеренные соосной установкой, наиболее подвержены влиянию ВПИ. Инверсия на основе модели поляризующейся среды даёт разумные в геологическом отношении результаты (рисунок 4.8 б).

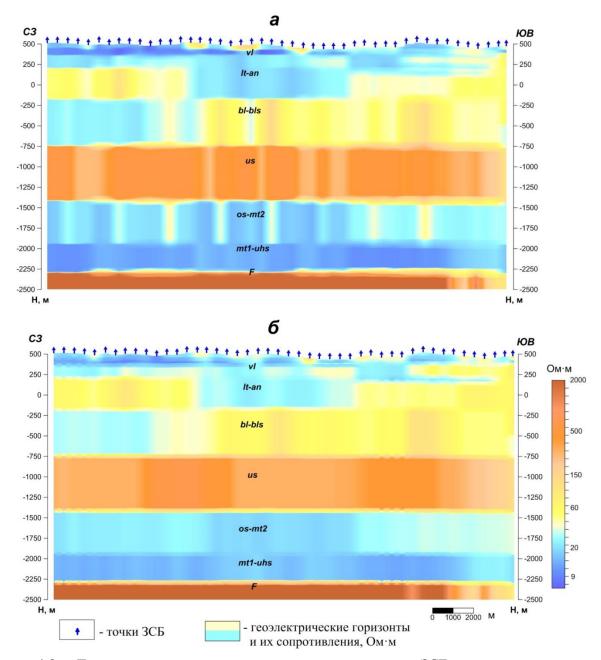


Рисунок 4.8 — Геоэлектрические разрезы, построенные по данным 3СБ: а — инверсия проводилась без учёта ВП, б — с учётом поляризуемости.

При построении карт продольного сопротивления влияние ВП также приводит к появлению множества локальных аномалий. Это иллюстрирует рисунок 4.9. а, где

приведена карта УЭС карбонатного подсолевого комплекса, представляющего интерес в связи с возможным присутствием коллекторов. Карта построена по результатам инверсии, выполненной без учёта ВПИ. Локальные аномалии повышенного УЭС, соответствующие зондированиям с соосной установкой, не подлежат геологическому истолкованию. Учёт ВПИ приводит, во-первых, к исчезновению «точечных» аномалий и, во-вторых, к понижению общего уровня УЭС на восточном фланге участка (рисунок 4.9 б).

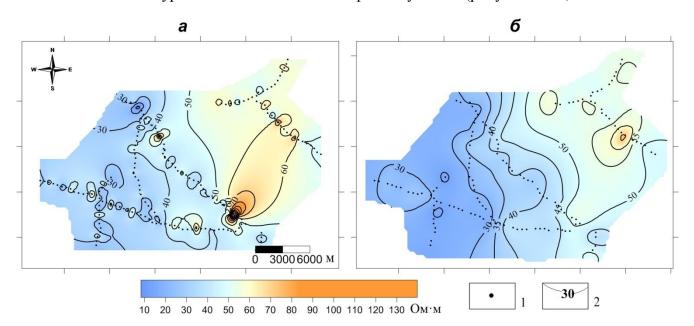


Рисунок 4.9 — Карты продольного сопротивления карбонатных отложений подсолевого комплекса: a — инверсия проводилась без учёта ВП, б — с учётом ВП:

1 – точки ЗСБ, 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом⋅м.

4.1.5. Прогноз коллекторских свойств

По результатам инверсии данных 3СБ с учетом ВПИ удалось разделить по УЭС карбонатные и терригенные отложения подсолевого комплекса. Именно с этими отложениями связаны главные перспективы обнаружения углеводородов.

В целом, распределение геоэлектрических характеристик подсолевого комплекса является однородным, лишь в отдельных зонах осложненным влиянием тектонических и литологических факторов.

Карбонатные отложения имеют пониженное (27-60 Ом·м) продольное сопротивление. Это свидетельствует о том, что породы комплекса на исследованной территории обладают хорошими коллекторскими свойствами. На большей части территории продольное сопротивление не превышает 45 Ом·м. Лишь на северо-востоке оно увеличивается до 50-60 Ом·м (рисунок 4.9 б). Это говорит о том, что в этом районе ухудшаются коллекторские свойства горизонтов.

Терригенные отложения подсолевого комплекса представлены песчаниками, аргиллитами и алевролитами ушаковской, непской и тирской свит. УЭС пород изменяется от 20 до 50 Ом·м (рисунок 4.10).

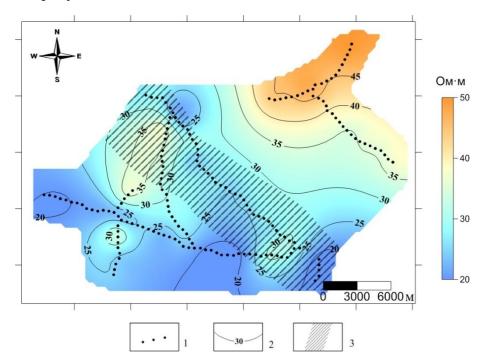


Рисунок 4.10 — Карта продольного сопротивления терригенных отложений подсолевого комплекса: 1 - точки 3СБ, 2 — изолинии продольного сопротивления, Ом·м, 3 — зона тектонических нарушений по данным магнито- и гравиразведки.

Продольное сопротивление данной части разреза связано со свойствами горизонтов-коллекторов — парфеновского, шамановского, боханского и безымянного. На площадях, расположенных южнее, преимущественное влияние на геоэлектрические характеристики данного интервала разреза оказывает парфеновский горизонт. В тоже время, восточнее, заметную роль играют и горизонты, залегающие ниже. В том случае, если основной вклад в коллекторские свойства вносит парфеновский горизонт, критически важным является наличие гидравлической связи парфеновского коллектора, распространенного в пределах Верхне-Окинской площади, с зоной «пляжного» коллектора, вскрытого серией скважин на площадях, расположенных восточнее и южнее. Если таковая связь отсутствует, т.е. южнее изученного участка существует тектонический или литологический барьер, то вся территория, расположенная южнее изолинии 40 Ом·м, является перспективной в нефтегазоносном отношении. Если таких барьеров нет, и повышение продольного сопротивления терригенной части подсолевого комплекса связано с вариациями эффективной толщины и пористости парфеновского горизонта, то наиболее вероятно это связано с водонасыщением.

В случае, если наибольший вклад в проводимость этой части разреза вносит не парфеновский горизонт, а более глубокозалегающие объекты, их перспективы должны рассматриваться вне связи с существованием вышерасположенных водонасыщенных зон.

Оценка коллекторских свойств карбонатной и терригенной частей подсолевого комплекса, проведенная на основании известной корреляции между геоэлектрическими и коллекторскими свойствами пород [Турицын, 2016; Поспеев и др., 2018], позволяет говорить о широком распространении подсолевых коллекторов на исследуемой территории.

4.2. Тымпучикано-Вакунайский участок

4.2.1. Геологическое строение участка работ

Участок находится на юге Сибирской платформы, в восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы, на Непском своде (рисунок 4.1). Разрез представлен преимущественно галогенно-карбонатными породами нижнего и среднего кембрия, в нижней части залегают карбонатные и терригенные отложения венда и нижнего кембрия. В основании осадочного чехла залегают разновозрастные метаморфизованные и кристаллические породы: амфиболитовые сланцы, гранодиориты и гнейсы. Нижнекембрийские отложения залегают на породах фундамента с угловым несогласием.

Целевые объекты поиска – горизонты-коллекторы, находятся в нижней части разреза, в подсолевом комплексе.

Район исследований осложнен тектоническими нарушениями различного возраста: от древних до современных. По данным скважин глубокого бурения, в разрезе ангарской свиты присутствует трапповая интрузия мощностью до 110 м [Oshmarin et al., 2016].

70 % изучаемой территории покрыто юрскими отложения. Отложения представлены песчаниками, песками, галечниками, глинами, алевролитами, аргиллитами, встречаются маломощные линзовидные прослои углей.

Метод ЗСБ применялся здесь для картирования перспективных в нефтегазоносном отношении коллекторов в подсолевой части разреза, оценки их фильтрационно-емкостных свойств и насыщения, картирования траппов и тектонических нарушений.

4.2.2. Методика работ

Для возбуждения и регистрации сигналов становления применялась многоразносная установка ЗСБ. Установка включает генераторную петлю (источник) и нескольких

приемных петель (рисунок 4.11). При проведении этих работ размер источника составлял 600 м×600 м. Шесть приемных петель располагались на расстояниях 140 м (внутри петли), 510 м и 900 м по отношению к центру источника. Такая геометрия установки определяется необходимой глубинностью исследований (2–3 км) в сочетании с имеющейся сетью сейсмопрофилей для 3D МОГТ 200×200 м, которая используется для привязки и размещения источников и приемников поля. Каждая приемная петля соответствует точке наблюдения 3СБ.

При площадных наблюдениях изучаемый участок заполняется наблюдениями по равномерной сети. В представленной схеме шаг приемников по профилю составляет 400 м, расстояние между профилями 200 м. Время регистрации сигналов становления составляет от 0.03–500 мс. Максимальный ток в петле составлял 170 А. Так, по методике площадных наблюдений изучен участок площадью в 350 км².

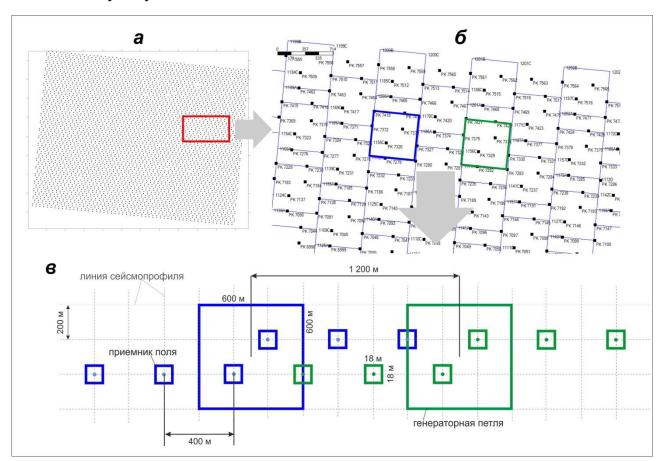


Рисунок 4.11 — Схема установок 3СБ: а — схема точек 3СБ на участке, б — фрагмент сети источников и приемников электромагнитного поля, в — схема двух установок 3СБ.

4.2.3. Районирование площади работ по степени проявленности эффекта ВПИ

Анализ кривых ЗСБ, зарегистрированных на Тымпучикано-Вакунайском участке, свидетельствует о влиянии ВПИ (рисунок 4.2).

На поздних (более 40 мс) временах расхождения между кривыми при разносах 140, 500 и 900 м отмечается для 80 % общего объема данных (4482 точки 3СБ). При одинаковых разносах кривые ρ_t (t) совпадают.

После обработки данных ЗСБ была проведена их интерпретация в соответствии с описанным выше подходом (см. подглаву 3.3).

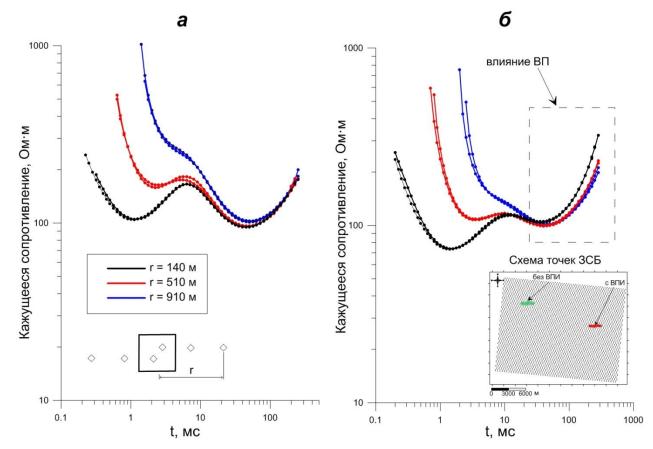
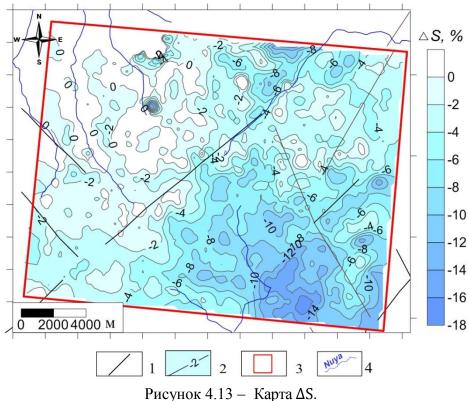


Рисунок 4.12 — Типичные кривые кажущегося сопротивления, зарегистрированные на Тымпучикано-Вакунайском участке: а - без влияния ВПИ, б - с влиянием ВПИ.

Распространение ВПИ на участке работ иллюстрирует карта параметра ΔS для кажущейся глубины 3000 м (рисунок 4.13). Отрицательный знак параметра свидетельствует о влиянии вызванной поляризации. Согласно карте ΔS , влияние вызванной поляризации сильнее всего выражено на юго-востоке участка; по мере продвижения в северо-западном направлении это влияние уменьшается.



гисунок 4.13 — Карта **Δ3**.

1 — тектонические нарушения по данным геологической карты, 2 — изолиния параметра ΔS , 3 — контур участка работ, 4 — гидросеть.

4.2.4. Результаты инверсии и геологическая интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ

Для точек 3СБ, расположенных на опорных профилях, выполнен подбор моделей и определены зависимости $\Delta S(\eta)$. С использованием этих зависимостей выполнены оценки значений поляризуемости для всей площади. Затем эти оценки использовались в качестве стартовых на этапе автоматической инверсии.

Для формирования структурного каркаса использовались построения, полученные по результатам 2D и 3D сейсморазведочных работ.

Априорная геоэлектрическая модель осадочного чехла составлена на основе данных БК и стратиграфии. Суммарная проводимость осадочного чехла не превышает 25–35 См.

По данным ЗСБ в разрезе осадочного чехла выделяются восемь геоэлектрических горизонтов, приуроченных к основным стратиграфическим подразделениям.

Участок характеризуется сложным тектоническим строением, а также присутствием в разрезе траппов триасового возраста. Поэтому можно было бы предположить, что расхождения переходных характеристик, измеренных соосной и разнесёнными установками, связаны с влиянием неоднородностей. Однако с учётом того, что эти расхождения имеют площадное распространение, причём переходные характеристики,

измеренные при одном и том же разносе, совпадают, отмеченные эффекты могут быть отнесены на счёт ВПИ.

По результатам автоматической инверсии значения поляризуемости составляют 0.01–0.15. Время релаксации τ и показатель степени c закреплялись на уровне, обеспечивающем оптимальную невязку всего массива данных в зонах с проявлением эффекта ВПИ (τ = 0.1 c, c = 0.6). Кроме того, поскольку литологический состав юрских отложений не меняется по площади, есть основание предполагать, что свойства пород, которые характеризуются данными параметрами (структурно-текстурные особенности пород, состав), малоизменчивы.

Пример автоматического подбора геоэлектрической модели кривой ЗСБ с проявлением ВП представлен на рисунке 4.14. Если подбор таких кривых выполнялся без учета ВП, на соосных пикетах происходит завышение УЭС нижних горизонтов и увеличение невязки.

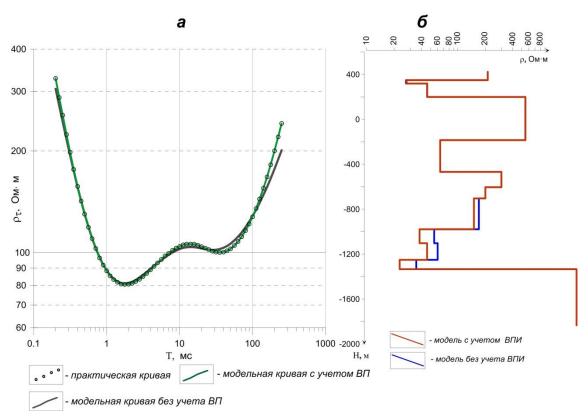


Рисунок 4.14 — Пример автоматической инверсии данных 3СБ: а — кривые кажущегося удельного сопротивления, б — геоэлектрические модели.

Сопоставление карт поляризуемости и геологической карты, на которой видно распространение юрских пород, позволяет предполагать связь повышенной поляризуемости и юрских отложений (рисунок 4.15).

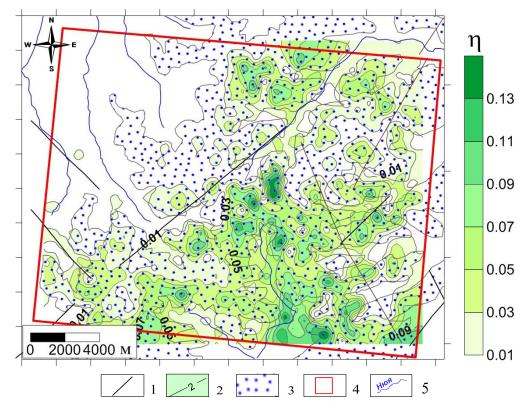


Рисунок 4.15 — Карта поляризуемости и распространения юрских пород:

1 — тектонические нарушения по данным геологической карты масштаба $1:200000,\ 2$ — изолиния поляризуемости 3 — отложения юры по данным геологической карты, 4 — контур участка работ, 5 — гидросеть.

По данным описания керна водозаборных скважин, находящихся южнее изучаемого участка, в породах вакунайской свиты юры и верхней части верхоленской и илгинской свит кембрия (в интервале глубин от 0 до 150 м), отмечены агрегаты пирита (рисунок 4.16) [Шкиря, Давыденко, 2017]. Кроме этого, встречаются пропластки каменного угля и углистых аргиллитов, с которыми могут быть связаны проявления вызванной поляризации. Согласно [Pelton et al, 1978] значение $\tau = 0.1$ с и поляризуемости 0.1–0.3 характерны для осадочных пород с объемным содержанием сульфидов 0.5–5 %.

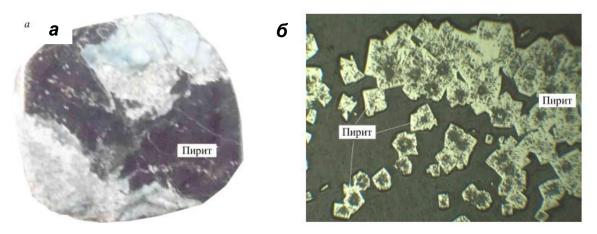
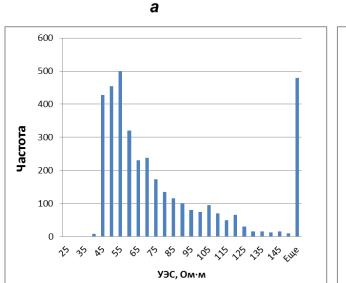


Рисунок 4.16 — Полированный штуф из керна (а), отобранный на исследуемом участке с глубины 150 м и снимок микроскопа при поле зрения рисунка 2.6 мм (б). Краевая часть выделения концентрически-зональной структуры сложена полосой пятнистых агрегатов глобулярного пирита, размером около 1-2 мм, переходящей к центральной части в их рассеянную вкрапленность [Шкиря, Давыденко, 2017].

Основной геологической задачей работ ЗСБ является картирование и определение параметров нефтегазоперспективных коллекторов в подсолевом комплексе, при решении которой отсутствие учета ВПИ приводит к ошибкам прогноза параметров целевых объектов. В ходе интерпретации подсолевой комплекс на исследуемом участке был разделен на три подгоризонта; перспективными являются верхний (карбонатный) и нижний (преимущественно терригенного состава). На гистограммах (рисунок 4.17) представлены распределения продольного сопротивления верхнего подгоризонта подсолевой части осадочного чехла, найденные с учетом и без учета ВП. Без учета ВП пик распределения сдвигается в сторону высоких значений УЭС и более трети от числа всех значений УЭС превышают 80 Ом·м. При учете параметров ВП сопротивления изменяются в пределах 35–57 Ом·м. Данный диапазон УЭС, согласно статистике, свидетельствует о наличии коллектора и согласуется с результатами бурения скважин.



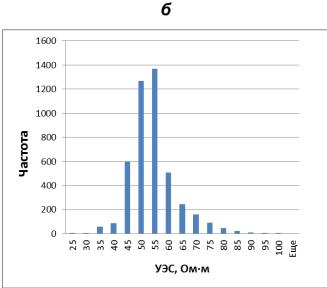


Рисунок 4.17 — Гистограммы распределения УЭС в целевом горизонте по результатам инверсии кривых ЗСБ без учета (a) и с учетом (б) ВПИ.

На рисунке 4.18 представлены графики невязок по одному из профилей. Видно, что учет ВП при подборе геоэлектрических моделей позволил снизить невязку в два раза. При этом изменение УЭС целевых горизонтов стало плавным и согласуется с геологическим строением участка работ, что иллюстрируют геоэлектрические разрезы, представленные на рисунке 4.19.

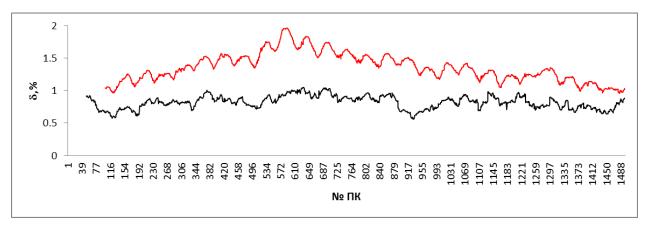


Рисунок 4.18 — Графики невязок при инверсии на временном интервале 10–80 мс, соответствующем целевому интервалу глубин: красная линия — без учета ВПИ, черная — с учетом ВПИ.

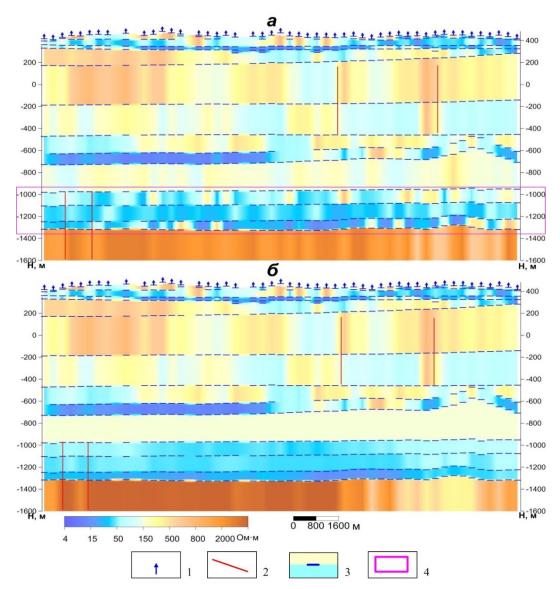


Рисунок 4.19 — Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии данных 3СБ: A — без учета ВПИ, Б — с учетом параметров ВПИ в верхней части разреза:

1 — точки ЗСБ, 2 — тектонические нарушения по данным сейсморазведочных работ, 3 — геоэлектрические горизонты, 4 — область влияния ВПИ на разрезе.

4.2.5. Прогноз коллекторских свойств

По результатам автоматической инверсии с учетом ВПИ подсолевой комплекс удалось разделить на три подгоризонта, изучить распределение УЭС и выполнить прогноз коллекторских свойств. В качестве перспективных на обнаружение УВ рассматриваются верхний – карбонатный и нижний – карбонатно-терригенный подгоризонты.

Верхний подгоризонт приурочен к карбонатным отложениям - от кровли осинского горизонта до подошвы усть-кутского. По результатам инверсии указанный интервал характеризуется значениями сопротивления от 30 до 150 Ом⋅м. Распределение значений сопротивления коррелирует со структурными блоками, выявленными по данным 3D МОГТ.

Области наиболее высоких сопротивлений - более 60 Ом·м - отмечаются в юговосточной, северо-восточной и центральной частях территории. Высокоомная зона на юговостоке соответствует серии крупных тектонических нарушений и, вероятно, ухудшенных коллекторских свойств пластов. Об этом свидетельствует данные по скважине, в которой по ГИС выявлен коллектор толщиной 3.2 м с низкими фильтрационно-емкостными свойствами в устъкутском горизонте.

Еще одна зона высоких УЭС закартирована на северо-западе территории исследования – в районе выступа фундамента. В центральной части данной структуры находится изометричная область с УЭС 40–50 Ом·м, в свою очередь, в центре которой находится скважина с промышленными притоками газа из осинского и устькутского коллекторов. Вмещающие высокоомные карбонатные породы и преимущественно газовое насыщение коллекторов формируют высокие значения продольного сопротивления.

УЭС менее 40 Ом·м маркируют зоны коллекторов с улучшенными фильтрационноемкостными свойствами; здесь расположены скважины со смешанным и УВ-насыщением.

На основе выявленных закономерностей построена прогнозная карта распространения коллекторов в карбонатных отложениях (рисунок 4.20).

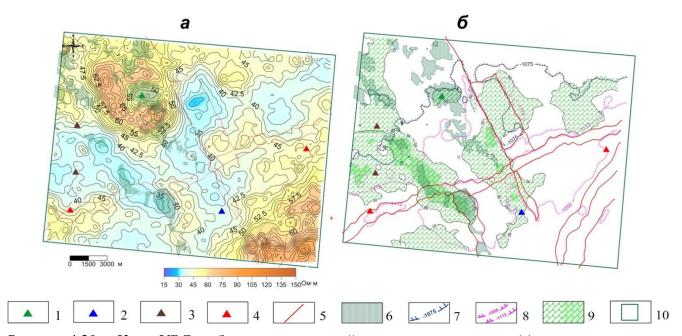


Рисунок 4.20 — Карта УЭС карбонатных отложений подсолевого комплекса (a) и прогнозная карта распространения коллекторов (б):

1 — 4 — скважины глубокого бурения: 1 — с притоками газа, 2 — с притоками воды, 3 — фильтрат бурового раствора, 4 — без притоков, 5 — тектонические нарушения по результатам сейсморазведочных работ, 6 — выступы фундамента по результатам сейсморазведочных работ, 7 — ВНК осинского горизонта, 8 — ВНК устъкутского горизонта, 9 — предполагаемая зона распространения коллекторов, 10 — контур участка.

Нижний подгоризонт приурочен к самой нижней части подсолевого комплекса и включает в себя преображенский пласт-коллектор и терригенные отложения венда, мощность интервала изменяется от 40 до 100 м, за счет изменения мощности терригенных отложений. В этом интервале УЭС пород изменяется от 15 до 50 Ом⋅м, преобладающими значениями сопротивления являются 15–35 Ом⋅м (рисунок 4.21).

На основе сопоставления насыщения и параметров коллекторов (эффективная мощность и пористость), вскрытых в скважинах глубокого бурения и УЭС по данным ЗСБ, выявлены граничные уровни зон распространения коллекторов с преимущественно водным насыщением, смешанным и УВ-насыщением и отсутствия коллектора, а также составлена прогнозная карта. Распределение значений УЭС свидетельствует об отсутствии прямой зависимости между значениями сопротивления и мощностью терригенных отложений. Значимый вклад вносит насыщение коллекторов, и, вероятно, вторичные изменения.

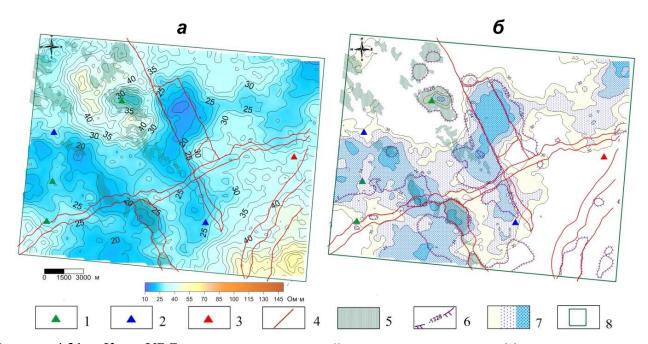


Рисунок 4.21 — Карта УЭС терригенных отложений подсолевого комплекса (a) и прогнозная карта распространения коллекторов (б).

1-3 — скважины глубокого бурения: 1 — с притоками газа, 2 — с притоками воды, 3 — без притоков, 4 — тектонические нарушения по результатам сейсморазведочных работ, 5 — выступы фундамента по результатам сейсморазведочных работ, 6 — ВНК верхнечонского горизонта, 7 - предполагаемая зона распространения коллекторов, 8 — контур участка.

Границы распространения коллекторов, определенные по данным ЗСБ, подтверждены последующим бурением. Коллекторы, вскрытые в скважинах, расположенных в зонах с УЭС более 32 Ом·м, характеризуются низкими ФЕС и отсутствием притоков. Скважины, относящиеся к областям с продольным сопротивлением

менее 24 Ом·м, вскрыли смешанное водно-углеводородное насыщение пластовколлекторов. В зоне со значениями УЭС 24–32 Ом·м находятся скважины с УВнасыщением коллекторов.

После проведения работ ЗСБ на участке пробурены три скважины, две из которых подтвердили прогноз по двум подгоризонтам, одна только по карбонатному.

4.3. О связи ВПИ с наличием коллекторов в отложениях подсолевого комплекса

Прогноз перспективных в нефтегазоносном отношении объектов по данным ЗСБ основан на анализе распределения удельного электрического сопротивления проводимости целевого объекта. Используются петрофизические зависимости, связывающие УЭС и коллекторские свойства горизонта. Основополагающей является эмпирическая зависимость Дахнова-Арчи, которая рассчитывается по данным ГИС и исследования керна для терригенных и карбонатных пород подсолевого комплекса. Эта модель является базовой для прогнозирования насыщения и емкостных параметров коллекторов [Турицын, 2016; Поспеев и др., 2018]. Для большинства месторождений юга Сибирской платформы определены коэффициенты уравнения Дахнова-Арчи.

В методах, основанных на изучении поляризуемости (ДНМЭ, ВП), предпосылкой для выявления залежей УВ, главным образом, является наличие эпигенетической минерализации над залежами, возникающей под воздействием миграции углеводородов вверх по разрезу. При этом в области залежи и над ней меняется химико-минералогический состав и физические свойства горных пород, происходит пиритизация, кальцитизация и др. [Корольков, 1987; Легейдо, 1996; Sternberg, 1991, Mouceeв, 2002].

Поисковым признаком в методе ДНМЭ прежде всего служит рост аномального отклика ВП в геоэлектрических слоях, приуроченных к уровню расположения первого регионального водоупора, а также понижение времени релаксации т над УВ-залежами.

По данным методов ВП, ДНМЭ на месторождениях Кавказа, Западной Сибири, Татарстана и др., на шельфе Баренцева, Каспийского морей наблюдается соответствие контуров аномалиям ВП и залежей УВ. Исследованиями Кудрявцевой [2006] показана связь между концентрацией вторичных сульфидов и коэффициентом поляризуемости, а также продемонстрирована возможность использования времени релаксации для разбраковки аномалий над существующими и расформированными залежами. Большой объем работ также проведен в последние годы на юге Сибирской платформы. Однако, стоит отметить, что количественных зависимостей, аналогичных существующим для

сопротивления, на данный момент не установлено и объяснение аномалий поляризуемости на территории юга Сибирской платформы в настоящий момент остается дискуссионным.

Как ранее упоминалось, в Восточной Сибири каротаж методом ВП и изучение поляризуемости на образцах керна не проводятся. Единственным примером являются измерения керна, отобранного с интервала подсолевого комплекса Верхнечонского месторождения. Авторы отмечают, что повышенная поляризуемость связана с большой концентрацией зерен пирита, а также с повышенной емкостью ионного обмена глинистых пород [Легейдо и др., 1996]

Для выяснения связи проявлений ВПИ и присутствия углеводородонасыщенных коллекторов сопоставлены результаты испытаний в скважинах глубокого бурения, наличие пирита в керне пород подсолевого комплекса и проявления поляризуемости в районе скважин глубокого бурения на некоторых участках и месторождениях юга Сибирской платформы (таблица 4.1). Выбор скважин и участков обусловлен наличием материала по описанию керна, доступных для анализа.

Таблица 4.1 — Проявление ВПИ в районе скважин глубокого бурения на некоторых участках и месторождениях Восточной Сибири

месторождения восто топ с				
№ скважины	Коллектор с УВ	Наличие пирита в керне	ВПИ по данным ЗСБ	
		пород подсолевого		
		комплекса		
Игнялинское месторождение				
1	+	+	+	
2	-	++	-	
3	+	+	+	
4	-	-	+	
5	+	++	+	
6	+	++	-	
7	-	нет данных	+	
8	-	нет данных	+	
9	+	нет данных	+	
10	-	нет данных	-	
11	-	нет данных	-	
12	+	нет данных	-	
Тымпучиканское, Вакунайское месторождение				
1	+	+	-	
2	+	++	+	
3	+	+	+	
4	+	+	-	
5	-	нет данных	-	
6	-	нет данных	+	
7	-	нет данных	+	
8	-	нет данных	+	

9	+	нет данных	+		
10	+	нет данных	-		
11	+	нет данных	+		
Продолжение таблицы 4.1					
Кедровый ЛУ					
1	+	+	-		
2	-	+	-		
3	+	-	-		
4	+	+	-		
5	+	+	-		
6	+	-	=		
7	-	-	=		
Боханский ЛУ					
1	не испытана	+	+		
2	+	+	+		
3	-	+	+		
4	+	+	-		
5	-	+	-		
6	+	нет данных	-		
7	+	-	-		
8	+	-	-		
9	+	+	-		
10	-	-	-		
11	-	-	-		

Из таблицы видно, что:

- пирит в породах подсолевого комплекса фиксируется как в продуктивных, так и не давших притока УВ скважинах;
 - аномалии ВП закартированы как в районе скважин с притоками УВ, так и без;
 - ВПИ фиксируется как в случае наличия пирита в керне, так и при его отсутствии.

Таким образом, четкой корреляции, подтверждающей связь индукционно-вызванной поляризации верхней части разреза, наличия пирита в породах подсолевого комплекса, а также углеводородов в коллекторах этого комплекса, не наблюдается.

4.4. Выводы

Инверсия данных многоразносных установок с учетом поляризуемости повышает геологическую информативность метода ЗСБ и дает более полную петрофизическую характеристику среды по сравнению с тем случаем, когда инверсия выполняется в классе неполяризующихся моделей. Учёт ВПИ приводит к уменьшению невязки подбора и к лучшему соответствию моделей геологическим данным и, как следствие, к повышению точности прогноза свойств коллекторов.

По результатам интерпретации корректно отображается распределение геоэлектрических характеристик, на картах исчезают не соответствующие геологической обстановке области высоких сопротивлений в нижних слоях разреза. Полученные геоэлектрические модели являются основой для прогноза коллекторских свойств подсолевых отложений по данным ЗСБ.

Сопоставление результатов инверсии данных 3СБ и геологического строения площадей исследования показывает связь повышенных значений ВП и распространения юрских пород, в которых по данным геологического картирования присутствует пирит и графитизированные угли.

В свою строения ВЧР очередь, анализ геологического перед началом электроразведочных работ позволяет оценить наличие возможного влияния ВПИ на индукционные переходные характеристики и выбирать оптимальные установки, применение которых может ослабить или усилить влияние ВПИ – в зависимости от поставленных геологических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенных исследований является методика распознавания и учета индукционно-вызванной поляризации при интерпретации данных массовых съемок ЗСБ на юге Сибирской платформы. Методика включает оценку степени проявленности ВПИ, формирование геоэлектрической модели на опорных точках, которая в дальнейшем используется в качестве стартовой при автоматической инверсии всего объема данных ЗСБ с учетом ВПИ.

Как показали результаты применения методики, модель Cole-Cole позволяет объяснить результаты ЗСБ, полученные с многоразносной установкой. На основе предложенного автором численного критерия показано, что 60 % данных ЗСБ на юге Сибирской платформы осложнено влиянием ВПИ.

Защищаемая методика учета ВПИ является эффективным инструментом для определения удельного электрического сопротивления горизонтов осадочного чехла юга Сибирской платформы. Методика улучшает точность подбора геоэлектрических моделей, что в свою очередь повышает надежность прогноза коллекторских свойств целевых горизонтов.

В диссертации показано, что проявления ВПИ связано преимущественно с поляризующимися породами верхней части (до 300–400 м) разреза.

Очевидно, исследования индукционно-вызванной поляризации, необходимо продолжить. Дальнейшее развитие предложенных подходов связано с несколькими направлениями:

- 1. Оценка проявления эквивалентности параметров моделей Cole-Cole и разработка алгоритмов уменьшения ее влияния.
- 2. Исследование возможности применения других моделей вызванной поляризации для интерпретации данных метода ЗСБ.
- 3. Разработка моделей и методики учета ВПИ применительно к малоглубинным ЗСБ.
- 4. Изучение проявлений ВПИ для оценки поляризуемости, которая представляет самостоятельный интерес как характеристика, связанная с вещественным составом и структурно-текстурными особенностями пород.

СПИСОК ТЕКСТОВЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БК – боковой каротаж

ВП – вызванная поляризация

ВПИ – индукционно-вызванная поляризация

ВЭЗ – вертикальные электрические зондирования

ГП – генераторная петля

ДЭЗ – дипольные электрические зондирования

ЗСБ – зондирование становлением поля в ближней зоне

КС – каротаж сопротивлений

МВ – магнитная вязкость

ММП – многолетнемерзлые породы

МОГТ – метод общей глубинной точки

МПП – метод переходных процессов

МТЗ – магнитотеллурические зондирования

МТП – магнитотеллурическое профилирование

НЭМЗ – нестационарные электромагнитные зондирования

ПП – приемная петля

ТТ – метод теллурических токов

ЧЗ – частотные зондирования

ЧЗ-ВП – частотные зондирования, направленные на изучение вызванной поляризации

УВ – углеводороды

УЭС – удельное электрическое сопротивление

ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства

ЭДС – электродвижущая сила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агафонов, Ю.А. Разработка программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе телеметрических систем наблюдения : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.10 / Агафонов Юрий Александрович. Новосибирск. 2005. 137 с.
- 2. Агафонов, Ю.А. Программно-измерительный комплекс для работ методом 3СБ / Ю.А. Агафонов, А.В. Поспеев // Геофизический вестник. 2001. —№10. С. 8—11.
- 3. Агеев, В.В. Изучение мерзлых разрезов Якутии с помощью зондирования становлением поля в ближней зоне и вертикального электрического зондирования методом вызванной поляризации / В.В. Агеев, Д.В. Агеев // Инженерная геология. 2017. —№1. С. 20-25.
- 4. Агеев В.В., Светов Б.С. Влияние поляризуемости горных пород на результаты электромагнитных зондирований // Физика земли. 1999. № 1. С. 19—27.
- 5. Агеенков Е.В. Исследование эквивалентностей горизонтально-слоистых поляризующихся сред в дифференциально-нормированном методе электроразведки. Автореферат дис.. канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 2004. 18 с.
- 6. Антонов, Е.Ю. Математическое моделирование квазистационарных электромагнитных полей в диспергирующих и магнитных средах: автореф. дис... докт. физ.-мат. наук: 25.00.10 /Антонов Евгений Юрьевич. Новосибирск., 2011. 32с.
- 7. Антонов, Е.Ю. Проявления и учет индукционно-вызванной электрической поляризации верхней части разреза восточной Сибири / Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, С.В. Компаниец // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 2. № 1. С. 185—191.
- 8. Антонов, Е.Ю. «ТЕМ-IР» система для интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред [Электронный ресурс] / Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, М.А. Корсаков // 1-ая междунар. науч.-практич. конф. по электромагнитным методам исследования «Геобайкал 2010». Иркутск, 2010.
- 9. Антонов, Е.Ю. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований при изучении поляризующихся сред / Е.Ю. Антонов, А.Н. Шеин // Геология и геофизика, 2008. № 10. С. 1046—1062.

- 10. Анцифиров, А.С. Геология нефти и газа Сибирской платформы. Под ред. А.Э. Конторовича, В.С, Суркова, А.А. Трофимука. / А.С. Анцифиров, В.Е. Бакин, И.П. Вараламов.— М. «Недра», 1981. 552 с.
- 11. Артеменко, И.В. Моделирование частотной дисперсии диэлектрической проницаемости мерзлых геологических сред и ее влияние на переходную характеристику незаземленной петли: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. / Артеменко Ирина Владимировна Иркутск, 2003.— 18 с.
- 12. Баранов, М.А. Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород / М.А.Баранов, С.В. Компаниец, И.В. Буддо, Н.В. Мисюркеева, Ю.А. Агафонов // Вестник ИрГТУ. 2014. № 7. С. 25—30.
- 13. Ваньян, Л.Л. Электромагнитные зондирования / Л.Л. Ваньян. М: Научный мир, 1997. 218 с.
- 14. Вахромеев, Г.С. Петрофизика. / Г.С. Вахромеев, Л.Я Ерофеев, В.С. Канайкин, Г.Г. Номоконова Томск: Изд-во Том. гос. ун-та., 1997. 462 с.
- 15. Вахромеев, Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке/ Г.С Вахромеев., Н.О. Кожевников Иркутск: изд. Иркут. ун-та, 1988. 224 с.
- 16. Вопросы поляризации горных пород: сборник статей под редакцией А.А. Молчанова и В.А. Сидорова. М., 1985.— 109 с.
- 17. Буддо, И.В. Тонкослоистые модели при изучении коллекторов в осадочном чехле методом зондирований становлением поля в ближней зоне методика и результаты интерпретации (на примере юга Сибирской платформы) : дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.10 / Буддо Игорь Владимирович. Иркутск, 2012. 162 с.
- Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Восточно-Саянская, лист N-47-XXIV. Объяснительная записка. / Иваньшина М.М., Знамеровский В.Н. —М.: Недра, 1968. — 68 с.
- 19. Гусейнов Р.Г. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований: автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2015. 24 с.
- 20. Гусейнов, Р.Г. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований / Р.Г. Гусейнов, А.В. Петров, Ю.А. Агафонов, М.В. Шарлов, И.В. Буддо, В.В. Гомульский // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI

- Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 20-25 апреля 2015г.). Иркутск: Институт земной коры CO PAH, 2015. C. 55—57.
- 21. Дахнов, В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. / В.Н. Дахнов. М.:Недра. 1982. 448 с.
- 22. Дахнов, В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. / В.Н. Дахнов. М.: Недра. 1985. 310 с.
- 23. Добрынин, В.М. Петрофизика (Физика горных пород)./ В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников.— М. Изд-во «Нефть и газ» РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 368 с.
- 24. Емельянов, В.С. Повышение точности решения обратной задачи ЗСБ за счет изучения пространственного распределения параметров поляризуемости геоэлектрического разреза на юге Сибирской платформы [Электронный ресурс] / В.С. Емельянов, С.В. Компаниец, А.В. Поспеев, Ю.А. Агафонов // 3-я международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «Геобайкал-2014»: Тезисы докладов, г. Иркутск.— 2014.
- 25. Емельянов, В.С., Суров Л.В., Шарлов М.В., Агафонов Ю.А. Современное программное средство 1D инверсии и моделирования данных 3CБ MODEL4 / В.С. Емельянов, Л.В. Суров, М.В. Шарлов., Ю.А. Агафонов // XIII международный геофизический научнопрактический семинар: Тезисы докладов. СПб., 2016. С. 115—122.
- 26. Жандалинов, В.М. Электрические и электромагнитные зондирования при поисках коренных месторождений алмазов / В.М. Жандалинов Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2011. 275 с.
- 27. Жданов, М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы / М.С. Жданов Научный мир, 2012. 680 с.
- 28. Задорожная, В.Ю. Учёт процессов вызванной поляризации в многослойных разрезах при индукционном зондировании / В.Ю. Задорожная, В.П. Лепешкин // Физика Земли. 1998. №4. С. 55—61.
- 29. Захаркин, А.К. Разработка аппаратурно-методического обеспечения импульсной индуктивной электроразведки для нефтепоисковых работ в условиях Сибирской платформы: дисс. канд. техн. наук: 25:00:10 / Захаркин Александр Кузьмич Новосибирск, 2000. 133 с.

- 30. Захаркин, А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл» / А.К. Захаркин // Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981. 98 с.
- 31. Каменецкий, Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов / Ф.М. Каменецкий. Изд-во: ГЕОС, 1997. 159 с.
- 32. Каменецкий, Ф.М. О возможности разделения поляризационных и индукционных эффектов / Ф.М. Каменецкий, В.М. Тимофеев // Физика земли. —1984.— № 12. С. 89—94.
- 33. Каменецкий Ф.М. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды/ Ф.М. Каменецкий, Г.М. Тригубович, А.В. Чернышев Мюнхен: Вера Фарлаг, 2014. 58 с.
- 34. Каминский А.Е. Зондирование становлением поля ZondTEM1d // ZOND [Электронный pecypc]. URL: http://zond-geo.ru/software/electromagnetic-soundings/zondtem1d.
- 35. Карасев, А.П. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации/ А.П. Карасев, А.Б. Птицын, Е.Ю. Юдицких Новосибирск: Наука, 2005. 291 с.
- 36. Кауфман, А.А. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне / А.А. Кауфман, Г.М. Морозова Новосибирск: Наука, 1970. 123 с.
- 37. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах / Н.О Кожевников // Геология и геофизика, 2012. Т.53 №4. С. 527—540.
- 38. Кожевников, Н.О. Метод переходных процессов при изучении геологических сред с магнитной вязкостью / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, Г.Г. Матасова, Я.К. Камнев // Геофизический журнал. 2012. № 4. С. 137—149.
- 39. Кожевников, Н.О. Инверсия данных МПП с учетом быстропротекающей индукционновызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства. / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геофизика, 2007 С. 42—50.
- 40. Кожевников, Н.О. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред. / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геофизический журнал.— Киев, 2009.— Т.31.— С. 104—118.
- 41. Кожевников, Н.О. Моделирование влияния диэлектрической релаксации в мерзлых породах на переходную характеристику незаземленной петли / Н.О. Кожевников, И.В. Артеменко // Криосфера Земли, 2004.— т. VIII. №2. С. 30—39.

- 42. Комаров, В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации / В.А. Комаров Л. Недра, 1980. 391 с.
- 43. Компаниец, С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы. / С.В. Компаниец. // 5-ая всероссийская школа-семинар имени М.Н. Бердичесвкого и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли ЭМЗ-2011: Материалы конференции. В двух книгах. Книга 2. СПб: СПбГУ. 2011. С. 187—189.
- 44. Компаниец, С.В. Интерпретация данных ЗСБ с учетом параметров индукционновызванной поляризации [Электронный сборник] / С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников // 1-ая Международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «Геобайкал-2010». Сборник трудов. Иркутск: Изд-во EAGE Publications BV., 2010.
- 45. Компаниец С.В. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла Сибирской платформы / С.В. Компаниец, О.В. Токарева, А.В. Поспеев, И.К. Семинский // Вестник ИрГТУ. 2014. № 88 (5). С. 53-57.
- 46. Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной электрической поляризации верхней части разреза Восточной Сибири. [Электронный сборник] / С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов. // 5-ая Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «Санкт-Петербург 2012. Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр»: Тезисы докладов. СПб. 2012.
- 47. Компаниец, С.В. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом 3СБ/ С.В. Компаниец, Н.О.Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геофизика. 2013. №2. С. 35—40.
- 48. Компаниец, С.В. Интерпретация данных 3D 3CБ с учетом параметров индукционновызванной поляризации. [Электронный сборник] / С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Е.В. Мурзина. // 19-ая международная научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2017»: Тезисы докладов. Геленджик, 2017.
- 49. Компаниец С.В. Применение многоразносных установок на юге Сибирской платформы [Электронный сборник] / С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Ю.А. Агафонов // 20-ая международная научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и

- разработки месторождений нефти и газа «Геомодель-2018»: Тезисы докладов. Геленджик, 2018.
- 50. Компаниец, С.В. Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопоисковых исследованиях на юге Сибирской платформы. / С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Е.В. Мурзина, В.С. Емельянов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, 2019. Т. 42. № 2. С. 151—165.
- 51. Куликов, А.В. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации / А.В. Куликов, Е.А. Шемякин М.: Недра, 1978 157 с.
- 52. Куликов, А.В. Вызванная поляризация в электрических и магнитных полях заземлённых и незаземлённых источников поля / А.В. Куликов, Е.А. Шемякин // Индукционные исследования верхней части земной коры. М.: ИЗМИРАН, 1985. С. 98—99.
- 53. .Куликов, В.А. Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов / В.А.Куликов, А.Г. Яковлев Геофизика. 2008. №6 С. 55-60.
- 54. Корольков, Ю.С. Зондирование становлением электромагнитного поля для поиска нефти и газа / Ю.С Корольков М.: Недра, 1987 117 с.
- 55. Крылов С.С. Аномальная поляризуемость гетерогенных сред при электромагнитных зондированиях / С.С., Крылов, Н.Ю. Бобров // Вопросы геофизики, Выпуск 35, Спб., 1998. С. 148 161.
- 56. Кудрявцева Е.О. Критерии оценки продуктивности нефтегазовых залежей на основе геолого-математического моделирования связанных с ними зон вторичной сульфидизации: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25:00:10/ Кудрявцева Елена Олеговна СПб.,2010. 20 с.
- 57. Кушмар И.А., Григоренко Ю.Н., Ананьев В.В., Белинкин В.А., Губина Е.А. Нефть и газ Восточной Сибири. СПб., Недра, 2006 102 с.
- 58. Легейдо, П.Ю. Дифференциально-нормированные методы электроразведки / П.Ю. Легейдо, М.М. Мальдембаум, Н.И. Рыхлинский Иркутск: БУК, 1996. 145 с.

- 59. Легейдо, П.Ю. Проявление эквивалентности поляризационных свойств одномерных сред по измерениям многоразносной установкой ЗСБ на Сибирской платформе / П.Ю. Легейдо, Е.В. Агеенков, И.Ю. Пестерев, С.В.Яковлев // Геофизика. №3.— 2016, С 46—54.
- 60. Мандельбаум, М.М. Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе / М.М. Мандельбаум, Б.И. Рабинович, В.С. Сурков. Москва: Недра, 1983. —128 с.
- 61. Мандельбаум, М.М. Современное состояние и перспективы применения дифференциально-нормированного метода электроразведки для поисков нефти и газа / М.М. Мандельбаум, Е.В. Агеенков, П.Ю. Легейдо, И.Ю. Пестерев, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика, 2002. №12 С. 1137—1143.
- 62. Матвеев, Б.К. Электроразведка: Учеб. для вузов / Б.К. Матвеев. М.: Недра, 1990. 368 с.
- 63. Могилатов, В.С. Импульсная электроразведка: Учебное пособие / В.С. Могилатов. Новосибирск: НГУ, 2014. 182 с.
- 64. Могилатов, В.С. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». / В.С. Могилатов, А.К. Захаркин, А.В. Злобинский. Новосибирск: «ГЕО». 2007. 156 с.
- 65. Молчанов, А.А. Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях. / А.А. Молчанов, В.А. Сидоров, Ю.В. Николаев, А.М. Яхин // Физика Земли, 1984. N 1. С. 100—103.
- 66. Митюхин, С.И. О геологической природе знакопеременных переходных процессов в Западной Якутии / С.И. Митюхин // Геология и геофизика, 1985. N 1. С. 103—106.
- 67. Михалевский, В.И. Электрическая разведка методом теллурических токов в Восточной Сибири/ В.И. Михалевский.— М.: Недра, 1987. 205 с.
- 68. Михалевский, В.И. Геологическая эффективность съемки ТТ на юге Сибирской платформы / В.И. Михалевский // «Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири». Сборник научных трудов.— Иркутск, 1987. С.116—119.
- 69. Моисеев, В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей / В.С. Моисеев. Новосибирск: Наука, 2002 136 с.

- 70. Мурзина, Е.В. Методика применения автоматической инверсии для данных 3D 3CБ / Е.В. Мурзина, В.С. Емельянов, О.В. Токарева, С.В. Компаниец, И.В. Буддо, Ю.А. Агафонов // 4-ая международная научно-практическая конференция «Геобайкал 2016» Иркутск, 2016.
- 71. Мурзина, Е.В. Подход к оценке качества автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований/ Е.В. Мурзина, В.С. Емельянов, А.В. Поспеев, А.Ю. Агафонов // «Строение литосферы и геодинамика»: тезисы докладов.— Иркутск, 2017.— С. 159–161.
- 72. Панкратов, В.М. Результаты электроразведочных работ методом ЗСБ на Марковской и Потаповской площадях / В.М. Панкратов // Изучение нефтегазоносности Сибирской платформы геофизическими методами: сборник статей.— Новосибирск, 1980. Вып. 281.
- 73. Панкратов, В.М., Геоэлектрические модели горизонтально-слоистого разреза Непского свода. / В.М. Панкратов, К.С. Турицын «Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири»: сборник научных трудов. Иркутск, 1987. С.131—135.
- 74. Полетаева, Н.Г. Геоэлектрическая модель Ярактинского месторождения / Н.Г. Полетаева, К.С. Турицын // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом ЗСБ: Сборник трудов. Новосибирск: СНИИГиМС, 1988. С.82—95.
- 75. Поспеев, А.В. Современная практическая электроразведка. / А.В. Поспеев, И.В. Буддо, Ю.А. Агафонов, М.В. Шарлов, С.В. Компаниец, О.В. Токарева, Н.В. Мисюркеева, В.В. Гомульский, Л.В. Суров, А.И. Ильин, В.С. Емельянов, Е.В. Мурзина, Р.Г. Гусейнов, И.К. Семинский, Р.В. Шарлов, А.Г. Вахромеев, Е.А. Сень. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 231 с. ISBN 978-5-9909584-1-8.
- 76. Поспеев, А.В. Применение компьютеризированной аппаратуры СГС-ТЕМ при исследованиях методом ЗСБ / А.В. Поспеев, А.М. Пашевин, А.Л. Яговин // Геофизика. Специальный выпуск к 50-летию Иркутскгеофизика. 1999. с.45—46.
- 77. Поспеева, Е.В. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазаносной провинции. / Е.В. Поспеева, В.И. Поспеев // «Обеспечение научнотехнического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири»: сборник научных трудов. Иркутск, 1987. С.107—116.

- 78. Рабинович, Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: Конспект лекций. / Б.И. Рабинович. — Иркутск: ИПИ, 1987. — 52 с.
- 79. Рабинович Б.И. Результаты применения метода ЗСБ на Сибирской платформе. / Б.И. Рабинович, В.С. Сурков // «Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике»: сборник научных трудов. Новосибирск, 1978. С. 3—18.
- 80. Самсонов B.B., Ларичев А.И., Чеканов В.И., Соловьев B.B. особенности нефтегазовых геологического строения комплексов И оценка перспектив нефтегазоносности южной части Сибирской платформы / В.В. Самсонов, А.И. Ларичев, В.И. Чеканов, В.В. Соловьев // «Геология и геофизика». — 2010.— №11 — С. 1545—1564.
- 81. Семинский И.К. Оптимизация методики ЗСБ на предполевом и интерпретационном этапах средствами 3D моделирования: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук 25.00.10 / Семинский Игорь Константинович. Иркутск, 2017. 24 с.
- 82. Светов, Б.С. Основы геоэлектрики. / Б.С. Светов.— М.: Издательство ЛКИ, 2008. 656 с.
- 83. Сидоров, В.А. Электроразведка становлением поля в ближней зоне. / В.А, Сидоров, В.В Тикшаев. Саратов: Изд-во НВНИИГГ, 1969. 58 с.
- 84. Суров, Л.В. Создание единой эффективной программной среды обработки, визуализации и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований / Л.В. Суров // 2-ая Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о Земле: Тезисы докладов. Новосибирск: изд-во Новосиб. гос. ун-та., 2004. С. 162—163.
- 85. Стогний, В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции / В.В. Стогний // Криосфера Земли, 2008. № 4. С. 46—56.
- 86. Стогний, В.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов / В.В. Стогний, Ю.В. Коротков. Новосибирск, 2010. С. 29—34.
- 87. Тригубович, Г.М. Феноменология вызванной поляризации/ Г.М. Тригубович, Ф.М. Каменецкий // Геофизика, 2013. № 1. С. 80—83.
- 88. Тригубович, Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D электроразведка становлением поля /. Г.М. Тригубович, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик Новосибирск: Наука, 2009. 214 с.

- 89. Турицын, К.С. Статьи по петрофизике / К.С. Турицын. Ангарск, 2016. 116 с.
- 90. Фомичева, Л.Н. Геолого-исторические предпосылки формирования нефтегазоносных комплексов юга Сибирской платформы (в связи с выбором направлений нефтегазопоисковых работ): дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.17 / Фомичева Людмила Николаевна. Москва, 1984. 205 с.
- 91. Хмелевской, В.К. Электроразведка. Учебник / В.К. Хмелевской. М.: МГУ, 1984. 422 с.
- 92. Шарлов, М.В. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap / М.В. Шарлов, Ю.А. Агафонов, С.М. Стефаненко // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. №1. с.27—31.
- 93. Шкиря, М.С. О связи наличия углеводородов и эпигенетических сульфидов на юге Якутии / М.С. Шкиря, Ю.А. Давыденко // Записки Горного института, 2017. Т.227 С. 523—529.
- 94. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Тверь: «ПолиПРЕСС», 2018. Т.1. 274 с.
- 95. Эпов, М.И. Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложно-построенных геологических сред / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Геология и геофизика. 2000. т. 41. № 6. с. 920—929.
- 96. Эпов М.И. Прямые задачи электромагнитных зондирований с учётом дисперсии
- 97. геоэлектрических параметров / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Физика Земли. 1999. № 34. С. А48—А55.
- 98. Эпов, М.И. Связь частотной дисперсии электромагнитных параметров и пространственной неоднородности с высоким разрешением в электроразведке / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов, Е.В. Павлов // Геология и геофизика. 2004.— т. 45— №6 с.742—751.
- 99. Flis, F.M. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements / F.M. Flis, F.M., G.A. Newman, G.W. Hohman // Geophysics. 1989. 54. p. 514—523.
- 100. Gazoty, A. Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. / A. Gazoty, G. Fiandaca, J. Pedersen, E. Auken, A.V. Christiansen // Hydrology and Earth System Sciences. 2012 16 p.1793—1804.

- 101. Guseinov, R. Multilevel control system for evaluation of transient electromagnetic responses quality and reliability / R. Guseinov, Y. Agafonov, I. Buddo, M. Sharlov, S. Kompaniets // Geobaikal 2012 2nd EAGE International Research and Application Conference on Electromagnetic Research Methods and Integrated Geophysical Data Interpretation. DOI: 10.3997/2214-4609.20143543
- 102. Kozhevnikov, N.O. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies / N.O. Kozhevnikov, E.Y. Antonov //Geophysical Prospecting. 2006. 54 p. 383—397.
- 103. Kozhevnikov N.O, The effect of the Siberian flood basalts magnetic viscosity on a TEM sounding response / N.O. Kozhevnikov, Yu.A. Agafonov, I.V. Buddo, S.V. Kompaniets // 23rd EMIW. Chiang Mai, Thailand, 2016.
- 104. Lee, T., Transient electromagnetic response of a polarizable ground: Geophysics/ T.J. Lee // Geophysics. 1981. Vol. 46. № 7. p. 1037—1041.
- 105. Marchant D., Haber E. and Oldenburg D.W. 2013. Inductive source induced polarization. Geophysical Journal International 192, 602–612.
- 106. Marchant D., Haber E., and Oldenburg D.W. Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data // Geophysics, VOL. 79, NO. 6 (2014); P. E303–E314
- 107. McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques. Missasagua, Canada: Geonics Limited. TN 7, 1980. 17 p.
- 108. Near-surface geophysics. Edited by Dwain K. Butler. Society of Exploration Geophysicists, 2005, 732 p.
- 109. Oldenburg, D. W. Inversion of induced polarization data/ D. W. Oldenburg, Y. Li // Geophysics. 1994. 59. p.1327—1341.
- 110. Oshmarin R.A., Ostankov A.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V. Capabilities and Limitations of Electromagnetic Techniques in Eastern Siberia. Society of Petroleum Engineers, 2016. doi:10.2118/182082-MS.
- 111. Pelton, W.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R.Sill, P.H. Nelso. // Geophysics. 1978.—43 p.588—609.
- 112. Raiche, A.P. Negative transient voltage and magnetic field response for a half-space with a Cole-Cole impedance / A.P Raiche // Geophysics. 1983 48 p. 790–791.

- 113. Raiche, A.P.The use of Cole-Cole impedance to interpret the TEM response of layered earth / A.P Raiche, L.A. Bennett, R.J. Clark, Smith R.J. // Exploration Geophysics.—1985.—16. p. 271—273.
- 114. Reynolds, J.M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysical./ J.M. Reynolds Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1997.—796 p.
- Siedel, M. 1D Cole-Cole inversion of TEM transients influenced by induced polarization. /
 M. Siedel, B. Tezkan // Journal of Applied Geophysics.— 2017.— 138— p. 220— 232.
- 116. Smith, R.S. The time-domain electromagnetic response of polarizable bodies: an approximate convolution algorithm / R.S., Smith, P.W., Walker, B.D., Polzer, G.F. West // Geophysical Prospecting. 1988. 36. p.772—785.
- 117. Spies, B.R. A field occurrence of sign reversals with the transient electromagnetic method. / B.R. Spies // Geophysical Prospecting. —1980. vol. 28— p. 620—632.
- 118. Sternberg, B. K. Review of some experience with the induced-polarization/resistivity method for hydrocarbon surveys. Successes and limitations / B. K. Sternberg // Geophysics. 1991. 56(10) 1522—1532.
- 119. Veeken P. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration / P. Veeken, P.J. Legeydo, Y.A. Davidenko, E.O. Kudryavceva, S.A. Ivanov, A.Chuvaev // Geophysics. 2009. vol.74.— 2.— p. B47—B59.
- 120. Veeken P.Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components / P. Veeken, P.J. Legeydo, Y.A. Davidenko, E.O. Kudryavceva, S.A. Ivanov // First break. 2009. —vol.27. p. 53—64.
- 121. Weide1t P. Response characteristics of coincident loop transient electromagnetic systems. / P. Weide1t // Geophysics. 1982. vol. 47. 7.—p.1858—1862.