

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

**Научный  
руководитель:**

**Кожевников Николай Олегович,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник ФГБУН Институт  
нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, лаборатория  
геоэлектрики, профессор, г. Новосибирск

**Официальные  
оппоненты:**

**Куликов Виктор Александрович,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
доцент ФГБОУ ВО «Московский государ-  
ственный университет им. М.В. Ломоносова»,  
кафедра геофизических методов исследования  
земной коры, г. Москва

**Татьков Иван Геннадьевич,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
начальник Инженерного центра  
ФГБУН Геологический институт СО РАН,  
г. Улан-Удэ

**Ведущая организация:**

**ФГБУН Институт земной коры СО РАН,**  
г. Иркутск

Защита состоится 17 декабря 2020 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.01 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ, ауд. Е-301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Отзывы на диссертацию и автореферат просим представлять в диссертационный совет не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. Отзыв в 2 экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ, диссовет Д 212.073.01 (тел. +7-914-927-05-88, e-mail: [bnolzoev@yandex.ru](mailto:bnolzoev@yandex.ru)).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.073.01



Олзоев Борис Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

*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.

Эффективным инструментом для изучения толщ, перспективных на обнаружение углеводородов, является сейсморазведка. Информация о структурном строении нефтегазоносной площади необходима для прогнозирования разреза. Однако существуют регионы, где информативность сейсморазведки снижается ввиду особенностей геологического строения осадочного чехла. На юге Сибирской платформы это 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 (УЭС) горных пород. По значениям этого параметра судят о вещественном составе, насыщенности пород флюидами, коллекторских свойствах и др.

При нефтегазопоисковых исследованиях на юге Сибирской платформы используется преимущественно метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). С помощью этого метода решаются задачи изучения строения осадочного чехла и поверхности фундамента, выявления коллекторов и оценка их параметров, картирования тектонических нарушений и др.

В последние годы при проведении работ методом ЗСБ стали массово регистрировать сигналы, осложненные влиянием вызванной поляризации (ВП). 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 ( $\rho_e(t)$ ,  $S_e(H_e)$ ), а также получить информацию о поляризуемости горизонтов. Ряд авторов отмечает высокую эффективность метода ВП при оценке нефтеперспективности площадей при поисках глубокозалегающих залежей углеводородов в Западной Сибири, а также при морских работах [Корольков, 1987; Моисеев, 2002; Veeken et al., 2009].

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.

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

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ данных ЗСБ, полученных с многообразными установками на юге Сибирской платформы, на предмет оценки эффектов ВПИ и их районирования.
2. Средствами математического моделирования изучить влияние параметров модели Cole-Cole, мощности слоев осадочного чехла юга Сибирской платформы и геометрии установки на переходные индукционные характеристики.
3. Разработать методические рекомендации по интерпретации данных ЗСБ 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.

**Защищаемые научные результаты:**

1. Многообразные 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:***

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

С генераторными петлями, применяющимися для решения нефтегазопроисловых задач на юге Сибирской платформы, индукционно-вызванная поляризация значительно 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.

***Фактический материал.*** 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, P. 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 данные получены с применением цифровой телеметрической станции SGS-TEM (А.В. Поспеев, М.В. Шарлов, Ю.А. Агафонов) в ходе решение нефтегазопроисловых 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 полу-

чении этих результатов автор принимал непосредственное участие (методический контроль полевых работ, камеральные работы). При анализе использованы индукционные переходные характеристики и их трансформанты на более чем 70 000 зондирований.

Математическое моделирование и инверсия кривых ЗСБ 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-Geo» (А.Е. Каминский и др.).

***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 результатов.*** 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 исследования по теме диссертации докладывались на конференциях и семинарах различного уровня: на 6-ой международной научно-практической конференции «Геофизика» (Санкт-Петербург, 2007), на международном научном конгрессе «Гео-Сибирь» (Новосибирск, 2008, 2011), на первой междуна-

родной 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 EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE (Barcelona, 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 Electromagnetic 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, 8 в материалах и тезисах международных и всероссийских конференций, в т.ч. 1 статья в международной базе данных Scopus.

#### ***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.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем – 104 страницы, 50 рисунков, 2 таб-

лицы. Библиографический список используемых источников содержит 120 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования и научные задачи, изложены результаты, выносимые на защиту, дается характеристика их новизны и достоверности.

### **Глава 1. Геоэлектрическая модель осадочного чехла юга Сибирской платформы**

С начала работ методом ЗСБ на юге Сибирской платформы геоэлектрическая модель уточнялась по мере того, как совершенствовались средства измерения и интерпретации данных. Развитие программных средств инверсии и повышение точности ЗСБ позволили реализовать детальную интерпретацию данных. *Типичная геоэлектрическая модель* состоит из 8–15 горизонтов, границы которых, за исключением верхних, обычно закрепляются по данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018].

В разрезе осадочной толщи юга Сибирской платформы выделяются надсолевой, солевой и подсолевой комплексы, ниже которых расположен кристаллический фундамент. Первый комплекс включает отложения среднего-верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также отложения ордовика, перми, карбона, триаса, юры и четвертичные. Мощность отложений составляет 0–500 м. Комплекс характеризуется УЭС в диапазоне от 30 до 2000 Ом·м и подразделяется на несколько геоэлектрических горизонтов.

Солевой комплекс представлен галогенно-карбонатными породами среднего и нижнего кембрия. Он включает отложения литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит. Его суммарная мощность изменяется от 750 до 1300 м, удельное сопротивление составляет 45–500 Ом·м. По данным ЗСБ комплекс разделяется на 4–6 геоэлектрических горизонта.

Отложения подсолевого комплекса стратиграфически соотносятся с карбонатными, сульфатно-карбонатными и терригенными отложениями венд-нижнего кембрия. Они включают: нижнюю часть усольской свиты – осинский горизонт, отложения тирской, собинской, катангской, тэтэрской, и непеской свит. Мощность комплекса составляет 250–400 м, УЭС – от 20 до 150 Ом·м. В пределах интервала выделяется до 6 горизонтов-коллекторов, что понижает продольное сопротивление комплекса. По данным ГИС и ЗСБ подсолевой комплекс дифференцируется на 2–3 геоэлектрических горизонта с различным УЭС.



## Проявления ВПИ на юге Сибирской платформы

Начиная с 60-70-х гг. прошлого столетия, в литературе появляются сообщения о заметных – вплоть до смены полярности ЭДС – нарушениях монотонности индукционных переходных характеристик [Молчанов и др., 1984; Spies, 1980]. Поскольку такие «искажения» наблюдались, в том числе совмещенными установками, был сделан вывод о том, что причина появления таких искажений является индукционно-вызванная электрическая поляризация [Вопросы поляризации..., 1985; Flis et al., 1989; Lee, 1981; Weidelt, 1983; Губатенко, Тикшаев, 1979]. В Сибири массовые проявления ВПИ наблюдались сначала в Западной Якутии при поисках кимберлитовых тел с помощью метода переходных процессов [Жандалинов, 2011; Митюхин, 1985; Сидоров, 1985; Стогний, 2008; Стогний, Коротков, 2010; Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2012]. В этих работах описываются результаты измерений с генераторной петлей 200×200 м и менее, которые были осложнены быстропротекающей индукционно-вызванной поляризацией (БВП).

Что касается измерений с установками больших размеров (500×500 м и больше), то в отчетах 80-х годов упоминается о кривых  $\rho$ , правые ветви которых не удавалось проинтерпретировать. Такие зондирования отбраковывались, поскольку в то время не существовало способов интерпретации данных ЗСБ учетом ВПИ.

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

О проявлениях ВПИ на юге Сибирской платформы свидетельствуют данные массовых съемок ЗСБ последних лет. Между правыми ветвями кривых кажущегося сопротивления, измеренных соосной и разнесенными установками, наблюдается характерное расхождение (рис.1).

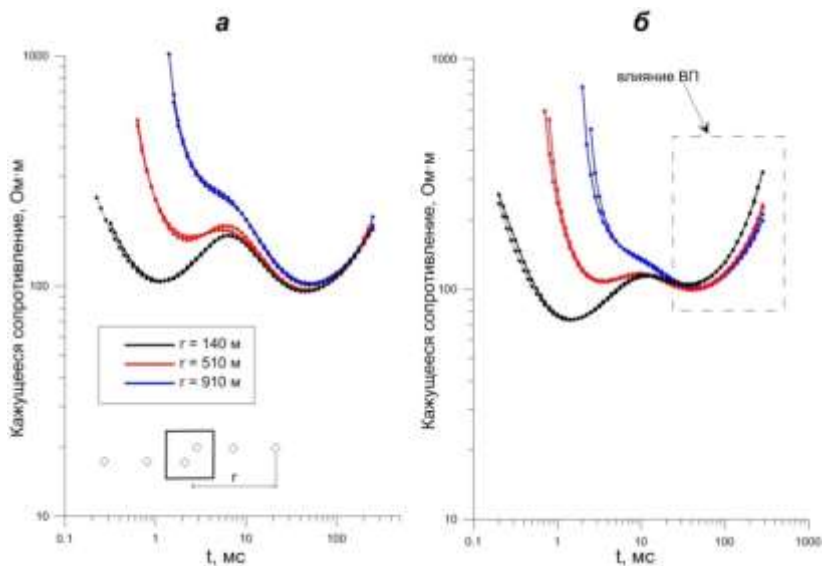


Рисунок 1 – Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{\tau}(t)$ , зарегистрированные на Непском своде: а – без влияния ВПИ, б – осложненные влиянием ВПИ.

## Глава 2. Математическое моделирование переходных характеристик ЗСБ с учетом ВПИ

Для обоснования возможности изучения ВПИ методом ЗСБ автором выполнено математическое моделирование. Применительно к типичной геоэлектрической модели осадочного чехла юга Сибирской платформы рассчитаны индукционные переходные характеристики при различных параметрах геоэлектрического разреза, геометрии установки и других факторов.

Для решения прямой задачи использовалась программа Model 4 (Поспеев, Емельянов, Суков, 2018), в которой для учета параметров ВПИ используется формула Cole-Cole.

Известно несколько моделей для описания процессов ВПИ, среди которых наиболее востребованной является модель Cole-Cole. Для комплексного удельного сопротивления она имеет вид [Pelton, 1978]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - \eta \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (1.1)$$

где  $i$  – мнимая единица,  $\omega$  – круговая частота,  $\rho_0$  – удельное УЭС на постоянном токе,  $\eta$  – поляризуемость,  $c$  – показатель степени,  $\tau$  – время

релаксации. Диапазон возможных значений  $\eta$  от нуля до единицы,  $\tau$  – от нуля до бесконечности, параметра  $c$  – от нуля до единицы.

Применительно к геологическим условиям юга Сибирской платформы наиболее важными результатами математического моделирования являются:

- увеличение размеров генераторной петли приводит к «сдвигу» проявления ВПИ в область поздних времен. Для генераторной петли размером 500×500 м влияние ВПИ становится заметным на временах более 40 мс;

- сильнее всего эффекты ВПИ проявляются при расположении приемной петли внутри генераторной;

- эффекты ВПИ связаны, преимущественно, с поляризующимися породами в верхней части разреза (до 300–400 м). Для поляризующихся слоев, расположенных в средней части разреза, эффекты ВПИ проявлены на всех разносах, однако их влияние ВПИ может быть замечено только в том случае, если поляризуемость превышает 0.6. При положении горизонта в нижней части разреза влияние ВПИ не проявляется.

- при неизменной поляризуемости, уменьшение УЭС и возрастание мощности поляризующегося слоя приводит к усилению эффекта ВПИ;

Эти результаты положены в основу методического обеспечения интерпретации данных ЗСБ с учетом вызванной поляризации.

### **Глава 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.

Качество инверсии зависит от априорной (стартовой) геоэлектрической модели. Для построения стартовой модели используются все имеющиеся геолого-геофизические данные. Необходимым этапом является анализ факторов, влияющих на данные ЗСБ; среди этих факторов вызванная поляризация пород играет важную роль.

#### **Анализ сигналов ЗСБ на предмет проявления ВПИ**

Методическим приемом, который уже при регистрации данных ЗСБ позволяет распознавать эффект ВПИ, является использование многоразносных установок. Такие установки представляют собой ком-

бинацию генераторной петли и нескольких приемных петель (рис. 2). Каждая приемная петля соответствует точке наблюдения ЗСБ.

Особенностью многоразностных установок является различное влияние на переходные характеристики вызванной поляризации, магнитной вязкости и геоэлектрических неоднородностей. Благодаря этому возможно распознать и отличить эти эффекты [Компаниец и др., 2010, 2018; Буддо, 2012; Семинский, 2017].

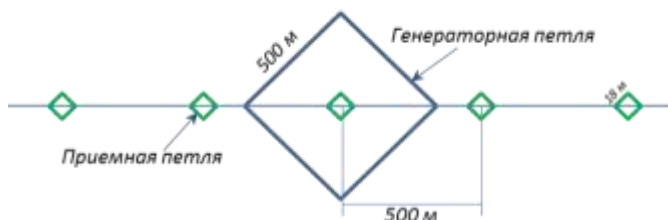


Рисунок 2 – Многоразностная установка, применяемая для профильных работ методом ЗСБ на юге Сибирской платформы

Как известно, влияние ВПИ проявляется в повышении  $\rho_t$  на кривых, зарегистрированных на соосных пикетах (по сравнению с разнесенными). На юге Сибирской платформы этот эффект наблюдается, начиная с временных задержек 20–60 мс. Завышение  $\rho_t$  происходит вследствие того, что на поздних временах поляризационные токи протекают в направлении, противоположном тому, в котором протекают вихревые токи [Smith et al., 1988; Flis et al, 1989].

Эффективным способом оценки присутствия и степени проявления ВПИ на кривых ЗСБ является использование параметра  $\Delta S$  [Гусейнов, 2015; Компаниец и др., 2019].

Параметр  $\Delta S$  определяется по графикам зависимости кажущейся проводимости  $S_t$  от кажущейся глубины  $H_t$ . Он характеризует расхождение ветвей кривых  $S_t(H_t)$ , записанных на соосном и разнесенных пикетах. Кажущаяся глубина для оценки  $\Delta S$  выбирается на отметке (более 2000 м), на которой расхождение ветвей кривых проявляется статистически уверенно. Расчет  $\Delta S$  выполняется по формуле:

$$\Delta S = \frac{S(H) - S_p}{S_p} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где  $S(H)$  – суммарная кажущаяся проводимость на кажущейся глубине  $H$ , полученная на пикетах, которые расположены внутри петли,  $S_p$  – среднее значение проводимости, полученное на разнесенных пикетах.

$\Delta S$  имеет отрицательный знак и чем сильнее проявлены эффекты ВПИ, тем меньше величина параметра.

Для 30 участков (около 70 000 точек ЗСБ) на юге Сибирской платформы, где проведены работы методом ЗСБ, рассчитан параметр  $\Delta S$  и проанализировано его распределение. На рисунке 3 представлена диаграмма, которая показывает соотношение количества точек с проявлениями ВПИ и без проявлений. Как видно, более 60 % кривых ЗСБ, полученных на юге Сибирской платформы, подвержены влиянию вызванной поляризации.

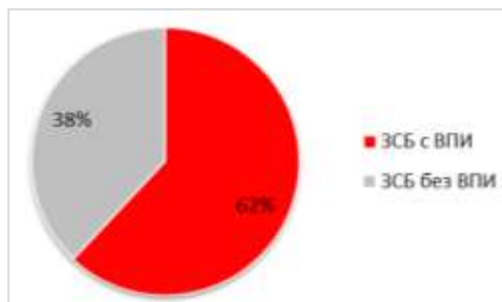


Рисунок 3 – Диаграмма, иллюстрирующая соотношение данных ЗСБ с проявлением ВПИ и без проявлений (на основе анализа более 70000 точек ЗСБ)

### Интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ

В зависимости от этапа работ и типа съемки (профильная или площадная) количество наблюдений на одном участке может составлять от 50–300 до десятков тысяч точек. При площадных наблюдениях с высокой плотностью точек ЗСБ объем 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 (рис. 4).

#### 1. Оценка расхождения кривых $S_T(H_T)$ .

На данном этапе рассчитывается параметр  $\Delta S$ . На основе полученных значений строится карта  $\Delta S$  по площади и оценивается распределение влияния ВП по площади.

#### 2. Подбор геоэлектрических моделей на опорных точках

Среди точек, на которых кривые ЗСБ подвержены влиянию ВПИ, выбираются опорные. Инверсия индукционных переходных характеристик на опорных точках проводится на основе априорной гео-

электрической модели, составленной с учетом имеющейся геолого-геофизической информации (как правило, мощности закрепляются по данным сейсморазведки).

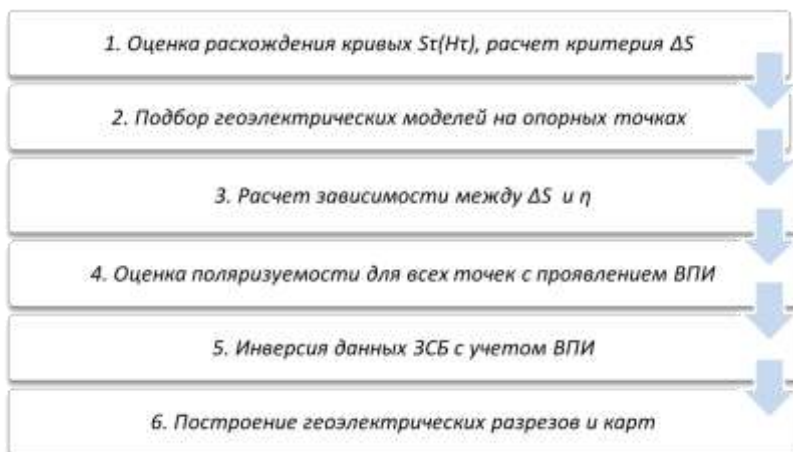


Рисунок 4 – Последовательность этапов при интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ

Для каждой многоразносной установки сначала выполняется инверсия переходных характеристик, измеренных на разнесенных пикетах без учета ВП. Обоснованием этого служит тот факт, что при больших разносах уменьшается относительный вклад ВПИ в суммарную переходную характеристику. Найденные таким образом значения УЭС используются в качестве стартовых при инверсии (в данном случае с учетом ВП) переходных характеристик, зарегистрированных на соосном пикете.

Предполагается, что текстурно-структурные особенности поляризующихся пород, которые характеризуют данные параметры, выдержаны по площади. Поэтому параметры  $\tau$  и  $c$  закрепляются, что позволяет снизить эквивалентность подбираемых геоэлектрических моделей. Значения  $\tau$  и  $c$  выбираются на основе результатов интерпретации данных ЗСБ на соседних площадях, а также на опорных точках изучаемого участка.

Таким образом, результатом этого этапа являются геоэлектрические модели на опорных точках с учетом ВПИ.

### 3. *Определение зависимости $\Delta S(\eta)$*

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 на поздних временах (по сравнению с измеренными на поверхности неполяризуемой среды). Это отражается на суммарной кажущейся проводимости для глубины  $H$ . Рост поляризуемости приводит к увеличению расхождения между кривыми  $S_T(H_T)$  для поляризуемой и неполяризуемой сред.

Для расчета зависимости используются опорные геоэлектрические модели, сформированные на этапе 2. Для каждой модели изменяются значения  $\eta$  с заданным шагом и рассчитываются кривые и расхождение кривых  $\Delta S$ .

### 4. *Оценка поляризуемости для всех точек с проявлением ВПИ*

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

### 5. *Инверсия данных ЗСБ с учетом ВПИ*

На данном этапе выполняется подбор геоэлектрических моделей для всех точек площади. В качестве стартовых УЭС используются значения, найденные на опорных точках; мощности закрепляются на основе структурного каркаса. В качестве стартовых значений поляризуемости применяются оценки, полученные на этапе 4.

Инверсия массовых данных ЗСБ с учетом ВПИ осуществляются с помощью модуля автоматической инверсии с выбором соответствующего графа [Мурзина и др., 2016, 2017; Поспеев и др., 2018]. В процессе инверсии для каждого искомого параметра отыскивается значение, при котором достигается *оптимальная невязка* между экспериментальными и модельными данными.

### 6. *Построение геоэлектрических разрезов и карт*

Если инверсию данных ЗСБ проводить без учета ВПИ на геоэлектрических разрезах и картах в нижних и средних слоях разреза появляются области повышенного УЭС, которые противоречат имеющимся представлениям о геологическом строении осадочного чехла.

Если границы геоэлектрических горизонтов не закреплены, то интерпретация данных ЗСБ без учета ВП приводит к завышению кровли опорного высокоомного горизонта в моделях для соосных пикетов [Стогний, 2008].

#### **Глава 4. Результаты инверсии данных ЗСБ с учетом индукционно-вызванной поляризации**

В главе приводятся результаты интерпретации материалов ЗСБ с учетом индукционно-вызванной поляризации. В качестве типичных примеров рассмотрены два участка юга Сибирской платформы, характеризующиеся различными геоэлектрическими условиями.

##### **Средне-Окинский участок**

Средне-Окинский участок располагается в юго-западной (Присаянской) части Иркутского амфитеатра. Геологическое строение участка типично для юга Сибирской платформы. Залегание пород – горизонтально-слоистое. Разрез осадочного чехла слагают породы венд-кембрийского, кембрийского, ордовикского и юрского возраста. Перспективными в нефтегазоносном отношении являются карбонатные и терригенные отложения подсолевого комплекса.

Для картирования и оценки параметров коллекторов в поселовой части разреза была применена методика профильных зондирований. В качестве источника электромагнитного поля использовалась незаземленная квадратная петля размером 500×500 м. Приемные петли размером 18×18 м располагались на пяти разносах 0, 500 и 1000 м. Временной диапазон измерений переходных характеристик составил 0.1 – 500 мс, ток в генераторной петле – от 10 до 150 А.

Анализ данных ЗСБ показал, что большинство переходных характеристик, измеренных на соосном и разнесенных пикетах, расходятся. Характер расхождения свидетельствует о том, что оно возникает вследствие индукционно-вызванной поляризации [Компаниец и др., 2013]. Подобное расхождение наблюдается повсеместно. Исключением является юго-восточная часть площади, где подобный эффект не наблюдается. Для переходных характеристик с проявлением ВПИ проведена инверсия без учета и с учетом ВП.

Если инверсия данных ЗСБ проводится без учета ВП, то на картах УЭС присутствует множество локальных аномалий. Это наглядно видно на рисунке 5а, где приведена карта УЭС карбонатного подсолевого комплекса, представляющего интерес в связи с возможным присутствием в нем коллекторов. Локальные аномалии повышенного сопротивления в точках, где измерения выполнены на соосных пикетах, не находят геологического объяснения. Учёт ВПИ приводит, во-первых, к исчезновению «точечных» (локальных) аномалий и, во-вторых, к понижению общего уровня сопротивлений на восточном фланге участка (рис. 5 б).



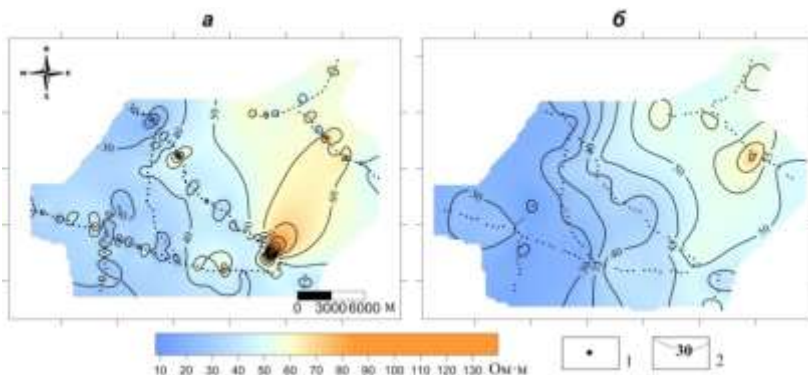


Рисунок 5 – Карты продольного сопротивления карбонатных отложений подсолевого комплекса: а – инверсия проводилась без учёта ВП, б – с учётом ВП: 1 – точки ЗСБ, 2 – изолинии УЭС, Ом·м.

Интересным и важным результатом интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ, является карта поляризуемости (рис. 6 а). Как можно видеть, значения параметра изменяются от 0.01 до 0.18. ВП уменьшается до значений менее 0.02 в юго-восточной части площади, а также незначительное уменьшение наблюдается на северо-западе. Максимальная аномалия поляризуемости (выше 0.16) располагается в центральной части площади.

Сопоставление карты поляризуемости и геологической карты (рис. 6 б) показало, что повышенные значения  $\eta$  отмечаются на участках распространения юрских пород. В связи с этим особый интерес представляет заларинская свита, в составе которой встречаются пиритизированные аргиллиты, а также угленосные формации с проявлениями графитовой и сульфидной минерализации.

Таким образом, логично предположить, что поляризуемость верхней части разреза связана здесь с вкрапленной сульфидной минерализацией. Это предположение согласуется с результатами, представленными в известной работе [Pelton, 1978], где показано, что значения  $\tau$  от 0.02–0.15 с и  $c = 0.5$  наблюдаются при концентрациях пирита в осадочных породах порядка 0.5–2 %.

Инверсия данных ЗСБ с учетом ВПИ позволила отдельно оценить УЭС карбонатных и терригенных отложений подсолевого комплекса и выполнить прогноз распространения коллекторов.

Оценка коллекторских свойств карбонатной и терригенной частей подсолевого комплекса, проведенная на основании корреляции между геоэлектрическими и коллекторскими свойствами пород [Тури-

цин, 2016; Поспеев и др., 2018], свидетельствует о широком распространении подсолевых коллекторов на исследуемой территории.

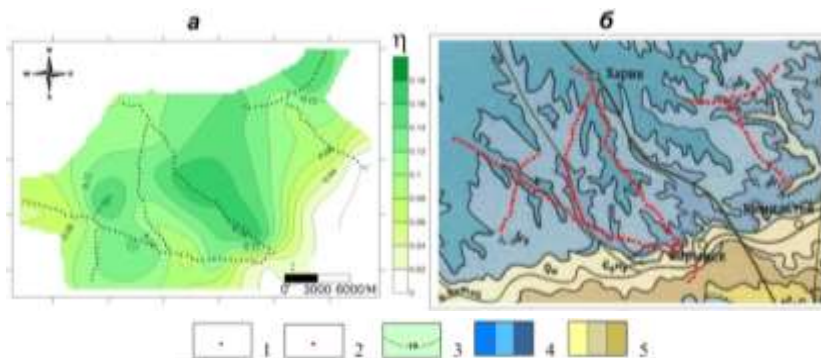


Рисунок 6 – Карта поляризуемости (а) и геологическая карта (б) в пределах Средне-Окинского участка: 1 – точки ЗСБ на карте поляризуемости, 2 – точки ЗСБ на геологической карте, 3 – изолинии поляризуемости, 4 – юрские породы, 5 – породы четвертичной системы.

### Тымпучикано-Вакунайский участок

Участок работ находится на юге Сибирской платформы, в восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы, на Непском своде. Разрез представлен юрскими породами, галогенно-карбонатными породами нижнего и среднего кембрия, в основании залегают карбонатные и терригенные отложения венда и нижнего кембрия. Целевые объекты – горизонты-коллекторы подсолевого комплекса.

Методом ЗСБ участок изучен по площадной сети наблюдений. Регистрация сигналов становления выполнена на 4482 ф.т. (350 км<sup>2</sup>) с применением многоразносной установки ЗСБ. Размер генераторной петли составил 600 м×600 м. Шесть приемных петель (18×18 м) располагались на разносах 140 м (внутри петли), 510 м и 900 м. Такая геометрия установки определялась необходимой глубиной исследований (2–3 км) в сочетании с сетью сейсмопрофилей для 3D МОГТ 200 м×200 м, которая использовалась для размещения и привязки источников и приемников поля.

## Результаты инверсии и геологическая интерпретация данных ЗСБ с учетом ВПИ

Проиллюстрируем распространение ВПИ на участке работ с помощью карты параметра  $\Delta S$  для кажущейся глубины 3000 м (рис. 7 а). Как отмечалось выше, отрицательный знак параметра свидетельствует о том, что расхождение между сигналами становления на соосном и разнесенных пикетах, указывает на влияние вызванной поляризации. Согласно карте  $\Delta S$ , влияние вызванной поляризации сильнее всего выражено на юго-востоке участка; по мере продвижения в северо-западном направлении это влияние уменьшается.

По результатам автоматической инверсии значения поляризуемости составляют 0.01–0.17. Время релаксации  $\tau$  и показатель степени  $c$  закреплялись на уровне, обеспечивающем оптимальную невязку в зонах с проявлением эффекта ВПИ ( $\tau = 0.1$  с,  $c = 0.6$ ).

Сопоставление карт поляризуемости и геологической карты указывает на связь повышенной поляризуемости и юрских отложений (рис. 7 б).

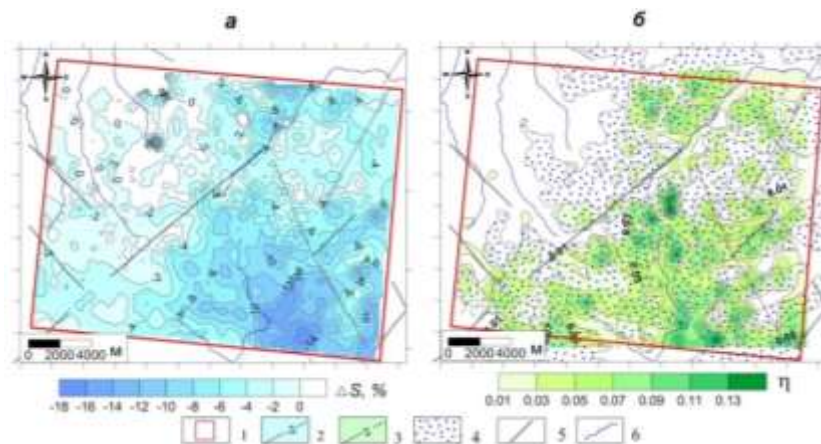


Рисунок 7 – Карты параметра  $\Delta S$  (а) и поляризуемости (б): 1 – контур участка работ, 2 – изолиния  $\Delta S$ , %, 3 – изолинии поляризуемости, 4 – отложения юры, 5 – тектонические нарушения, 6 – гидросеть.

Согласно описанию ядра 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 [Шкиря, Давыденко, 2017]. Кроме этого, имеются пропластки каменного угля и углистых аргилли-

тов, с которыми могут быть связаны проявления вызванной поляризации.

В ходе интерпретации подсолевой комплекс на исследуемом участке был разделен на три подгоризонта; перспективными являются верхний (карбонатный) и нижний (преимущественно терригенного состава). На рисунке 8 представлены гистограммы распределения продольного сопротивления верхнего подгоризонта подсолевой части осадочного чехла, найденные с учетом и без учета ВП. Как видно, 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 основной диапазон сопротивлений, определенных при инверсии данных ЗСБ, составляет 35–57 Ом·м. Согласно статистике, основанной на данных бурения и ЗСБ, такой диапазон УЭС характерен для наличия коллектора.

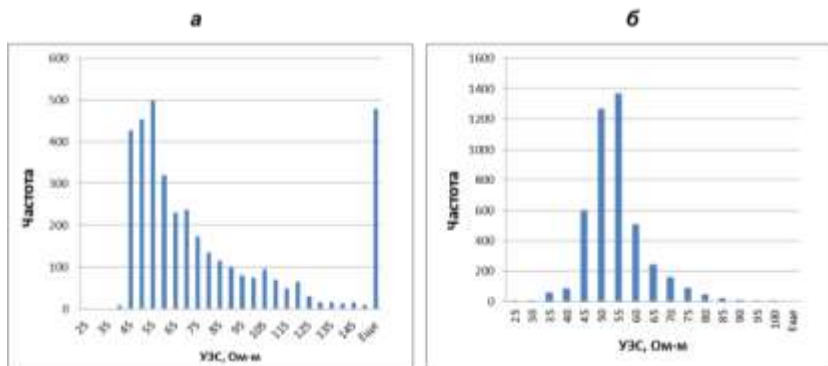


Рисунок 8 – Гистограммы распределения УЭС целевого горизонта, построенные по результатам инверсии кривых ЗСБ без учета (а) и с учетом (б) ВПИ.

На рисунке 9 представлены графики невязок по одному из профилей. Видно, что учет ВП при подборе геоэлектрических параметров снизил невязку примерно в два раза. В результате этого изменение УЭС в целевых геоэлектрических горизонтах стало лучше соответствовать представлениям о геологическом строении участка работ.

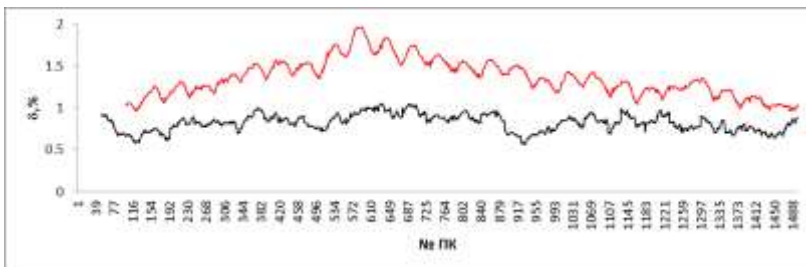


Рисунок 9 – Графики невязок по одному из профилей ЗСБ для временного диапазона 10–80 мс, соответствующего целевому интервалу глубин: красная линия – без учета ВПИ, черная – с учетом ВПИ.

### **О связи ВПИ и присутствия коллекторов в отложениях подсолевого комплекса**

Для выяснения связи между проявлением ВПИ и присутствием углеводородонасыщенных коллекторов было проведено сопоставление результатов испытаний коллекторов (вскрытых скважинами глубокого бурения), наличия пирита в керне пород подсолевого комплекса и проявлений поляризуемости.

В результате сделаны выводы:

- пирит в породах подсолевого комплекса фиксируется как в продуктивных скважинах, так и в не давших притока УВ;
- аномалии поляризуемости наблюдаются как в районах скважин с притоками УВ, так и без притоков;
- ВПИ фиксируется как в случае наличия пирита в керне в породах подсолевого комплекса, 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.

### **Заключение**

Основным результатом проведенных исследований является методика распознавания и учета индукционно-вызванной поляризации при интерпретации данных *массовых съёмок 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 данные ЗСБ, полученные с многоразностной установкой. На основе предложенного автором численного критерия показано, что более 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В журналах перечня ВАК:

1. **Компаниец, С.В.** Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ / **С.В. Компаниец, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов** // Геофизика. — 2013. — №1. — С. 35—40.

2. **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. — № 5 (88). — С. 53—57.

3. Баранов, М.А. Возможности электромагнитных зондирования 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.

4. Поспеев, А.В. Возможности электромагнитных установок при изучении полей вызванной поляризации / А.В. Поспеев, Е.В. Мурзина, **С.В. Компаниец**, В.С. Емельянов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. — 2018. — Т. 41 — № 2 — С. 80—90.

5. **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—164.

#### **В монографии:**

6. 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. Семицкий, Р.В. Шарлов, А.Г. Вахромеев, Е.А. Сень. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. — 231 с. — ISBN 978-5-9909584-1-8.

#### **В сборниках трудов:**

7. **Компаниец, С.В.** О возможности изучения индукционно-вызванной поляризации на юге Сибирской платформы / **С.В. Компаниец** // 1-ая международная конференция: Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем. — Киев, 2009. — С. 35-36.

8. **Компаниец, С.В.** Интерпретация данных ЗСБ с учетом параметров индукционно-вызванной 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.

9. **Антонов, Е.Ю.** Проявления и учет индукционно-вызванной электрической поляризации верхней части разреза Восточной Сибири / Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, С.В. Компаниец. // VII Международный научный конгресс «Гео-Сибирь-2011»: Материалы конференции. Том 2. Кн. 1 — Новосибирск, 2011. — С. 185-191.

10. **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.

11. Емельянов, В.С. Повышение точности решения обратной задачи ЗСБ за счет изучения пространственного распределения параметров поляризуемости геоэлектрического разреза на юге Сибирской платформы. [Электронный сборник] / В.С. Емельянов, **С.В. Компаниец**, А.В. Поспеев, Ю.А. Агафонов // 3-я международная научно-практическая конференция «Геобайкал-2014: Разведка и разработка недр Восточной Сибири»: Сборник трудов. — Иркутск: Изд-во EAGE Publications BV, 2014.

12. **Компаниец, С.В.** Интерпретация данных 3D ЗСБ с учетом параметров индукционно-вызванной 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.

13. **Kompaniets, S.V.** Application of multi-offset arrays in TEM studies on the Siberian platform. [Электронный сборник] / **S.V. Kompaniets**, N.O. Kozhevnikov // 24th EM Induction Workshop: Abstracts. — Helsingør, Denmark. — 2018.

14. **Kompanietc, S.V.,** Kozhevnikov, N.O., Agafonov, Y.A. The application of tem multi-offset array on the siberian platform / **S.V. Kompanietc**, N.O. Kozhevnikov, Y.A. Agafonov / 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development, Geomodel 2018; Gelendzhik; Russian Federation; 10 September 2018 до 14 September 2018 (**Scopus**) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802436>