

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*



СЕМИНСКИЙ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ЗСБ НА ПРЕДПОЛЕВОМ И  
ИНТЕРПРЕТАЦИОННОМ ЭТАПАХ СРЕДСТВАМИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 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, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ЗСБ .....	11
1.1 Методика работ.....	14
1.2 Инверсия данных .....	16
1.3 Выявление кривых, осложненных влиянием трехмерных неоднородностей .....	19
1.4 Обзор программных продуктов для инверсии данных .....	23
1.5 Программный комплекс 3D моделирования «GeoEM» .....	25
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЗСБ.....	28
2.1 Выбор оптимального размера источника ЭМ поля.....	31
2.1.1 Обоснование выбора размера источника ЭМ поля .....	31
2.1.2 Зашумление синтетических трехмерных сигналов .....	33
2.1.3 Представление результатов трехмерного моделирования и выбор источника ЭМ поля .....	36
2.2 Выбор оптимального расстояния между приемниками ЭМ поля .....	37
2.2.1 Виды сетей наблюдения ЗСБ .....	38
2.2.2 Обоснование выбора оптимальной сети наблюдения.....	41
2.2.3 Выбор расстояния между приемниками ЭМ поля.....	43
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЗСБ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГЕОЛОГИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ НЕПСКОГО СВОДА .....	44
3.1 Определение сводной геоэлектрической модели .....	445
3.2 Распространенные геологические трехмерные неоднородности.....	50
3.3 Выбор оптимального размера источника ЭМ поля: результаты 3D моделирования.....	51
3.3.1 Модель №1: «разломная зона» .....	52
3.3.2 Модель №2: «пласт-коллектор» .....	58
3.3.3 Модель №3: «рудное тело» .....	72

3.3.4 Выводы .....	78
3.4 Выбор оптимального шага между приемниками ЭМ: результаты 3D моделирования .....	79
3.4.1 Модель №1: «разломная зона» .....	80
3.4.2 Модель №2: «пласт-коллектор» .....	82
3.4.3 Модель №3: «рудное тело» .....	87
3.4.4 Выводы .....	93
ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ (1D и 3D) ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЗСБ .....	94
4.1 Интерпретация данных ЗСБ, полученных в геологических условиях Непского свода, на основе комбинированного применения 1D и 3D инверсии .....	94
4.1.1 Участок с трехмерными неоднородностями .....	95
4.1.2 Участок с горизонтально-слоистым строением .....	99
4.2 Ранжирование кривых ЗСБ по степени влияния 3D неоднородностей .....	101
Заключение .....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	112

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность.* В последние годы задачи, стоящие перед нефтегазовой геофизикой, и, в частности, перед электроразведкой, усложнились. Это связано с современной направленностью сырьевой политики Российской Федерации на поиск и разведку месторождений второй и третьей групп сложности геологического строения. Как следствие, расширяется набор приемов и способов зондирований, что неизбежно приводит к увеличению производственно-финансовых затрат. В этих условиях становятся актуальными исследования, направленные на оптимизацию технологии электроразведочных работ и, в частности, метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), который широко используется при поисках и разведке месторождений углеводородного сырья.

Становление электроразведки как самостоятельного метода геофизики произошло благодаря фундаментальным исследованиям братьев Шлюмберже. В развитие теоретических основ ЗСБ внесли существенный вклад В.А. Сидоров, В.В. Тикшаев, А.А. Кауфман, Г.М. Морозов, Г.Г. Обухов, Е.И. Терехин, П.П. Фролов, Ю.В. Якубовский, Г.В. Келлер, Дж.Р. Уэйт и др.

С 70-х годов XX века этот метод активно применяется на Сибирской платформе при решении структурных, нефтегазо- и рудопоисковых и инженерных задач [92]. В процессе многолетних исследований изменились технология работ, аппаратура, подходы к интерпретации результатов, появилась малоуглубинная модификация ЗСБ и т.д. В производственно-методическом отношении развитие метода осуществлялось в таких организациях как «Ниже-Волжский НИИ геологии и геофизики», «Иркутскгеофизика», «Якутскгеофизика», «СНИИГиМС», «Северо-Запад», «Алроса», «ИЭРП» и многих других.

К настоящему времени на юге Сибирской платформы выполнено более 100 тысяч физических наблюдений ЗСБ. Сложившаяся технология является компромиссом между производственной и геологической эффективностью зондирований. При этом не формализованы некоторые ключевые моменты

методики ЗСБ на предполевом и интерпретационном этапах работ. Неясным остается вопрос обоснования выбора длины стороны генераторной петли (ГП) и расстояния между приемниками (ПК). Недостаточно исследовано осложнение кривых ЗСБ влиянием трехмерных неоднородностей, свойственных земной коре юга Сибирской платформы. Остается открытым вопрос оценки погрешностей восстановления параметров разреза, к которым приводит влияние трехмерных неоднородностей.

Традиционно на юге Сибирской платформы применяется технология зондирования, основанная на регистрации сигнала становления электромагнитного (ЭМ) поля, возбуждаемого генераторной петлей с помощью группы приемников поля. Как правило, длина стороны генераторной петли (источника поля) в глубинной модификации ЗСБ составляет от 500 до 1000 м, а расстояние между ПК – от 400 до 1000 м. Выбор стороны ГП и расстояния между ПК осуществляется исходя из геологических условий работ и производственных задач.

Неотъемлемым этапом интерпретации геофизических данных является инверсия, под которой подразумевается подбор теоретической (рассчитанной путем решения прямой задачи электроразведки, с помощью изменения толщины и сопротивления слоёв) к практической кривой. В настоящее время основным видом инверсии считается одномерный подход, основанный на расчетах в рамках горизонтально-слоистой модели (1D). Вторым, активно развивающимся, является трехмерный (3D) подход к инверсии данных, который применяется в тех случаях, когда изучаемую среду невозможно аппроксимировать горизонтально-слоистой моделью вследствие присутствия трехмерных неоднородностей [118]. В данной работе будут рассмотрены неоднородности геологической природы – разломные зоны, трапповые интрузии, дайки и т.д. В случае, когда такие неоднородности не являются объектом исследования, их присутствие считается осложняющим и искажающим сопротивление вмещающей среды и, в частности, целевого горизонта.

**Целью работы** является оптимизация технологии ЗСБ применительно к решению нефтегазопроисловых и структурных задач на территории юга Сибирской платформы. Оптимальная технология должна обеспечивать решение геологической задачи при приемлемых производственных затратах.

### **Задачи исследования**

1. Снижение погрешности восстановления параметров геологического разреза посредством изучения электромагнитного поля, создаваемого объектами, типичными для юга Сибирской платформы.

2. Обоснование оптимальной геометрии установки ЗСБ для типичных физико-геологических моделей юга Сибирской платформы.

3. Оценка эффективности комбинирования 1D и 3D подходов к интерпретации данных ЗСБ.

4. Разработка критериев необходимости применения трехмерной интерпретации данных ЗСБ для площадей Восточной Сибири.

Таким образом, **объектом исследования** являются электромагнитные поля, создаваемые геологическими 3D неоднородностями. **Территория исследования** – юг Сибирской платформы.

### **Защищаемые положения**

1. С помощью 3D моделирования обоснованы оптимальные геометрические параметры установки ЗСБ, эффективной для использования на Сибирской платформе в геологических условиях Непского свода. При решении структурных и нефтегазопроисловых задач оптимальными параметрами являются: размер стороны источника ЭМ поля – 600 м, шаг между приемниками ЭМ поля – 400-500 м.

2. При интерпретации данных ЗСБ, полученных на юге Сибирской платформы, критериями «неоднородности» являются: среднеквадратическое расхождение кривых  $\rho_t$  для одного источника ЭМ поля – более 10%, невязка подбора теоретических кривых к практическим для одной установки – более 10%. Анализ «трехмерности» 80 000 переходных характеристик ЗСБ, измеренных в условиях юга Сибирской платформы, показал, что влиянием 3D неоднородно-

стей осложнены около 10% из них. Это играет ключевую роль при выборе подхода к инверсии данных.

3. При изучении юга Сибирской платформы методом ЗСБ базовой является 1D инверсия. В настоящее время она обеспечивает большую детальность изучения осадочного чехла по сравнению с 3D инверсией. В ряде случаев применение 3D моделирования, в сравнении с 1D, позволяет добиться лучшей точности определения параметров перспективных геоэлектрических горизонтов, что повышает возможности ЗСБ за счет комплексирования подходов.

### ***Новизна работы***

1. Впервые применительно к типичным трехмерным неоднородностям строения земной коры юга Восточной Сибири для классификации аномалий ЭМ поля использовано трехмерное моделирование.

2. Изучен прирост геологической информации посредством трехмерной инверсии данных в условиях однородной и неоднородной сред применительно к территории Непского свода. Обоснованы численные критерии «неоднородности» кривых ЗСБ, играющие ключевую роль в выборе подхода к инверсии данных.

3. Разработана современная, основанная на численных параметрах методика, позволяющая настроить установку ЗСБ на решение конкретных геологических задач. В сравнении с известными подходами это дает возможность извлечь из результатов зондирований большую геологическую информацию при приемлемых экономических затратах.

### ***Фактический материал***

В основу диссертации положены результаты полевых работ, полученные автором в составе АО «ИЭРП» с 2010 по 2017 г. на следующих площадях и лицензионных участках: Южно-Усть-Кутская, Чаяндинская, Боханская, Аянская, Марковская, Игнялинская, Тымпучиканская, Вакунайская, Шестаковская, Ковыктинская, Зея-Буреинская, Санская, Большетирская и территория Приольхонья.

Одномерное математическое моделирование и работа с данными ЗСБ производилось в программном комплексе «SGS-TEM», в частности, с помощью программы количественной интерпретации «Model3» (Л.В. Суров, М.В. Шарлов, Ю.А. Агафонов). Трехмерное математическое моделирование производилось с помощью программы «GeoEM» (М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик), интегрированной в комплекс «SGS-TEM».

При решении поставленных задач автор опирался на работы Е.Ю. Антонова, А.А. Белой, М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна, Р.Г. Гусейнова, И.Н. Ельцова, А.К. Захаркина, Ф.М. Каменецкого, А.А. Кауфмана, Н.О. Кожевникова, И.А. Кремера, М.Г. Персовой, А.В. Поспеева, Б.И. Рабиновича, Ю.Г. Соловейчика, Б.С. Светова, В.А. Сидорова, В.В. Тикшаева, Г.М. Тригубовича, М.И. Эпова, Г.В. Келлера, Г.А. Ньюмана, К.Х. Стоера и других исследователей.

#### ***Личный вклад***

1. Разработка методики выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ.
2. Адаптация программного комплекса «SGS-TEM» для трехмерного моделирования, зашумления сигналов и визуализации результатов.
3. Подготовка сводной физико-геологической модели (ФГМ) для Непского свода, уточнение параметров типичных трехмерных неоднородностей строения земной коры юга Восточной Сибири, визуализация результатов.
4. Расчеты трехмерных моделей, геологическая интерпретация результата.
5. Разработка и обоснование критериев «неоднородности» кривых ЗСБ.
6. Оценка размерности геоэлектрических моделей с привлечением архива ЭМ данных АО «ИЭРП» (80 000 физических наблюдений ЗСБ), зарегистрированных на юге Сибирской платформы.

#### ***Теоретическая и практическая значимость результатов***

Предложенная в работе оптимизация установки ЗСБ обеспечивает возможность сокращения производственных затрат без значительного ущерба для качества данных. На примере эталонных моделей выявлено и учтено при интерпретации

осложняющее влияние на сигнал трехмерной неоднородности, что позволило детально картировать методом ЗСБ пласт-коллектор в нижней части разреза. Прогноз подтвержден результатами бурения.

Геологическая эффективность проведенных исследований состоит в повышении точности восстановления геологической модели и достоверности прогноза. Научная значимость работы определяется возможностью применения использованного подхода к оптимизации методики ЗСБ для решения аналогичных задач в рамках близких по технологическим особенностям методов электроразведки.

Основные выводы исследования найдут практическое применение в производственных и научных организациях, касающихся производства ЗСБ. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество материалов ЗСБ и увеличить точность картирования пород геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

#### ***Апробация работы***

Представленные в диссертации научные и практические результаты апробировались на семинарах, выставках и конференциях разного уровня: на научно-практической конференции «Геонауки-2013» (Иркутск, 2013); на Всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (Новосибирск, 2013); на 3-й Международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования и комплексной интерпретации геофизических данных «ГЕОБАЙКАЛ 2014» (Иркутск, 2014); на X Международной научно-практической конференции молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА-2015» (Санкт-Петербург, 2015); на 4-й Международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования и комплексной интерпретации геофизических данных «ГЕОБАЙКАЛ 2016» (Иркутск, 2016); на научно-практической конференции «Игошинские чтения-2016» (Иркутск, 2016); на IV Всероссийском научно-практическом семинаре с международным участием им. Г.С. Вахромеева (Иркутск, 2017).

### ***Благодарности***

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору Н.О. Кожевникову и профессору А.В. Поспееву за постоянное внимание и консультационную помощь при подготовке диссертационной работы.

Особую благодарность за надежную поддержку и помощь в течение всего периода выполнения работы автор выражает генеральному директору АО «ИЭРП», к.т.н. Ю.А. Агафонову и зам. главного геофизика АО «ИЭРП», к.г.-м.н. И.В. Буддо.

Автор глубоко признателен профессору НГУ М.Г. Персовой за консультации и неоценимую помощь в подготовке расчетной базы для четвертой главы диссертационной работы.

За советы, консультации и замечания автор благодарит профессора А.Г. Дмитриева, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонова, к.г.-м.н. А.В. Мироманова, а также заместителя генерального директора АО «ИЭРП» М.В. Шарлова.

За методическую помощь в подготовке расчетов автор признателен коллегам по работе в АО «ИЭРП» Л.В. Сурову, А.И. Ильину, Е.М. Бугаковой, Е.В. Мурзиной и к.г.-м.н. Р.Г. Гусейнову.

Исключительно важно отметить большую роль в сборе полевого материала, положенного в основу диссертации, сотрудников полевых отрядов и партий, с которыми автор в течение многих месяцев работал в условиях Крайнего Севера.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 126 страниц текста, 60 рисунков и список литературы из 136 наименований.

## ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ЗСБ

Электроразведка начала свое развитие в качестве метода прикладной геофизики в начале XX века благодаря фундаментальным исследованиям братьев Шлюмберже [136]. Конрад и Марсель Шлюмберже первыми начали изучение ЭМ полей в земной коре посредством воздействия на нее электрическим током.

Дальнейшее развитие электроразведки связано с именами В.А. Сидорова, В.В. Тикшаева, А.А. Кауфмана, Г.М. Морозова, Г.Г. Обухова, Е.И. Терехина, П.П. Фролова, Ю.В. Якубовского, G.V. Keller, J.R. Wait и многими другими исследователями [110, 8, 126, 128].

В настоящее время одним из основных методов электроразведки при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы является метод зондирования становлением поля в ближней зоне [32]. Метод начал развиваться в 70-80 годы XX вв., его продвижение связано с именами Г.А. Исаева, Ф.М. Каменецкого, А.А. Кауфмана, Г.М. Морозова, А.К. Захаркина, Б.И. Рабиновича, В.А. Сидорова, В.В. Тикшаева, L. Buselli, T. Lee, J. McNeill, K. Vozoff, P. Weidelt и др. [131, 132, 127].

Метод ЗСБ основан на изучении электромагнитного поля, устанавливающегося в земной коре при резком изменении тока в источнике. Выключение тока в генераторной петле вызывает появление индукционных токов, которые распространяются от дневной поверхности на глубину [43].

Систему возбуждения магнитного поля и регистрации сигнала от исследуемого разреза можно представить следующим образом (см. рисунок 1.1). В соответствии с законом Фарадея, при выключении тока в генераторной петле – первичного ЭМ поля, в подстилающих породах индуцируется ЭДС. Причем амплитуда ЭДС пропорциональна скорости изменения первичного магнитного поля источника. ЭДС, в свою очередь, создает вихревые токи (вторичное ЭМ поле), которые затухают в зависимости от проводимости и

геометрических параметров слоев – так называемое становление поля. Затухающие вихревые токи создают вторичное магнитное поле, а его скорость изменения во времени измеряют с помощью приемных датчиков [77, 16, 27].

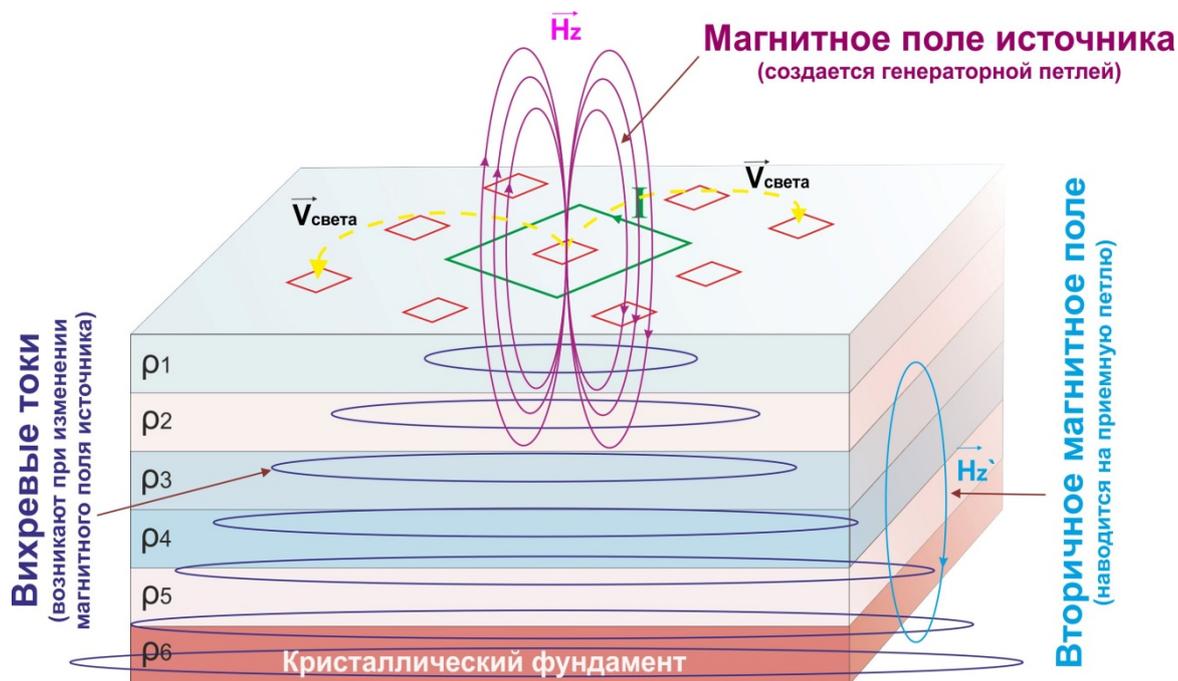


Рисунок 1.1 – Схематическое представление системы возбуждения вихревых токов [16]

Приемниками регистрируется сигнал становления электромагнитного поля (ЭДС), который в дальнейшем трансформируется в кривые кажущегося сопротивления ( $\rho_t$ ) и кажущейся проводимости ( $St$ ) [59, 45, 122]. Трансформанты используются при инверсии, результатом которой являются карты и разрезы сопротивления и проводимости [51, 129].

Начиная с 70-х гг. метод ЗСБ применяется на всех стадиях геологоразведочных работ: от региональных исследований до мониторинговых наблюдений. Основными задачами, стоящими перед ЗСБ, являются изучение неструктурных месторождений нефти и газа, работа в условиях развития соляной тектоники и разрывных нарушений.

Однако с начала 2000-х годов в связи с усложнением задач, стоящих перед методом и исследованием новых площадей, расположенных в районах со сложным геологическим строением, требуется оптимизация методики

исследований ЗСБ в условиях горизонтально-неоднородной среды [13, 88, 2, 116].

Интерпретация данных электромагнитных зондирований, полученных в результате полевых исследований, чаще всего базируется на модели горизонтально-слоистой среды и начинается с определения по кривым кажущегося сопротивления и проводимости обобщенных параметров разреза (продольного сопротивления и мощности всей осадочной толщи) и положения в нем основных проводящих слоев [51, 120, 121].

Важной частью интерпретации данных ЗСБ является инверсия. *Инверсия*, или решение обратной задачи, это преобразование геофизических полей в физические модели среды. В электроразведке под инверсией подразумевается подбор теоретической кривой, рассчитанной в результате решения прямой задачи электроразведки, к практической (полевой). Задача инверсии – подобрать теоретическую кривую к практической с минимальной невязкой. *Невязка* – мера оценки точности инверсии, численное расхождение между практической и теоретической кривыми [100, 58, 133, 134]. Невязка (*dev*) вычисляется как среднеквадратическое отклонение кривых друг от друга по формуле (1):

$$dev = 10 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (\text{Log}_{10}(\rho T_i) - \text{Log}_{10}(\rho P_i))^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где  $\rho T$  – теоретическая кривая кажущегося сопротивления;

$\rho P$  – практическая кривая кажущегося сопротивления.

Подбираемая геоэлектрическая модель задается набором слоев, каждый слой имеет уникальный идентификатор, мощность (толщину) и удельное электрическое сопротивление (УЭС). Помимо указанных параметров для задания геоэлектрической модели применяются так же параметры поляризации

среды: коэффициент поляризуемости  $\rho$ , время релаксации  $\tau_{\text{au}}$  и постоянная  $C$  (степень поляризуемости) [42, 61].

При инверсии полевых данных ЗСБ основной сложностью является некорректность решения обратной задачи электроразведки. Известно, что для кривых электромагнитных зондирований характерна эквивалентность по  $S$  и  $N$  [76]. Суть этого понятия состоит в том, что к одной полевой кривой зондирования можно подобрать, с минимальной невязкой, множество теоретических кривых с разными моделями.

Чем больше погрешность регистрации кривой ЗСБ, тем шире область эквивалентности решений, и, соответственно, количество геоэлектрических моделей. Для осуществления качественной инверсии необходимо наличие кривых ЗСБ и стартовой (априорной) геоэлектрической модели.

## 1.1 Методика работ

При работах методом ЗСБ на юге Сибирской платформы производственными организациями («Иркутскгеофизика», «СНИИГИМС», «Якутскгеофизика», «ИЭРП» и др.) с начала 90-х годов XX века используется технология работы многоразносными установками. Упомянутая технология, разработанная в СНИИГИМСе, основана на регистрации сигнала становления поля, возбуждаемого генераторной петлей (ГП) с помощью нескольких приемников поля). Далее в работе под «разносом» подразумевается расстояние между центрами ГП и ПК (см. рисунок 1.2).

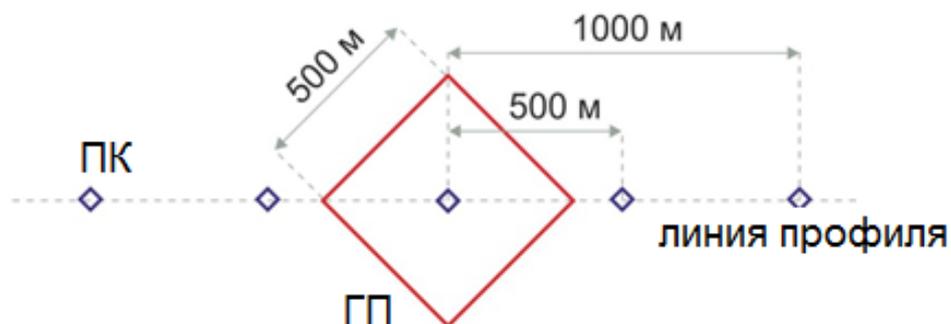


Рисунок 1.2 – Пятиразносная установка ЗСБ, типичная для работ на юге Сибирской платформы

Необходимо отметить эффективность применения многоразносных установок ЗСБ. Анализ сигналов, зарегистрированных в рамках одной установки, позволяет выявить и оценить такие эффекты как индукционно вызванная поляризация (ИВП), магнитная вязкость (МВ) и, наконец, влияние трехмерных неоднородностей. Также применение многоразносных установок удобно с производственной точки зрения.

Существует два подхода к регистрации данных: с арифметическим и геометрическим шагом по времени. Геометрический шаг уступает арифметическому в точности регистрации сигнала на поздних временах становления поля [78, 96].

Изначально использовался геометрический шаг регистрации, который был применен в следующих электроразведочных станциях: «Импульс», «WalkTEM», первое поколение станций «Цикл» и др. Реализовать регистрацию с арифметическим шагом в конце прошлого века было невозможно ввиду ограничений микроэлектроники (слабые интеграторы, не было скоростных аналого-цифровых преобразователей и т.д.). С начала XXI века арифметический шаг регистрации реализован в электроразведочных станциях нового поколения: «FastSnap», «Пикет», «Цикл-8», «TEM-Fast» и др. [54, 74].

В качестве приемных датчиков традиционно используются незаземленные квадратные петли [40, 46, 65]. Существуют различные разновидности приёмных петель, они отличаются друг от друга количеством витков и размером стороны. С начала XXI века в СНИИГиМСе ведется разработка компактных приемных датчиков индукционных (ПДИ) [46]. ПДИ удобны в производственном отношении, однако, с точки зрения геофизической эффективности пока уступают традиционным приемным петлям.

Обычно в глубинной модификации ЗСБ используются приемные многовитковые петли (до 30 витков) с длиной стороны 18 м. Опытным путем установлено, что в работе упомянутые приёмники ЭМ поля наиболее геофизически эффективны и достаточно удобны с производственной точки зрения. Вопрос вы-

бора оптимального приемника ЭМ поля занимает большое место в диссертациях и статьях А.К. Захаркина, Б.И. Рабиновича и других исследователей.

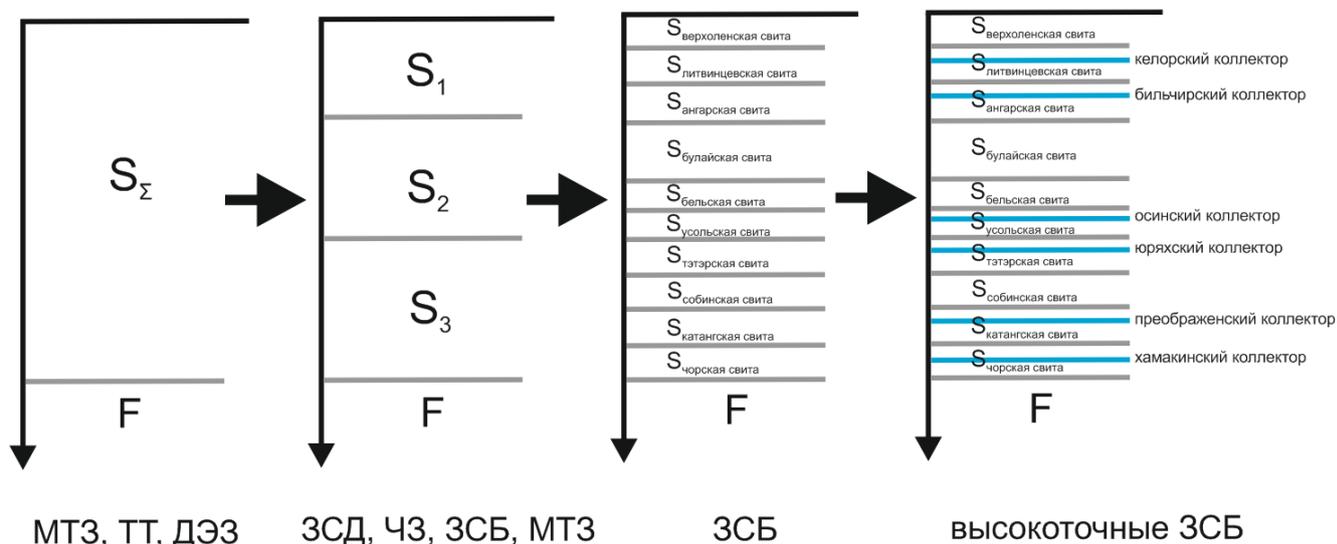
В настоящее время вопрос выбора оптимального приемника ЭМ поля достаточно изучен, однако вопросы выбора оптимального источника ЭМ поля и расстояния между приемниками остаются дискуссионными [52].

В случае глубинных ЗСБ источниками ЭМ поля являются квадратные незаземленные генераторные петли с длиной стороны от 500 до 1000 м. Расстояние между приемниками составляет от 400 до 1000 м. Длина стороны ГП и расстояние между ПК выбираются исходя из геологической задачи и производственных условий. Обычно установка ЗСБ, в которой геометрические параметры варьируются в указанном диапазоне, позволяет решать геологическую задачу с приемлемой точностью. *Под приемлемой точностью решения геологической задачи* в данной работе понимается восстановление параметров разреза ( $\rho$  и  $H$ ) с точностью, позволяющей выявить объект исследования на фоне вмещающей среды и помех (разделить: 3D объект/вмещающая среда, аномалия/шум).

Подробнее подход к выбору геометрических параметров установки будет рассмотрен в главе 2.

## **1.2 Инверсия данных**

Представление о геоэлектрической модели юга Сибирской платформы менялось на протяжении всего периода электроразведочных работ. В середине XX века методами МТЗ, ТТ и ДЭЗ осадочный чехол был аппроксимирован одним слоем, перечисленными методами определялась только его мощность и суммарное продольное сопротивление (см. рисунок 1.3). С развитием электроразведки появились новые методы и подходы, позволяющие повысить детальность интерпретации электроразведочных методов [73].



**Рисунок 1.3 – Эволюция представления о геозлектрической модели юга Сибирской платформы [89]**

В 70-ые годы интерпретация данных ЗСБ преимущественно заключалась в оценке обобщенных параметров разреза (суммарной мощности  $N$  и суммарной проводимости  $S$ ) и производилась эта оценка вручную, с использованием асимптотических решений прямой задачи ЗСБ, то есть по асимптотам и координатам минимумов [77].

На смену метода асимптотических решений пришли палетки, позволяющие с более высокой детальностью аппроксимировать осадочный чехол 3 – 5 слоями [15].

В 80-е годы появились первые ЭВМ и пакеты моделирования сигналов становления [125, 41, 79]. 1D инверсия посредством ЭВМ повысила точность интерпретации и позволила разделить разрез на 5 – 7 слоев. Данный подход подходил для работы с горизонтально-слоистой средой.

В начале XXI века появился подход, основанный на тонкослоистой инверсии, позволяющий оценить возможность выделения в геозлектрическом разрезе тонких слоев путем расчета коэффициента контрастности [16].

Исходя из накопленного опыта, такие геологические объекты, как разломные зоны, выклинивающиеся горизонты, трапповые интрузии и др., часто встречающиеся в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы, формируют ЭМ отклик, осложняющий сигнал от горизонтально-слоистой

среды [135, 103]. В связи с этим, в общем случае 1D инверсия для такой среды не является корректной, что и обуславливает необходимость 3D-моделирования.

*Под трехмерным объектом* в данной работе понимается неоднородность геологической природы, осложняющая ЭМ отклик от среды таким образом, что геологическая задача не решается в рамках 1D инверсии.

Кратко рассмотрим распространение вторичного ЭМ поля в нижнем полупространстве в случае однородной и неоднородной сред. Вторичное ЭМ поле создается вихревыми токами, которые можно аппроксимировать кольцом [81]. После выключения первичного ЭМ поля кольцо вихревых токов, увеличиваясь в диаметре, опускается вниз по разрезу. В проводящих слоях вихревые токи задерживаются дольше, чем в высокоомных [49]. Скорость, с которой кольцо расширяется от источника, обратно пропорциональна удельной электропроводности [132].

Если разрез сложен горизонтально залегающими слоями, в поздней стадии вихревые токи в нижнем полупространстве распространяются равномерно. Однако, когда вихревые токи достигают неоднородности или несогласно залегающих слоёв, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал ЭДС, регистрируемый на зажимах приемной петли, осложняется влиянием неоднородности.

Принципиальное преимущество 3D моделирования состоит в том, что, зная примерные размеры и сопротивление объекта исследований, а также сопротивление вмещающих отложений, можно, сравнивая полевые и рассчитанные синтетические сигналы, уточнить параметры и залегание неоднородности, а также с приемлемой точностью оценить влияние неоднородности на суммарный сигнал.

Посредством 3D моделирования возможно не только оценивать степень влияния геологической неоднородности на данные ЗСБ, но и решать такие методические задачи, как выбор оптимальной сети наблюдения (шага между

приемниками) и размера источника ЭМ поля (стороны генераторной петли) применительно к конкретным геологическим условиям.

### **1.3 Выявление кривых, осложненных влиянием трехмерных неоднородностей**

Как упоминалось в части 1.1, с помощью многоразносных установок возможно выявление влияния на кривые ЗСБ трехмерных неоднородностей. Выявить осложненные сигналы можно на всех этапах работы с данными:

- 1) во время экспресс-анализа кривых ЗСБ (путем сравнения кривых, зарегистрированных от одного источника ЭМ поля);
- 2) во время интерпретации (посредством анализа невязок одномерной инверсии);
- 3) во время анализа результатов интерпретации (по геоэлектрическим разрезам и картам).

Рассмотрим примеры сигналов ЗСБ, зарегистрированных от одного источника ЭМ поля в условиях горизонтально-слоистой и неоднородной сред [20, 99, 109, 113].

В случае, когда исследуемая среда соответствует горизонтально-слоистой модели, кривые на одинаковых разносах на поздних временах становления должны быть близки (поле вихревых токов стремится к однородному распространению во всех направлениях). Типичные сигналы становления поля, зарегистрированные в условиях горизонтально-слоистой среды, показаны на рисунке 1.4 [16].

В среднем, расхождение кривых, зарегистрированных в условиях горизонтально-слоистого разреза, друг относительно друга наблюдается только на ранних временах, что связано с изменчивостью геоэлектрических свойств верхней части разреза (ВЧР) [64].

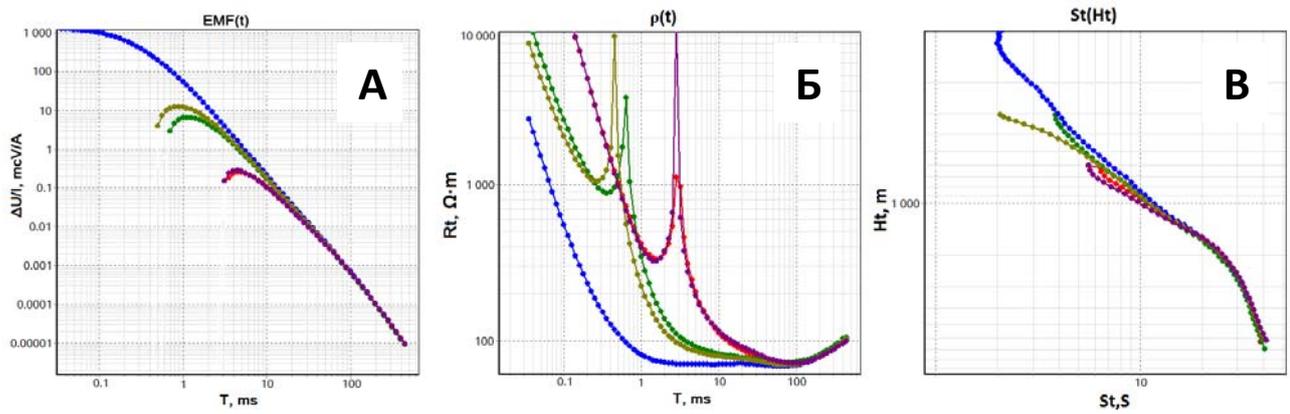


Рисунок 1.4 – Кривые ЗСБ, типичные для горизонтально-слоистого разреза: А – ЭДС; В – трансформанта  $\rho_t$ ; В – трансформанта  $S_t$

На поздних временах расхождение не значительно (менее 2-3%), что говорит о соответствии среды горизонтально-слоистой. Данный тезис подтверждает график расхождения кривых, зарегистрированных на одинаковом удалении от центра установки (см. рисунок 1.5).

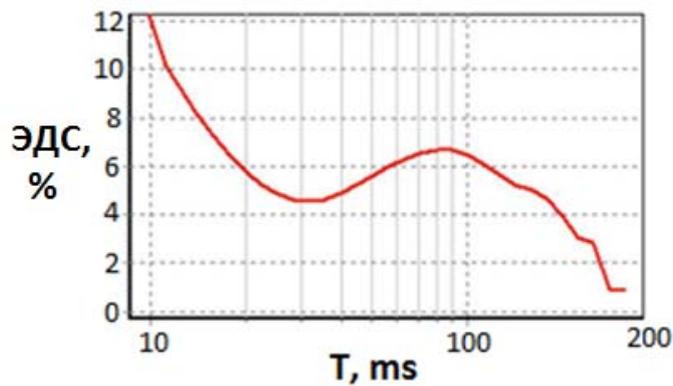


Рисунок 1.5 – График расхождения двух кривых ЭДС друг от друга, зарегистрированных от одного источника ЭМ поля, в условиях горизонтально-слоистого разреза

Типичные кривые ЗСБ для неоднородной среды представлены на рисунке 1.6.

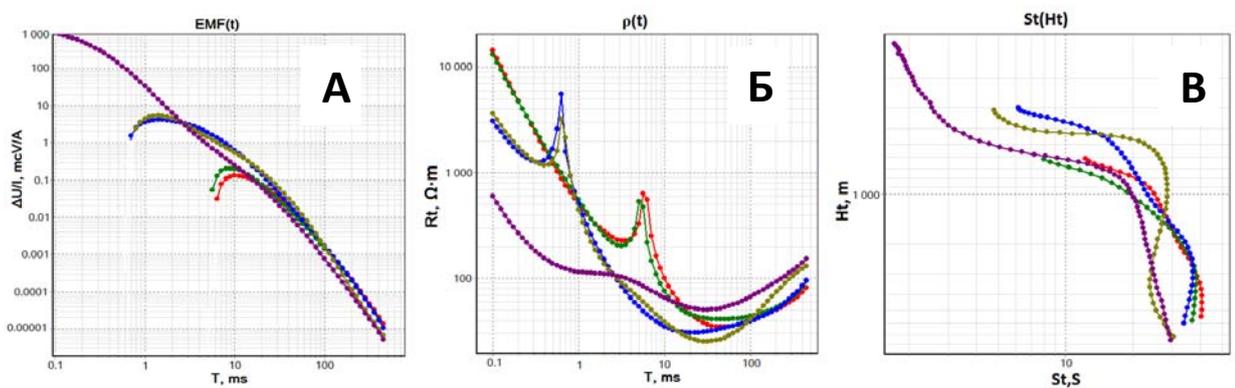
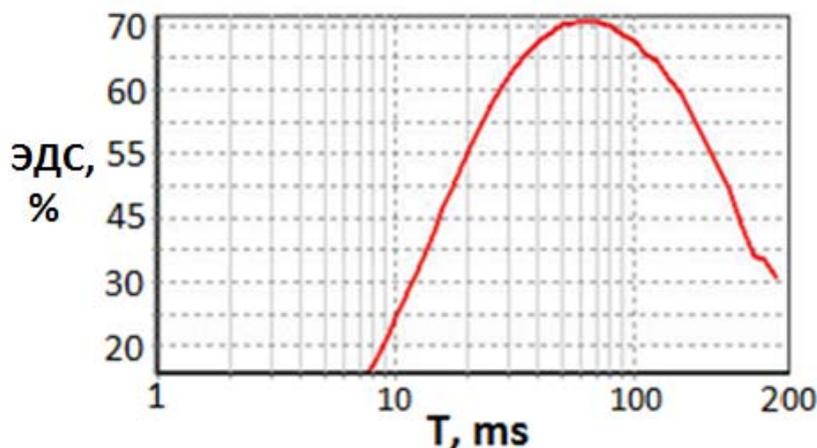


Рисунок 1.6 – Кривые ЗСБ, типичные для горизонтально-неоднородного разреза: А – ЭДС; Б – трансформанта  $\rho_t$ ; В – трансформанта  $S_t$ .

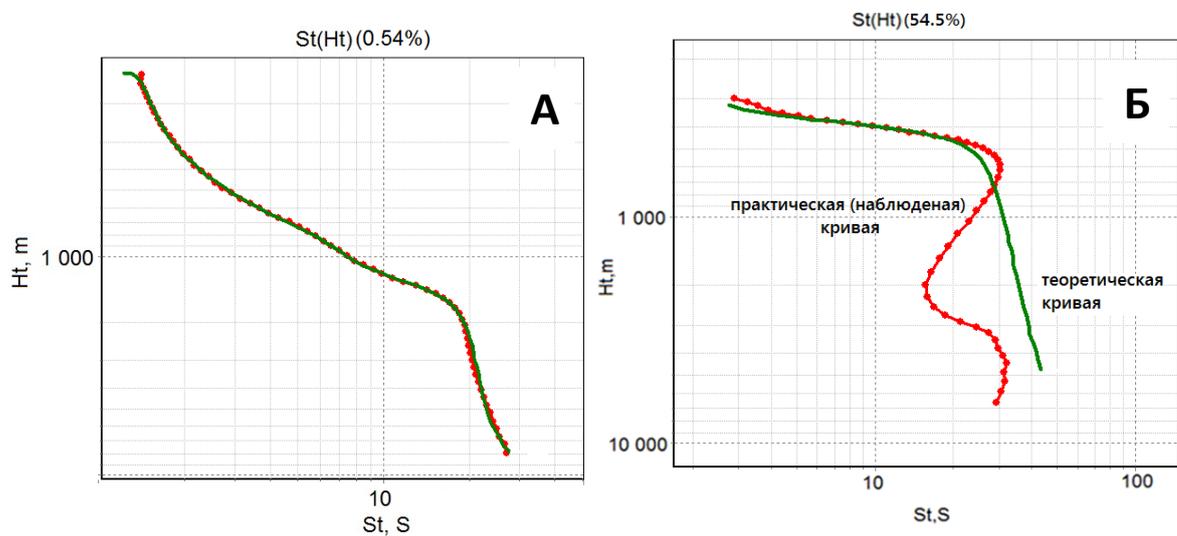
На одинаковом разnose 1000 м расхождение ЭДС составляет несколько десятков процентов (см. рисунок 1.7), что свидетельствует о некорректности применения подхода одномерной инверсии кривых ЗСБ в этом случае.



**Рисунок 1.7 – График расхождения двух кривых ЗСБ друг от друга, зарегистрированных от одного источника ЭМ поля, в условиях горизонтально-неоднородного разреза**

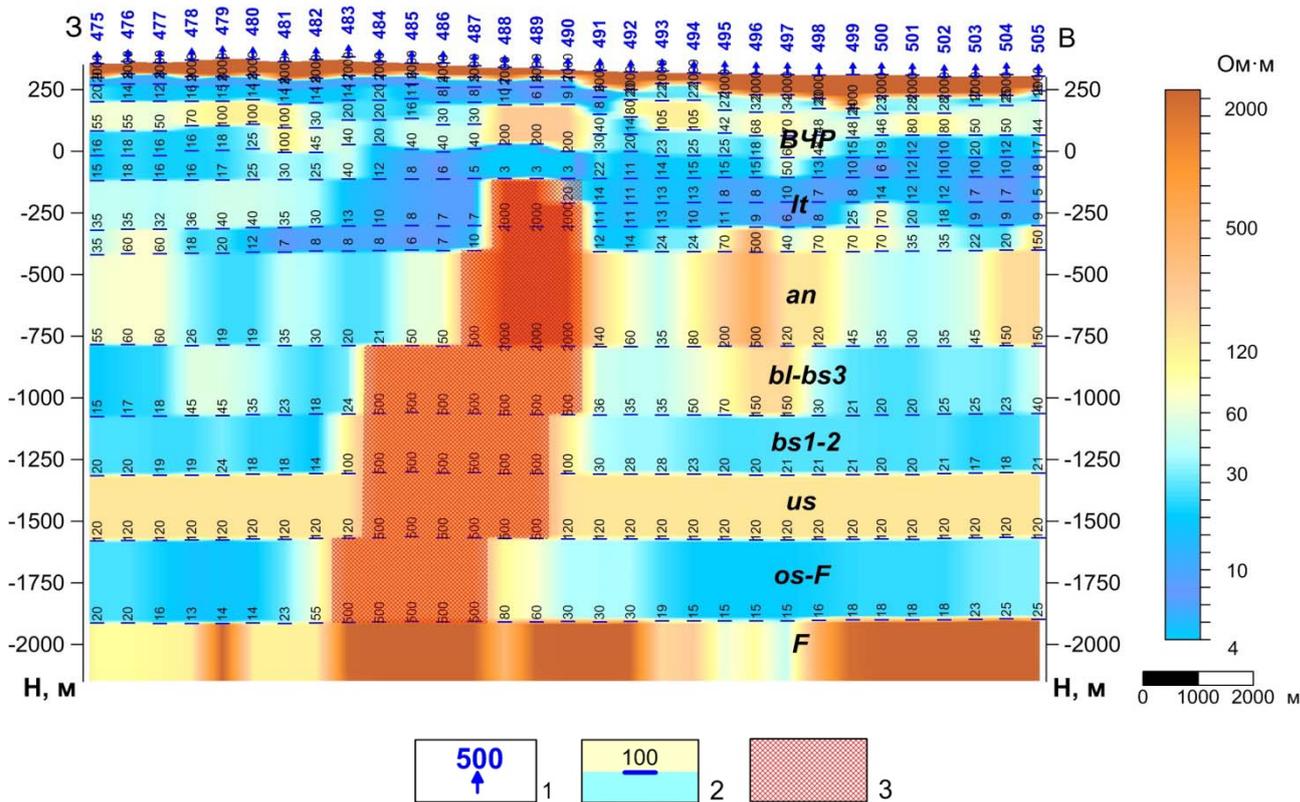
Еще одним критерием «трехмерности» кривой ЗСБ считается невязка одномерной инверсии. Согласно Г.М. Тригубовичу, невязка одномерного подбора для кривой, неосложненной влиянием трехмерной неоднородности, составляет менее 10%. Невязка одномерного подбора более 10% в большинстве случаев говорит о «трехмерности» кривой [116].

На рисунке 1.8 представлен пример кривых St, зарегистрированных в условиях горизонтально-слоистой и неоднородной сред. Для осложненной кривой (см. рисунок 1.8 А), в отличие от неосложненной, невозможно подобрать теоретическую 1D кривую с невязкой менее 54 % (см. рисунок. 1.8 Б) из-за несоответствия геоэлектрического разреза одномерному.



**Рисунок 1.8 – Результат 1D инверсии кривой ЗСБ в трансформанте St, зарегистрированной в условиях: А – горизонтально-слоистого разреза; Б – неоднородного разреза**

Однако в силу принципа эквивалентности точность подбора геоэлектрической модели не всегда говорит о ее геологической достоверности. Поэтому в случае применения подхода одномерной инверсии к 3D осложненной кривой, даже с невязкой менее 2%, на геоэлектрических разрезах и картах могут проявиться зоны осложненной интерпретации, мнимые геоэлектрические аномалии и т.д. (см. рисунок 1.9). В данном случае под «зоной осложненной интерпретации» понимается область геоэлектрического разреза или карты, которой соответствуют нетипичные значения сопротивления для рассматриваемого района.



**Рисунок 1.9 – Пример геоэлектрического разреза, осложненного влиянием трехмерной неоднородности (коричневой штриховкой обозначена зона осложненной интерпретации, возникшая вследствие осложнения сигналов трехмерной неоднородностью):**

- 1 – пункты наблюдения ЗСБ; 2 – значение удельного электрического сопротивления; 3 – зона осложненной интерпретации.**

Выявление кривых, осложненных влиянием трехмерной неоднородности, возможно только при достаточном количестве физических наблюдений, как в непосредственной близости к зоне влияния неоднородности, так и за ее пределами [118, 83, 69].

#### **1.4 Обзор программных продуктов для инверсии данных**

В России первые программные пакеты для геологического трехмерного моделирования появились в начале 90-х годов прошлого века (программы «Stratamodel», «IRAP RMS», «Petrel» и «3D Property») [44]. Широкомасштабные продажи пакетов трехмерного моделирования начались уже в конце 90-х.

Для решения одномерных прямых задач электроразведки методом ЗСБ многие годы используются программы «Эра», «Zond», «Подбор», «Выбор-ЗС»,

«Model3», «Алекс» и другие программные комплексы, хорошо зарекомендовавшие себя в производственных электроразведочных организациях [125, 28, 80, 98, 112, 6]. Для решения прямой трехмерной задачи также существуют программные продукты, такие как «GeoEM», «MODEM3D», «EMDataProcessor», «Tem-model» и др.

В современной российской электроразведке развитие трехмерного моделирования ЭМ полей связано с такими именами, как М.С. Жданов, И.А. Кремер, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович и др. В научные группы, занимающиеся разработкой программных комплексов 3D моделирования, входят специалисты различных направлений (геологи, геофизики, физики, математики и т.д.), которые создают программные комплексы для решения специфических задач электроразведки. Комплексы отличаются методиками расчета, порядком выполняемых операций и, главное, математическими алгоритмами.

Зарубежный опыт трехмерного моделирования связан с именами Г. Ньюмана, П. Интона, Г. Хомана, Е. Хабера, Д. Олденбурга, С. Холза, А. Роддера и др.

Важнейшие подходы к решению трехмерных задач основаны на методах интегральных уравнений (МИУ), конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Как известно, первые результаты при расчетах трехмерных электромагнитных полей были получены с помощью метода интегральных уравнений. И на сегодняшний день этот метод эффективен при решении задач геоэлектрики в средах с относительно небольшими по размерам трехмерными неоднородностями и при малом их числе. В свою очередь, методы конечных разностей и конечных элементов также широко применяются для решения трехмерных задач электроразведки. Основным их преимуществом является разреженность матриц систем уравнений, получаемых в результате аппроксимаций соответствующих трехмерных задач. Но вместе с тем, методы конечных разностей и конечных элементов требуют включения в расчетную область помимо самих трехмерных объектов большого пространства вокруг

них. При этом для достижения хорошей точности необходимо подробное разбиение объема среды на ячейки. Причем, мелкие ячейки нужны не только рядом с 3D объектами, но и в окружающем их пространстве, особенно вблизи источников поля. В результате, при решении задач для методов с контролируемыми источниками, если 3D объекты в них дают относительно слабые отклики, методы конечных разностей и конечных элементов требуют очень высоких вычислительных затрат на получение решения с приемлемой точностью [86].

Любая программа трехмерного моделирования электромагнитных полей включает в себя алгоритмическую реализацию одного из математических методов расчета и интерфейс, удобный при программировании задачи для расчета.

Однако, результаты трехмерного математического моделирования, с использованием упрощенной модели реальной геологической ситуации, могут отличаться от полевых данных [66]. Такое отличие объясняется погрешностями, произвольно допускаемыми как при формировании задачи для 3D расчетов, так и во время полевых измерений и их обработки. В числе основных факторов, влияющими на совпадение полевых данных и результатов моделирования, являются:

- 1) качество (погрешности) исходных данных;
- 2) точность расчетов различных алгоритмов построения модели и их параметры;
- 3) эквивалентность геологических моделей.

### **1.5 Программный комплекс 3D моделирования «GeoEM»**

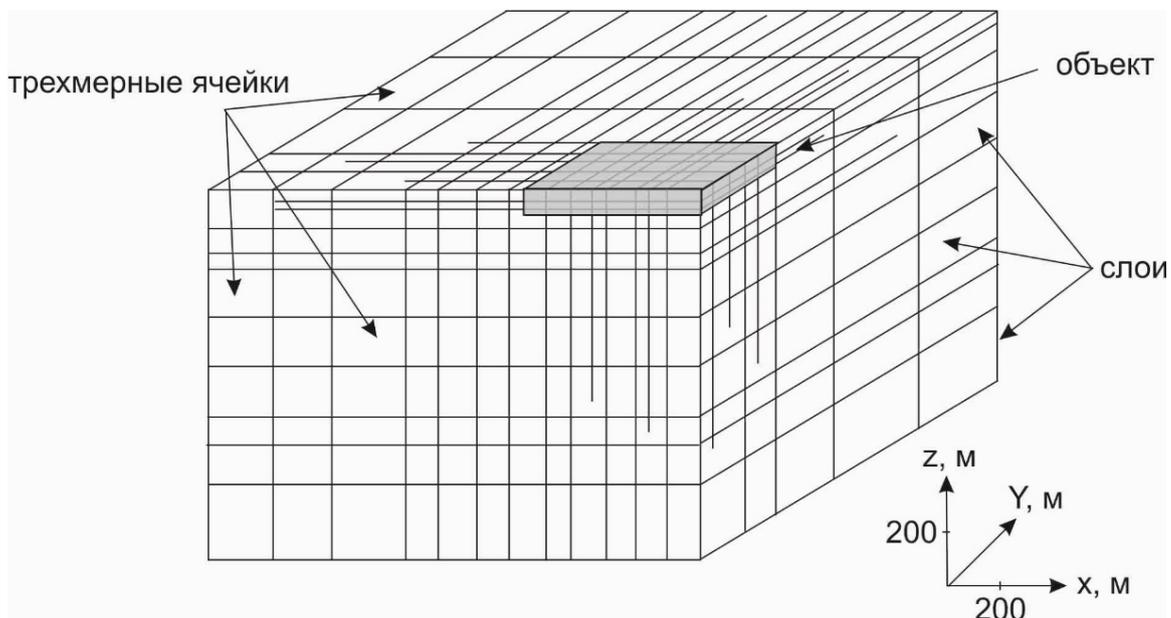
В данной работе для моделирования электромагнитных откликов от заданных моделей использовался программный комплекс «GeoEM», основанный на методе конечных элементов [86].

Комплекс «GeoEM» позволяет решать прямую трехмерную задачу, т.е. рассчитывать электромагнитные отклики от заданной среды, сопротивление и мощность слоев которой известны.

Рассмотрим подробнее механизм моделирования. Первым этапом трехмерного моделирования является создание фоновой модели, которая является фундаментом для расчетов, проводимых для решения конкретной задачи. Другими словами, *фоновая (принципиальная) модель* – это выраженные в цифровом виде представления о вмещающей среде, геологическом строении моделируемых тел, стратиграфии, тектонике и т.п. [21].

Далее в эту модель помещается трехмерный (возмущающий) объект (или объекты), под которым понимается часть геологической среды, ответственная за аномальную составляющую суммарного ЭМ поля от всей физико-геологической модели. *Физико-геологической моделью* считается система возмущающих тел (трехмерный объект + фоновая геоэлектрическая модель) и вызываемых ими аномальных эффектов, которые аппроксимируют геологический объект и с необходимой для моделирования детальностью отражают его структуру, размеры, форму и соответствующее им объемное распределение физических полей [21].

На следующем этапе ФГМ делится на ячейки (структурированную трехмерную сетку) и производится расчет ЭДС фоновой модели без объекта ( $ЭДС_{1D}$ ), с объектом ( $ЭДС_{3D}$ ) и от объекта ( $ЭДС_{An}$ ). Причем, в месте расположения объекта, количество ячеек автоматически увеличивается, а их размер уменьшается, что повышает точность расчета. Чем большее количество ячеек включает модель, тем выше точность. И наоборот, чем дальше от объекта, тем ячейки больше, что, в свою очередь уменьшает общее время расчета (см. рисунок 1.10). Правильно построенная трехмерная сетка – основа построения корректной геоэлектрической модели.



**Рисунок 1.10 – Разбиение трехмерного пространства на ячейки (по Персовой и др. [87])**

Результаты расчета сохраняются в виде TXT файлов, по одному файлу на один приемник ЭМ поля, каждый файл содержит четыре столбца, в которых приведены: время  $t$  (в миллисекундах), значение нормальной, аномальной и суммарной ЭДС для каждого временного отсчета.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЗСБ

Важным методическим аспектом при планировании работ методом ЗСБ является выбор оптимальных геометрических параметров установки. В данном случае под геометрическими параметрами подразумевается длина стороны генераторной петли и расстояние (шаг) между приемниками ЭМ поля.

Очевидно, что с увеличением размеров установки ЗСБ время на её подготовку на местности увеличивается. Соответственно, на обслуживание работ требуется больше производственных ресурсов (время, персонал, техника и т.д.). Обслуживание установок меньшего размера в производственном плане выгоднее, однако, с их помощью невозможно решить ряд геологических задач ввиду небольшой глубины зондирования.

В соответствии с инструкцией по электроразведке, *оптимальными геометрическими параметрами* установки ЗСБ считаются параметры, позволяющие решить геологическую задачу при приемлемых финансовых и временных затратах [56].

Выбор оптимальной сети наблюдения и размера источника рассматривался в работах В.М. Бондаренко, В.В. Бродового, Г.С. Вахромеева, А.К. Захаркина, А.А. Никитина, А.Г. Тархова, Г.М. Тригубовича, В.К. Хмелевского и др.

Поскольку верхняя граница силы тока ограничена технически, площадь источника ЭМ поля является существенным параметром, влияющим на отношение сигнал/помеха, соответственно, на глубинность исследований и на *вертикальную разрешающую способность* [114, 130]. В свою очередь, шаг между приемниками влияет на *горизонтальную разрешающую способность*, и, таким образом, на возможность разделения и точность оконтуривания аномалий [62, 50].

Поскольку верхняя граница силы тока ограничена технически, площадь источника ЭМ поля является существенным параметром, влияющим на

отношение сигнал/помеха, соответственно, на глубинность исследований и на *вертикальную разрешающую способность* [114, 130]. В свою очередь шаг между приемниками влияет на *горизонтальную разрешающую способность* и, таким образом, на возможность разделения и точность оконтуривания аномалий [62; 50].

Общепринятой методики выбора оптимальных геометрических параметров установки (размера источника и шага между приемниками ЭМ поля) в настоящее время не существует, однако необходимость в ней есть. Установка с корректно выбранными геометрическими параметрами позволяет повысить информативность и качество данных ЗСБ на этапе полевых работ, а также сократить производственные и экономические затраты.

В последние десятилетия в проведении съемки ЗСБ и методике интерпретации многое изменилось – улучшилась точность регистрации индукционных переходных характеристик ЭМ поля, повысилась детальность инверсии, и, наконец, появился доступный аппарат для трехмерного моделирования сигналов становления.

Предлагаемая автором методика основана на расчете сигналов для типичных геолого-геоэлектрических условий района работ с учетом трехмерного влияния объекта, эквивалентного по геоэлектрическим и геометрическим параметрам объекту исследования.

Далее на синтетические сигналы накладывается шум, подобный по своему уровню помеховой обстановке предполагаемого района исследования.

Расчеты необходимо производить в нескольких вариантах – для выбора оптимального размера источника ЭМ поля рассчитываются сигналы от источников с разной длиной стороны и минимальным шагом между ПК (для наиболее детального картирования исследуемой аномалии). Далее строятся геоэлектрические разрезы, на основе которых выбирается оптимальный размер источника ЭМ поля исходя из амплитуды и положения аномалии, выявленной по сигналам с изменением длины стороны ГП. Для выбора оптимального расстояния между приемниками строятся геоэлектрические разрезы с

прореживанием шага между ПК. Зная истинное положение объекта в разрезе, выбирается шаг между ПК, позволяющий с приемлемой точностью оконтурить аномалию, обходясь минимальным количеством ПК. Последовательность операций, необходимых для решения задачи по выбору геометрических параметров установки ЗСБ представлена на рисунке 2.1.

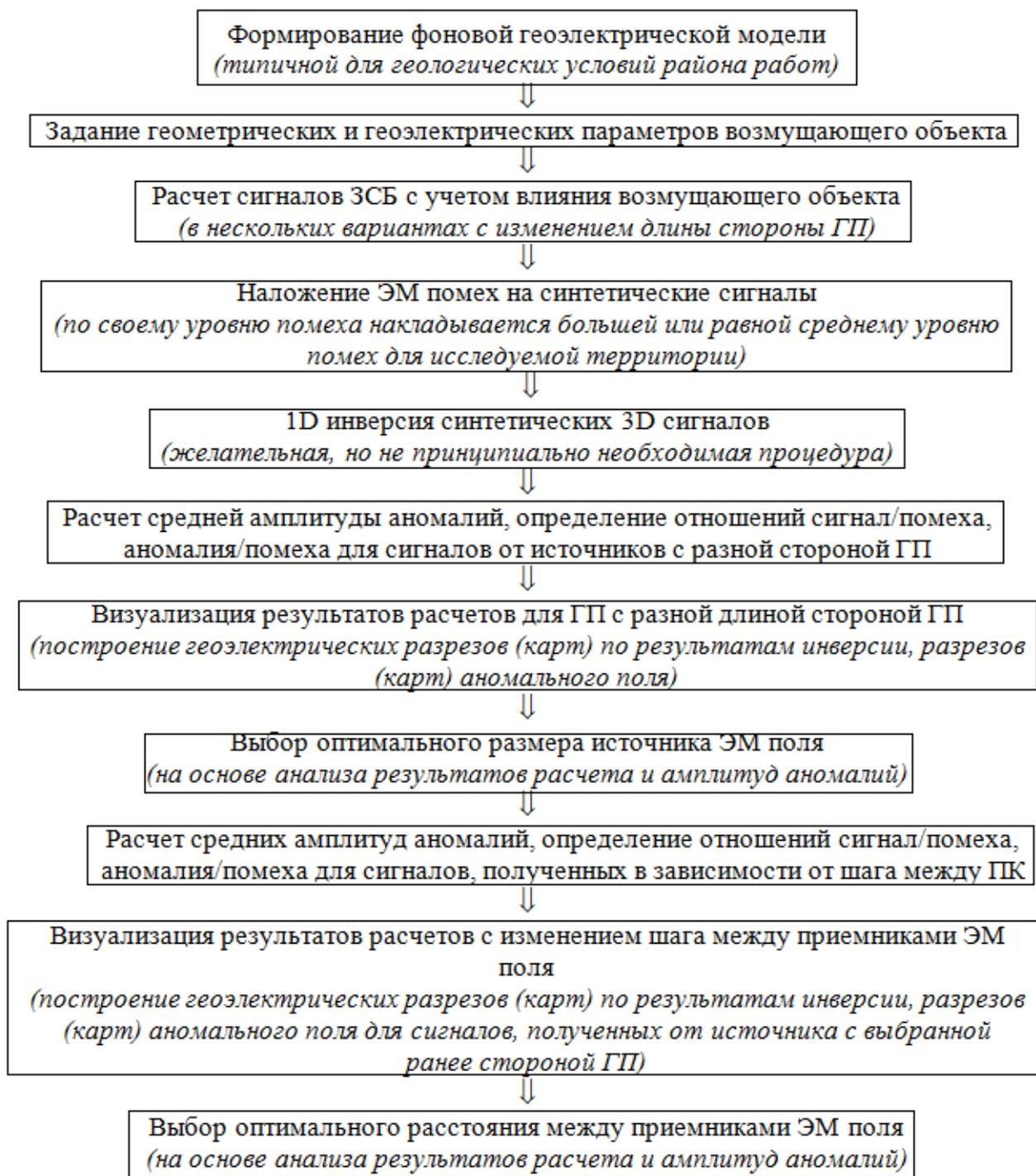


Рисунок 2.1 – Блок-схема действий для выбора геометрических параметров установки ЗСБ

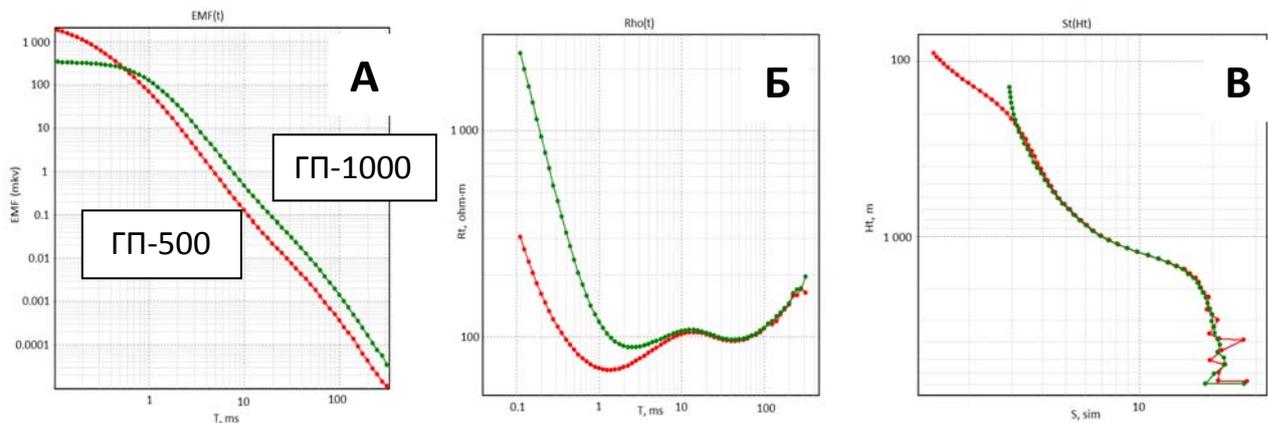
Отметим принципиальную, в данном случае, необходимость трехмерного моделирования сигналов ЗСБ, применение которого позволяет оценить чувствительность кривых ЗСБ к неоднородности, находящейся как под, так и на удалении от ПК. Таким образом, с помощью трехмерного моделирования можно выбрать размер сети наблюдений ЗСБ для выделения и/или оконтуривания исследуемого объекта.

## **2.1 Выбор оптимального размера источника ЭМ поля**

### **2.1.1 Обоснование выбора размера источника ЭМ поля**

Источник ЭМ поля, наиболее удобный с производственной точки зрения и обладающий инерционностью и мощностью, позволяющими решить поставленные геологические задачи, считается *оптимальным*.

Сигналы, возбуждаемые источником ЭМ поля, имеющего большую площадь, обладают большей амплитудой, и, соответственно, лучшим отношением сигнал/помеха, однако, в силу инерционности большой петли, неинформативны на ранних временах. И наоборот, сигналы, полученные с помощью источника ЭМ поля с меньшей площадью, информативны на ранних временах, но не достаточно чувствительны к нижней части разреза вследствие небольшого отношения сигнал/помеха (см. рисунок 2.2) [95]. В дальнейшем, сигналы, полученные от ГП со стороны 500 м, будем называть «ГП-500», от ГП со стороны 1000 – «ГП-1000» и т.п.



**Рисунок 2.2 – Примеры кривых, полученных от источников со стороной 500 м (красная) и 1000 м (зеленая): А – ЭДС; Б – трансформанта  $\rho_t$ ; В – трансформанта  $S_t$**

Сигналы, возбуждаемые источником ЭМ поля, имеющего большую площадь, обладают большей амплитудой, и, соответственно, лучшим отношением сигнал/помеха, однако в силу инерционности большой петли неинформативны на ранних временах. И наоборот, сигналы, полученные с помощью источника ЭМ поля с меньшей площадью, информативны на ранних временах, но недостаточно чувствительны к нижней части разреза вследствие небольшого отношения сигнал/помеха. Влияние инерционности и недипольности установки представлено А.К. Захаркиным в методических рекомендациях по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл» [1981].

Амплитуда сигнала определяется магнитным моментом источника ЭМ поля [61] (2).

$$M = I \cdot S \cdot N, \quad (2)$$

где  $M$  – магнитный момент,  $A \cdot m^2$ ;

$I$  – сила тока, А;

$S$  – площадь источника,  $m^2$ ;

$N$  – количество витков.

Из формулы следует, что увеличить момент источника возможно оперируя как длиной стороны ГП, так и силой тока, и количеством витков.

Однако, при увеличении количества витков кабеля, из которого изготовлена ГП, сигнал на ранних временах искажается вследствие собственных переходных процессов в ГП. Чем больше количество витков, тем больший вклад в сигнал вносят переходные процессы. Увеличение силы тока ограничено техническим ресурсом генератора. На сегодняшний день, верхний предел силы тока (для генераторов, установленных на автомобильную технику) составляет около 200 А.

Существует формула для оценки эффективной глубины зондирования (3), однако в ней не отражено как влияние помеховой обстановки на сигнал, так и присутствие трехмерных неоднородностей [77].

$$H_{эф} = K\sqrt{\rho t} \quad , \quad (3)$$

где  $H_{эф}$  – эффективная глубина зондирования, м;

$K$  – коэффициент;

$\rho$  – сопротивление полупространства, Ом·м;

$t$  – время становления поля, с.

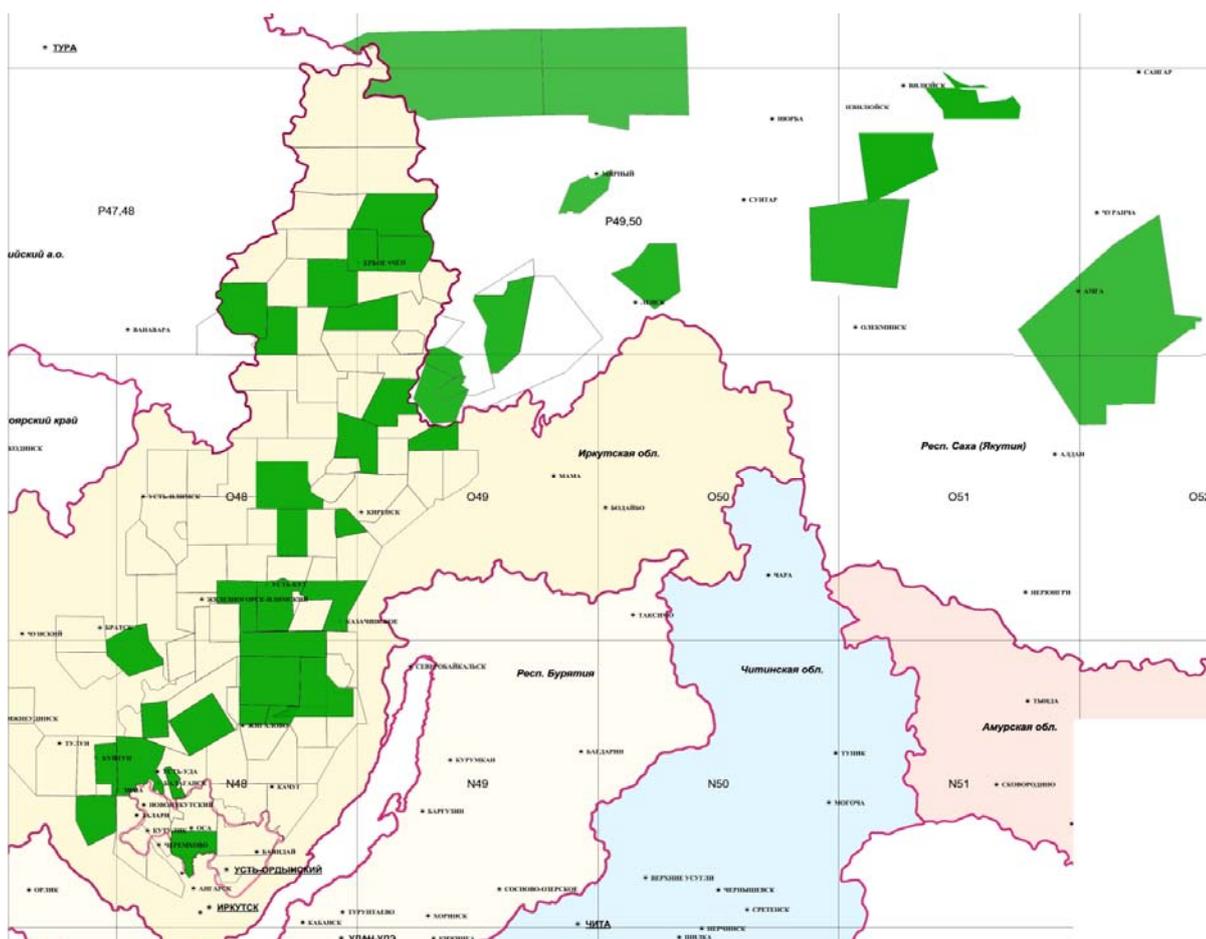
В связи с этим для выбора оптимального размера источника ЭМ поля необходимо применить подход, основанный на трехмерном моделировании сигналов становления ЭМ поля.

С помощью трехмерного моделирования сигналов ЗСБ, на основе ФГМ, рассчитываются кривые, характерные для рассматриваемой площади исследования. Расчет производится в нескольких вариантах с изменением стороны генераторной петли.

### **2.1.2 Зашумление синтетических трехмерных сигналов**

Разумеется, реальные (полевые) сигналы становления осложнены помехами различного происхождения (геологическими, техногенными, инструментальными и др.). В связи с этим, чтобы синтетические 3D данные соответствовали полевым, необходимо добавить к ним ЭМ помехи, которые по

основным характеристикам должны отражать помеховую обстановку предполагаемого района работ. Выбор уровня помех при проведении моделирования выполнен автором с привлечением практических данных. Уровень помехи оценивался по стандартному отклонению ЭДС помехи на основе анализа полевых записей, зарегистрированных при выключенном источнике ЭМ поля [34]. Общий объем записей для территории Восточной Сибири превышает 80 000 физических наблюдений (материалы архива АО «ИЭРП») (см. рисунок 2.3).



**Рисунок 2.3 – Схема территорий на юге Сибирской платформы, покрытых съемкой ЗСБ:**

■ - участки работ ЗСБ    □ - административные границы области, края, автономии    • - населенные пункты

Амплитуда шума может быть оценена по стандартному отклонению ЭДС помехи на основе анализа полевых записей, зарегистрированных при выключенном источнике ЭМ поля.

Стандартное отклонение ЭДС нормировано на соответствующее, измеренное на одновитковом приемном контуре площадью  $1 \text{ м}^2$  и единичным усилением канала (см. рисунок 2.4).

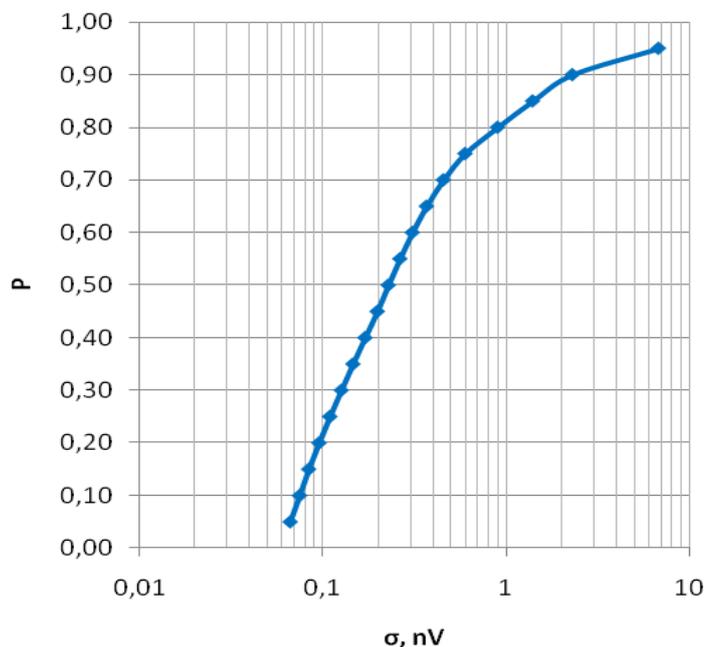


Рисунок 2.4 – График верхней границы стандартного отклонения ЭДС помехи

Применение графика (см. рисунок 2.4) позволяет объективно выбирать стандартное отклонение шума  $\sigma_0$ , например, интервал ( $P = 0.8-0.9$ ) означает, что  $\sigma_0$  для 80% записей не превышает значение 2 нВ (далее в тексте – «уровень шума 80%») (см. рисунок 2.5).

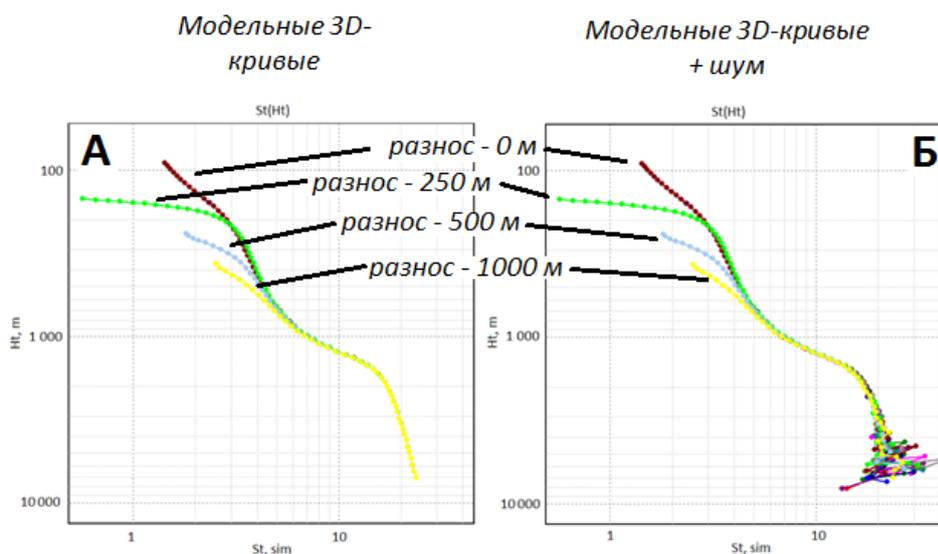


Рисунок 2.5 – Синтетические кривые кажущейся проводимости: А – уровень шума 0; Б – уровень шума, максимальный для 80% данных, взятых для статистики.

Для получения синтетических кривых величина  $\sigma_0$  масштабировалась пропорционально силе тока в источнике, эффективной площади приемной и генераторной петли, объему накоплений. Для моделирования кривых применялась следующая функция [35] (4):

$$f_{\sigma}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \approx \frac{1.027}{\sqrt{t}}, \quad (4)$$

где  $t$  – время становления, мс;

$\sigma(t)$  - стандартное отклонение ЭДС на временном отсчете  $t$  итоговой кривой ЗСБ.

### 2.1.3 Представление результатов трехмерного моделирования и выбор источника ЭМ поля

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих аномалию, является ее средняя (интегральная) амплитуда для всех ПК ссылка. В данной работе под *аномалией* понимается ЭДС, которая индуцируется на зажимах приемной петли вследствие становления ЭМ поля трехмерного объекта (без учета ЭМ поля вмещающей среды). Добавкой к ЭДС объекта является вклад ЭМ помех (шум) [9, 56].

Интегральная амплитуда аномалии оценивается по формуле среднего арифметического (5):

$$\text{ЭДС}_{An} = \frac{\sum_{l=1}^n \text{ЭДС}_{Anl}}{n}, \quad (5)$$

где  $\text{ЭДС}_{An}$  - средняя амплитуда аномалии, %;

$n$  – общее количество ПК.

Важным этапом представления результатов трехмерного моделирования, после зашумления модельных сигналов ЗСБ является их инверсия. Для решения обратной задачи использовался инструмент автоматической инверсии, реализованный как модуль программы количественной интерпретации «Model3» из комплекса программ «SGS-TEM»

[90, 112, 3]. На основании результатов инверсии полученных зашумленных 3D сигналов ЗСБ строятся геоэлектрические разрезы или карты.

Однако основным способом представления результатов 3D моделирования являются разрезы и графики аномального поля. Это разрезы процентного расхождения ЭДС<sub>ID</sub> (ЭДС фоновой модели) и ЭДС<sub>3Dшум</sub> (суммарная ЭДС фоновой модели и объекта с учетом вклада ЭМ помех). Преимущество разрезов аномального поля состоит в том, что их создание не требует затрат времени на решение обратной задачи, также, они точно иллюстрируют аномалию, создаваемую объектом исследования.

*Критерием выделяемости аномалии* является её амплитуда. Считается, что, если амплитуда аномалии превышает уровень влияния на сигнал ЭМ помех более чем в 2 раза, она выделяема [21].

В случае синтетического моделирования уровень накладываемых ЭМ помех известен, что позволяет оценить отношение аномалия/помеха.

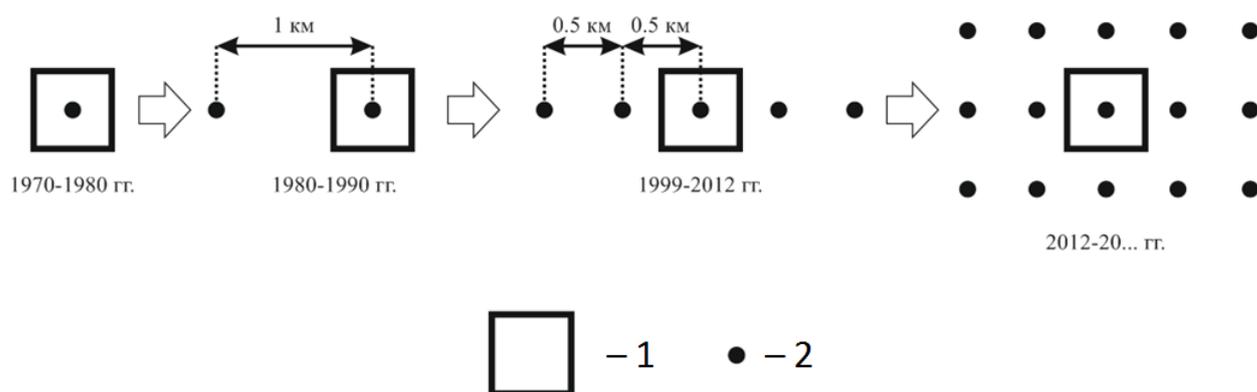
Исходя из представляемых результатов для выборок сигналов, зарегистрированных от источников с изменением стороны генераторной петли, выбирается оптимальный размер источника ЭМ поля применительно к конкретным геологическим условиям.

## **2.2 Выбор оптимального расстояния между приемниками ЭМ поля**

При проектировании работ методом ЗСБ принципиальным вопросом является выбор сети наблюдения. Очевидно, что большее количество пунктов наблюдения с минимальным шагом между ними обеспечивает более точное картирование и погоризонтное расчленение геологического разреза. Однако работа с высокоплотной сетью влечет большие финансовые, временные и производственные затраты, поэтому, на основании рассматриваемого подхода, зная минимальный размер искомой аномалии, можно выбрать оптимальную сеть наблюдения для уверенного выделения аномалии в заданных геологических и помеховых условиях [21, 31, 11].

## 2.2.1 Виды сетей наблюдения ЗСБ

В 60-90-е годы XX-ого века в практике электроразведочных работ, как правило, применялись одноразносные установки ЗСБ, т.е. от одного источника поля наблюдения осуществлялись на одном приемнике. Приемник чаще всего располагался в центре источника (см. рисунок 2.6). Регистрация сигналов становления поля на разнесенных приемниках, которые располагаются на удалении от центра источника, проводилась в ограниченных объемах.



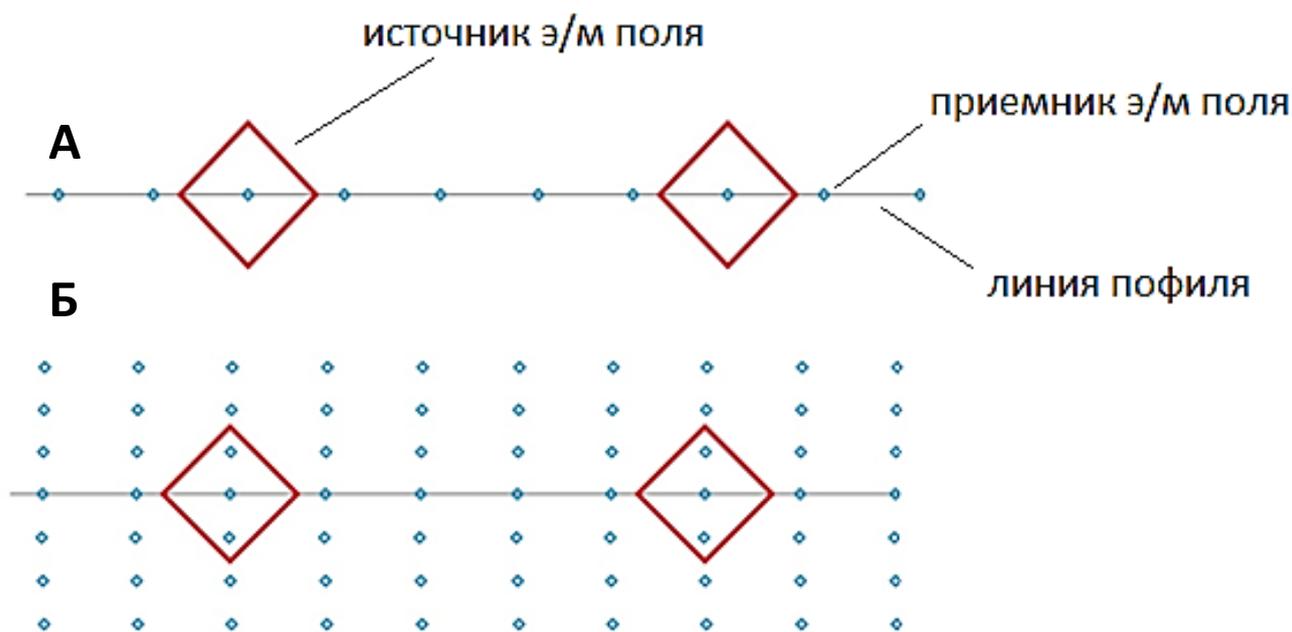
**Рисунок 2.6 – Эволюция сети наблюдений ЗСБ с 1970-х гг. по настоящее время:  
1 – источник ЭМ поля (генераторная петля); 2 – приемник ЭМ поля (приёмная петля)**

Как говорилось ранее, в 90-е и последующие годы XX века в связи с развитием технической базы и математического аппарата электроразведки и внедрением ЭВМ началось использование многоразносных установок. В настоящий момент на один источник электромагнитного поля приходится от 2 до 25 и более приемников [53]. Сегодня используются различные типы сетей наблюдения, применяемые в методе ЗСБ: профильные и площадные (регулярные и нерегулярные).

Сеть наблюдений ЗСБ выбирается в зависимости от характера поставленных задач, рельефа и результатов других геолого-геофизических работ, с которыми планируется комплексирование результатов ЗСБ [94, 115, 124]. Существуют различные модификации сетей наблюдения:

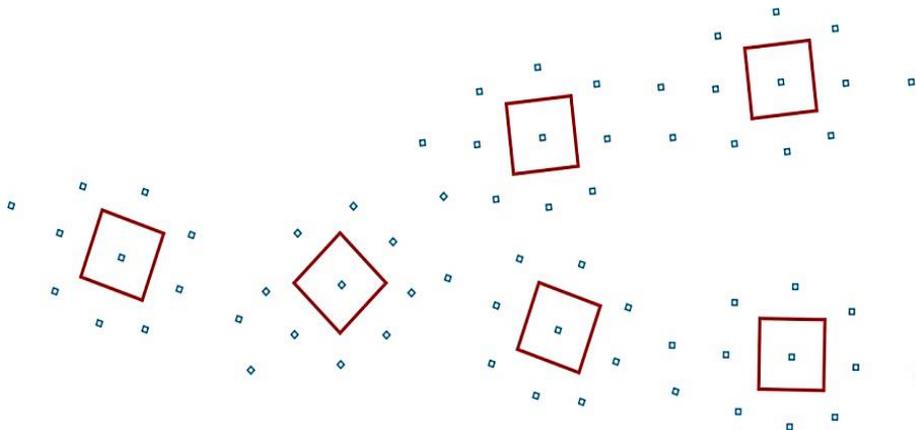
- линейная (см. рисунок 2.7 А). Наиболее простая система наблюдений, при которой от одной генераторной петли сигнал регистрируется на трех или более ПК. Работы проводятся как по профилям, так и по любым доступным дорогам. Позволяет охватить исследуемую площадь сетью региональных профилей при относительно небольших трудозатратах;

- система наблюдений «широкий профиль» (см. рисунок 2.7 Б) является модификацией линейных (профильных) наблюдений. Главное достоинство – высокая пространственная плотность наблюдений при проведении работ вдоль доступных дорог и профилей;



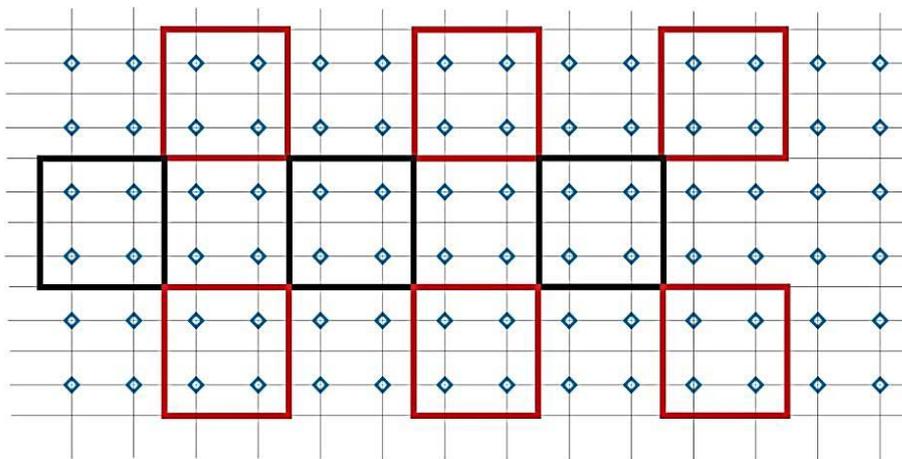
**Рисунок 2.7 – Сети наблюдения ЗСБ: А – линейная; Б – «широкий профиль» (модификация линейной сети наблюдения)**

- площадная нерегулярная (см. рисунок 2.8). Площадная система наблюдений с произвольным размещением приемников и источников ЗСБ по площади позволяет проводить работы повышенной детальности вдоль дорог и профилей. Плотность зондирований площадных сетей варьируется от 8 – 20 физических наблюдений на 1 км<sup>2</sup>, что обеспечивает высокую пространственную плотность измерений и детальность исследований;



**Рисунок 2.8 – Площадная нерегулярная сеть наблюдения ЗСБ**

- площадная регулярная (см. рисунок 2.9). Работы, как правило, проводятся по сети профилей высокоплотной сейсморазведочной съемки. При этом достигается равномерное расположение приемников и источников по площади исследований. Высокая пространственная плотность наблюдений позволяет решать геологические задачи с наименьшей эквивалентностью решений. Возможна совместная интерпретация высокоплотной сейсморазведки и высокоплотной съемки ЗСБ.



**Рисунок 2.9 – Площадная регулярная сеть наблюдения ЗСБ**

Единственно верного и оптимального шага между приемниками не существует, поскольку латеральная разрешающая способность метода, даже при едином шаге и параметрах регистрации полевых данных, зависит от

геоэлектрических условий, которые могут значительно изменяться даже в пределах одной площади исследования.

Традиционно, при производстве профильных работ ЗСБ на территории юга Сибирской платформы, шаг между приемниками составляет 500 м. Со времени написания инструкций по выбору сетей наблюдения ЗСБ прошло более 30 лет, и современные задачи, стоящие перед электроразведкой требуют оптимизации методики наблюдений соответственно геологическому строению изучаемой территории.

### **2.2.2 Обоснование выбора оптимальной сети наблюдения**

Перед выбором сети наблюдения ЗСБ необходимо понять, какую часть зондируемой среды охватывает сигнал ЗСБ. Применительно к конкретным геоэлектрическим условиям оценить размер области, которую описывает конкретный сигнал ЗСБ (зона захвата поля), возможно только с помощью трехмерного математического моделирования [38, 25].

В рамках синтетического эксперимента были рассчитаны ЭМ отклики от среды, в которую помещен относительно контрастный по геоэлектрическим свойствам объект и от той же среды без этого объекта. Поскольку объект более проводящий, чем вмещающая среда, вихревые токи задерживаются в нем, что создает аномалии ЭМ поля. Далее вычислены расхождения между рассчитанными синтетическими сигналами (см. рисунок 2.10). Для приемников ЭМ поля, на которых расхождение стремится к 0% – радиус зоны захвата поля приблизительно равен расстоянию до объекта. Т.е. с увеличением расстояния (шага) между ПК, вероятность выделения в разрезе небольших объектов уменьшается, следовательно, ухудшается горизонтальная разрешающая способность.

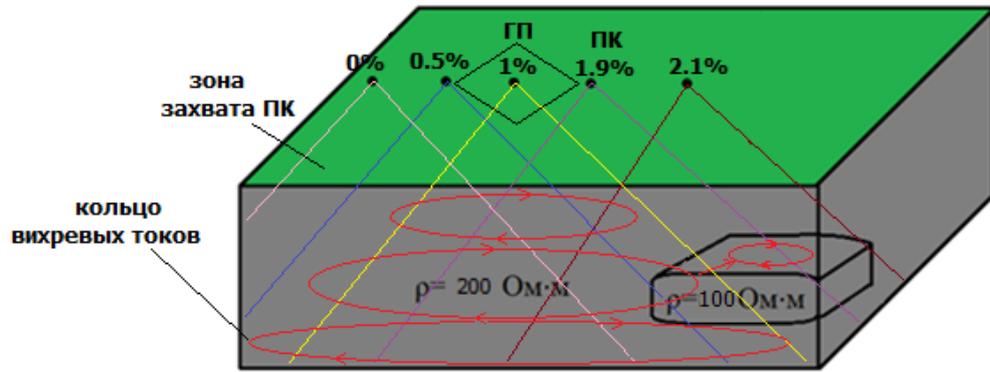


Рисунок 2.10 – Зондирование становлением поля в ближней зоне.

Согласно Матвееву, радиус ( $R$ ) токового кольца (в определенный момент времени после выключения первичного ЭМ поля, иными словами – на определенной глубине), приблизительно равен мощности перекрывающих его отложений ( $H$ ) (см. рисунок 2.11) [76].



Рисунок 2.11 – Схема распространения вторичного ЭМ поля в среде

Формулы точного расчета размера зоны захвата не существует ввиду индивидуальности геоэлектрических условий зондируемой среды, однако можно приблизительно вычислить площадь зоны захвата на конкретной глубине по формуле (6):

$$S=\pi H^2, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь зоны захвата на заданной глубине, м<sup>2</sup>;

$H$  – мощность перекрывающих отложений, м.

Исходя из вышесказанного, трехмерной неоднородностью можно считать тело, меньшее в горизонтальном простирании, чем радиус кольца вихревых токов, в которое оно попадает.

### **2.2.3 Выбор расстояния между приемниками ЭМ поля**

Для выбора оптимального шага между приемниками ЭМ поля используются синтетические 3D данные, полученные на этапе выбора длины стороны генераторной петли.

По зашумленным синтетическим трехмерным сигналам, сгенерированным в результате расчета с выбранным ранее источником ЭМ поля, строятся разрезы и графики аномалии в нескольких вариантах – с разрежением шага между ПК (уменьшением количества ПК).

Для каждого варианта сети наблюдений с разрежением шага между ПК по профилю производится оценка амплитуды аномалии. На основании критерия выделяемости аномалии, рассмотренного в части 2.1.3, принимается компромиссное решение, на основании которого выбирается шаг между ПК, не слишком частый (что влечет производственные и финансовые затраты), однако достаточный для уверенного оконтуривания аномалии в рамках решаемой задачи.

### **ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЗСБ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГЕОЛОГИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ НЕПСКОГО СВОДА**

В главе рассматривается выбор параметров установки ЗСБ для решения структурных задач в геологических условиях Непского свода в Восточной Сибири.

Выбор геометрических параметров производится исходя из результатов трехмерных расчетов для установок ЗСБ, применяемых множеством производственных геологоразведочных организаций на юге Сибирской платформы.

При планировании работ методом ЗСБ, прежде всего, необходимо определить круг решаемых задач. Например, для выделения водоносных горизонтов в ВЧР (до 300 м), в изучении всего осадочного чехла (до 3000 м) нет необходимости. Значение имеют ранние времена сигнала, поэтому, для таких работ подходит источник с небольшой площадью. При производстве региональных исследований, напротив, больший интерес представляет средняя и нижняя части разреза, поэтому используется источник, обеспечивающий достаточную глубинность зондирований.

Подобная ситуация и с выбором шага по профилю между приемниками ЭМ поля – при картировании небольших объектов (даек, штоков, коллекторов, рудных тел и т.д.) необходимо соблюдать высокую плотность сети наблюдений. Однако при изучении общего геологического строения территории возможно увеличение расстояния между приемниками без ухудшения качества решения поставленной задачи [82, 56].

Чтобы оценить вертикальную и горизонтальную разрешающую способности ЗСБ в геологических условиях Непского свода, необходимы трехмерные расчеты, направленные на изучение аномалий часто встречающихся в разрезе геологических неоднородностей.

### 3.1 Определение сводной геоэлектрической модели

Как упоминалось в разделе 1.5, для корректного выбора стороны источника в методе ЗСБ необходима ФГМ (фоновая геоэлектрическая модель + возмущающий объект), которая составляется на основании априорной информации о строении осадочного чехла исследуемой территории, приблизительной глубине залегания объекта исследования и фундамента.

В этой работе в качестве фоновой принята осредненная геоэлектрическая модель Непско-Ботуобинской антеклизы, являющейся крупной геологической структурой на юге Сибирской платформы (см. рисунок 3.1).

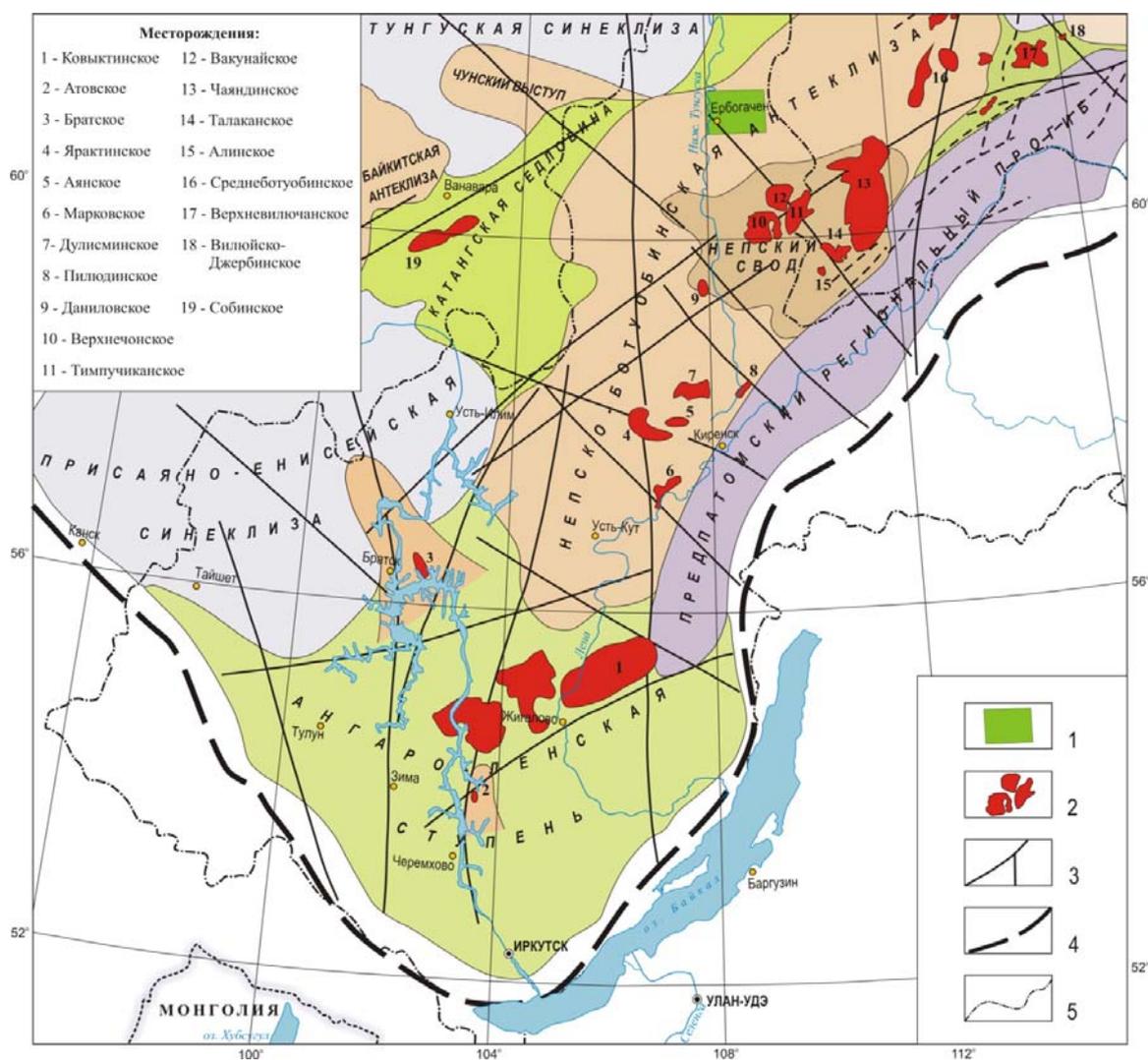


Рисунок 3.1 – Структурная схема южной части Сибирской платформы (по материалам СНИИГиМС):

1 – ближайший крупный населенный пункт к Непскому своду; 2 – месторождения углеводородов (УВ); 3 – тектонические нарушения; 4 – граница Сибирской платформы; 5 – административная граница Иркутской области

На Непском своде и прилегающих территориях более тридцати лет проводятся исследования методом ЗСБ, имеется значительный фонд пробуренных скважин [92, 93]. В районе рассматриваемой структуры находятся такие месторождения нефти и газа как Верхнечонское, Чаяндинское, Талаканское, Тымпучиканское, Даниловское и др. Непский свод характеризуется типичными для юга Сибирской платформы геологическими условиями.

Непско-Ботуобинская антеклиз, выделяемая по данным геофизики и материалам глубокого бурения, имеет северо-восточное простирание. С юга она ограничена Ангаро-Ленской ступенью, с востока глубоким Прибайкальским прогибом северо-восточного простирания, отделяющим антеклизу от Байкало-Патомской горно-складчатой области. В средней части Непско-Ботуобинской антеклизы по материалам бурения и геофизических исследований выделяется крупнейший Непский свод, являющийся наиболее приподнятой частью антеклизы.

Непский свод осложнен рядом положительных и отрицательных структур – разноранговых поднятий и прогибов. В геологическом строении участка исследования принимают участие протерозойские метаморфические и интрузивные образования кристаллического фундамента, породы венда, кембрийской и ордовикской систем, рыхлые четвертичные образования, а также интрузии трапповой формации пермо-триасового периода. Общая мощность осадочных пород от поверхности кристаллического фундамента до кровли четвертичных отложений колеблется от 2482 м до 2849 м.

В пределах рассматриваемой структуры в осадочной толще выделяется три структурно-литологических комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой. *Подсолевой* структурный комплекс включает в себя отложения от кровли осинского горизонта усольской свиты до поверхности кристаллического фундамента. Строение подсолевых отложений наиболее изучено глубоким бурением в пределах южного и юго-восточного склонов Непско-Ботуобинской антеклизы. Этот район антеклизы характеризуется пологим подъемом

поверхности фундамента и подсолевых отложений кембрия в северном – северо-восточном направлении. Воздымание подсолевых отложений происходит сравнительно равномерно за исключением участков локальных структурных осложнений.

Мощность подсолевых отложений, перспективных в плане нефтегазоносности, закономерно уменьшается в северном, северо-восточном направлениях (вверх по восстанию моноклинального склона Непско-Ботуобинской антеклизы) от 424 – 436 м до 384 – 396 м.

*Соленосный* комплекс включает в себя галогенно-карбонатные отложения нижнего кембрия от кровли осинского горизонта усольской свиты до подошвы литвинцевской свиты и имеет более сложное строение, чем подстилающие его подсолевые отложения. Этот осадочный комплекс характеризуется интенсивным развитием дизъюнктивных и пликативных дислокаций, связанных, в основном, с проявлением соляной тектоники, осложненной в отдельных случаях воздействием трапповых интрузий. Мощность отложений галогенно-карбонатного комплекса изменяется от 1323 м до 1413 м.

*Надсолевой* комплекс представлен отложениями литвинцевской и верхоленской свит кембрия и вышележащих отложений ордовика, достаточно хорошо изучен по данным геолого-съёмочных и структурно-поисковых работ. В надсолевом структурном комплексе по данным геологической съёмки выделяются Марковско-Ичерская и Непская зона дислокаций. Марковско-Ичерская зона включает в себя Тирскую и Суридно-Гаженскую подзоны куполовидных складок. В Непскую зону входит Усть-Кут-Волоконская ветвь складок. Также на северо-западе площадь захватывает часть Куто-Потёмкинской ветви складок.

Марковско-Ичерская зона складок от Непской отличается менее резко выраженной складчатостью, более широкими формами складок, отсутствием тектонических нарушений. Ю.Н. Буддо, Э.А. Иванов и др. (трест «Востсибнефтегазгеология») на основе анализа структурных построений геологической съёмки масштаба 1:50000 в районе от г. Усть-Кута до д. Токмы

выделили в Непской и Марковско-Ичерской зонах, вместо отдельных разрозненных антиклиналей и синклиналей, крупные валы, осложненные складками более высокого порядка, и разделяющие их прогибы (депрессии).

Осевые зоны валов, как правило, осложнены цепочками антиклинальных и брахиантиклинальных структур различных размеров и амплитуд, кроме того, присводовые части валов, как правило, осложнены дизъюнктивными нарушениями, структуры носят типичный надвиговой характер. Амплитуды положительных структур относительно ограничивающих их прогибов по отложениям ордовика изменяются от 250 – 300 до 500 – 700 м.

Ядра структур сложены отложениями кембрийского возраста. Азимуты падения плоскостей сместителей – восточного, юго-восточного и, редко, западного направлений.

Особенно сложным строением отличается Усть-Кутский вал, в разрезах пробуренных в его области скважин отчетливо прослеживаются признаки разрывных нарушений. Аналогичная картина наблюдается по скважинам, расположенным в пределах Каймоновского вала.

Формирование рассматриваемых валообразных структур и структурных зон, предположительно, определялось существованием значительных тангенциальных напряжений со стороны Байкальского орогена и наличием мощных пластичных масс каменной соли в подстилающих толщах. Таким образом, геологическое строение верхнего и среднего структурных комплексов существенно отличается от строения подсолевых отложений, которые, как уже отмечалось, характеризуются наиболее спокойной структурно-тектонической обстановкой.

В строении осадочного чехла рассматриваемой территории принимают участие толщи галогенно-карбонатных пород. В солевом комплексе присутствуют тонкие пласты трещиноватых известняков и доломитов [71, 1].

Геоэлектрическая модель, типичная для Непского свода была составлена ранее, в конце XX века специалистами «Иркутскгеофизики» [60]. Однако объем съемки ЗСБ и другой геолого-геофизической информации на момент создания

модели был относительно небольшой. В данной работе предлагается альтернативная (уточненная по данным ЗСБ последних 25 лет) геоэлектрическая модель исследуемой территории.

Геоэлектрическая модель, принятая в качестве фоновой, включает 10 слоев с сопротивлением от 20 до 2000 Ом·м (Таблица 3.1). На её основе произведены трехмерные расчеты, направленные на изучение аномалий от геологических неоднородностей. В соответствии с известной классификацией Г.С. Вахромеева и А.Ю. Давыденко выбранная модель относится к классу детерминированных ФГМ [21].

Таблица 3.1 – Типичная геоэлектрическая модель Непского свода

Н, м	$\rho$ , Ом·м	Свита	Глубина залегания кровли, м
15	364	илгинская	0
110	50	верхоленская	-15
149	66	литвинцевская	-125
369	505	ангарская	-274
500	90	бельская	-643
282	149	булайская	-1143
128	44	верхнемотская	-1425
138	38	среднемотская	-1553
88	32	нижнемотская	-1691
$\infty$	$\infty$	фундамент	-1779

### 3.2 Распространенные геологические трехмерные неоднородности

Для южной части Сибирской платформы характерно большое количество трехмерных неоднородностей геологической природы, особенности их проявления на геоэлектрическом разрезе в полной мере не изучены. Неоднородности осложняют интерпретацию электроразведочных данных. Исследование влияния на сигналы ЗСБ ЭМ полей, создаваемых неоднородностями, является актуальной задачей электроразведки.

Основной геологической задачей в рамках рассматриваемого региона является обнаружение и оконтуривание залежей УВ, которые локализируются в горизонтах пород, перекрывающих друг друга в едином поле продуктивности. При этом литологические толщи могут иметь близгоризонтальное залегание слоев или быть смятыми с образованием положительных (поднятий) или отрицательных (опусканий) структурных форм. Часто образуются инъективные структуры – диапиры, соляные купола. Большое значение для формирования и строения залежей УВ имеют разрывные нарушения.

Кроме того, в строении ряда нефтегазоносных регионов, в частности, Сибирской платформы, значительная роль принадлежит магматическим образованиям – траппам, а также залежам угля (Якутия, Иркутская область) и железных руд (Томская область). Еще одним структурно-вещественным комплексом являются кимберлиты (Якутская алмазоносная провинция). Однако первостепенное значение имеет картирование пластов-коллекторов, непосредственно вмещающих залежи УВ.

Таким образом, при изучении внутреннего строения нефтегазоносных регионов приходится решать проблему картирования целого ряда структурно-вещественных комплексов. Для успешного применения геофизических методов необходимо понять геологическое строение этих комплексов как основы интерпретации физических полей.

Круг характерных структурно-вещественных объектов осадочного чехла Сибирской платформы определен в монографии «Моделирование в разведочной геофизике» [21]. Поскольку модели типичных неоднородностей

определены имеется возможность на основе интерпретационного опыта «ИЭРП» уточнить геометрические и геоэлектрические параметры неоднородностей и произвести трехмерные расчеты для моделей:

- 1) разломной зоны;
- 2) пласта-коллектора;
- 3) железорудного тела.

В зависимости от поставленной геологической задачи, выбранные трехмерные объекты могут являться как объектами поиска, так и источниками ЭМ полей, усложняющих решение геологической задачи.

### **3.3 Выбор оптимального размера источника ЭМ поля: результаты 3D моделирования**

Задачей следующих трехмерных расчетов является оценка чувствительности установки ЗСБ с разной длиной стороны генераторной петли к проявлению трехмерных неоднородностей, типичных для юга Сибирской платформы [63].

Также, помимо выбора оптимального размера источника ЭМ поля, целью этой главы является изучение экранирующего влияния объектов, залегающих на разных глубинах, характера создаваемых ими аномалий, а также степени осложнения упомянутыми аномалиями геоэлектрического разреза.

Рассматриваемым трехмерным объектам характерна различная глубина залегания (см. рисунки 3.2; 3.5; 3.7), расчеты произведены для четырех типов установок ЗСБ (с разной длиной стороны ГП – 500, 600, 800 и 1000 м). Как упоминалось выше, данные разновидности ГП являются типичными для работ ЗСБ на юге Сибирской платформы. Выбор стороны генераторной петли на данный момент осуществляется исходя из мощности генератора, сети сейсмических профилей и других производственно-методических аспектов.

Фоновая геоэлектрическая модель была рассмотрена и обоснована ранее (Таблица 3.1). Расчеты произведены для профильной сети наблюдения с шагом между приемниками 200 м (см. рисунок 3.2).

Обычно в глубинной модификации ЗСБ расстояние между ПК менее 400 м не используется, поскольку считается, что при исследованиях с данным шагом возможно с приемлемой точностью решить геологические задачи в условиях юга Сибирской платформы. Уменьшение шага влечет финансовые и временные затраты. В случае экспериментального синтетического моделирования производственный и финансовый вопросы не стоят, поэтому расстояние между ПК выбрано 200 м, поскольку данный вид съемки ЗСБ обладает большей детальностью исследования.

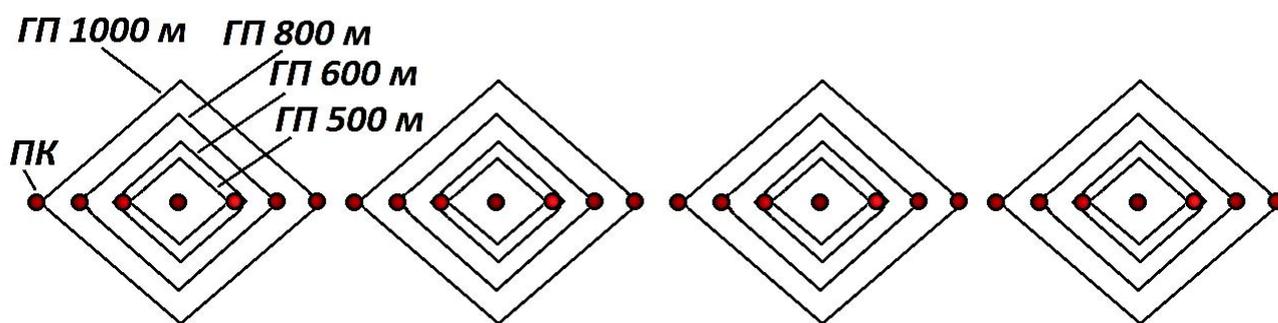


Рисунок 3.2 – Схема наблюдений ЗСБ, используемая в трехмерных расчетах

### 3.3.1 Модель №1: «разломная зона»

На юге Сибирской платформы метод ЗСБ традиционно применяется для решения нефтегазопоисковых задач. При этом необходимо выделять в геологическом разрезе разрывные нарушения, которые ограничивают распространение пласта-коллектора [108, 67, 30].

Встречаются нефтегазоносные районы, характеризующиеся довольно напряженной разрывной тектоникой. К ним относится, например, Непско-Ботуобинская антеклиза Сибирской платформы. Разломы фундамента выявлены по результатам геофизических исследований. Они разделяют фундамент на серию архейских и протерозойских блоков. Для анализа

нефтегазоносности наибольшее значение имеют разломы осадочного чехла, широко распространенные на юге Сибирской платформы.

Так, Непский свод, имеющий строение близкое к концентрическому, разделен разломами на отдельные блоки. Например, на Чаяндинской площади таким является Саманчакитский блок, ограниченный разломами с трех сторон.

Наиболее крупными являются линеаменты – протяженные зоны дислокаций в осадочном чехле. Однако больший интерес для изучения практических вопросов нефтегазоносности представляют разломы более высоких порядков протяженностью до 100-150 км. Амплитуды перемещений по разломам достигали нескольких десятков метров. В упомянутом регионе разрывные нарушения, как правило, имеют северо-восточное или северо-западное простирание. Выражены они зонами отдельных разрывных нарушений, интенсивной трещиноватости, линейной складчатости, повышенной дислоцированности осадочных толщ.

Большинство исследователей предполагают, что их формирование было связано с тектоническим развитием соседней Саяно-Байкальской области, и движения происходили в направлении с юго-востока на северо-запад. При этом имели место горизонтальные перемещения, обусловленные наличием слоев пластичных пород.

Таким образом, сочетание круто- и пологопадающих разрывов с коллекторскими и экранирующими свойствами отдельных толщ разреза создавало благоприятные условия для миграции углеводородов и их концентрации в виде залежей. Часто залежи формировались на поднятиях, интенсивно нарушенных разломами, которые служили путями миграции нефти и газа. В тоже время необходимо иметь в виду, что в хрупких породах разломы могут разрушать ловушки для УВ, в пластичных глинистых горизонтах нарушенность менее интенсивная. Для понимания общей тектонической обстановки необходимо выявить разломы круто-, пологосекущие, согласные по отношению к вмещающей толще. Отсюда понятно, насколько важное значение

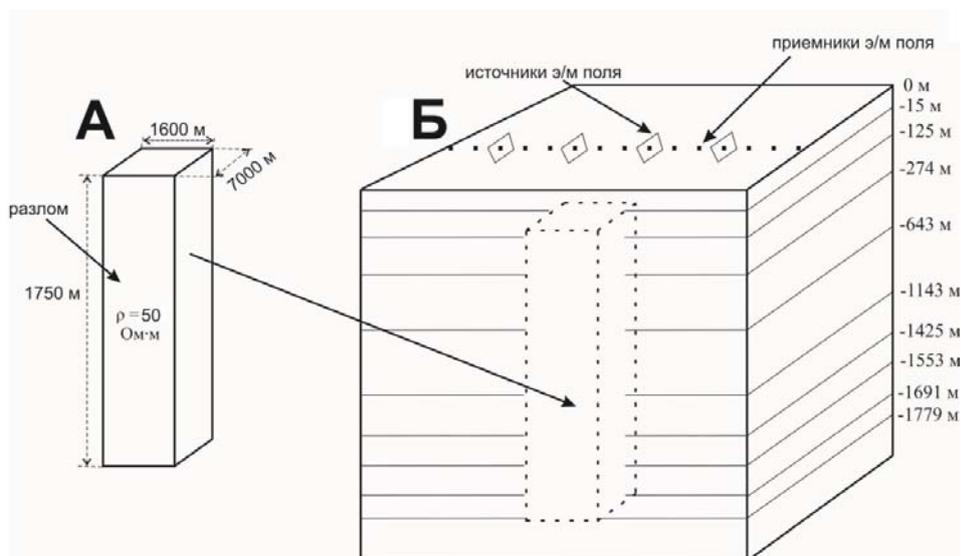
имеет картирование разрывных нарушений геофизическими и другими методами.

Задачей трехмерного моделирования является изучение и анализ чувствительности сигналов ЗСБ, от источников с разной длиной стороны ГП (500, 600, 800 и 1000 м), полученных от фоновой модели, к влиянию геологического объекта (крутопадающего разлома), располагающегося вкрест простирания разреза (см. рисунок 3.3). Разлом перекрыт верхнекембрийскими отложениями мощностью 15 м.

Выбор конкретных физических параметров разлома осуществлялся путем анализа результатов съемки ЗСБ на тектонически нарушенных участках юга Сибирской платформы [5, 23].

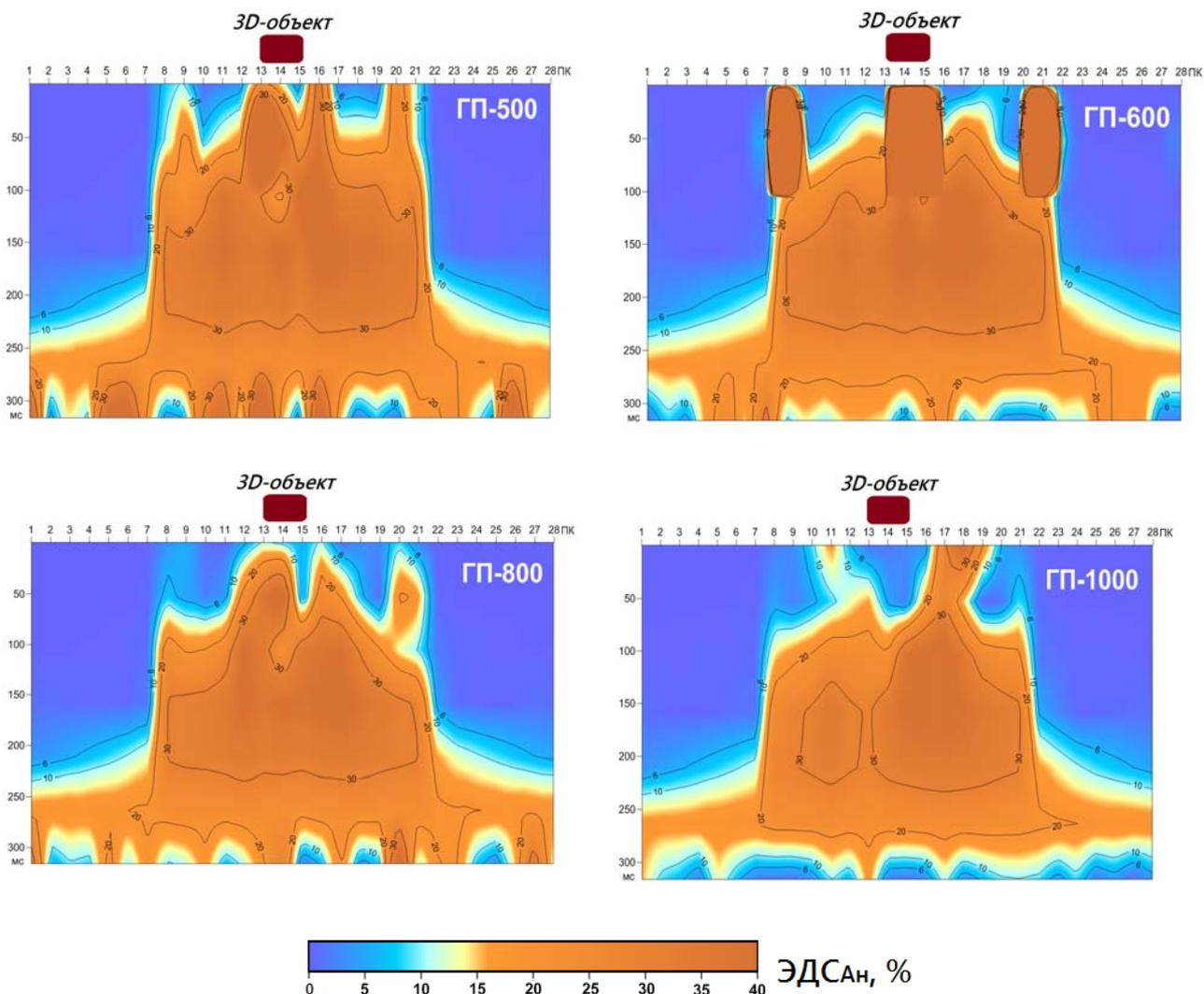
Необходимо отметить, что данный объект по своим геометрическим и геоэлектрическим свойствам является аппроксимацией не только непосредственно самой зоны сместителя, но и зоны трещиноватости. Как правило, в рамках рассматриваемой территории зона сместителя представлена брекчией дробления, зоны трещиноватости представлены нарушенными породами, слагающими вмещающую среду.

Профиль наблюдений проходит через эпицентр объекта, шаг между приемниками ЭМ поля составляет 200 м (всего 28 приемников ЭМ поля) (см. рисунки 3.2, 3.3).



**Рисунок 3.3 – Трехмерная неоднородность (разломная зона - А) относительно сети наблюдения (Б)**

На разрезах аномального поля ( $\text{ЭДС}_{3\text{Dшум}}-\text{ЭДС}_{1\text{D}}$ ) для сигналов, зарегистрированных от источников со стороны ГП – 500, 600, 800 и 1000 м прослеживается четкая аномалия во всем временном диапазоне (см. рис. 3.4). В силу инерционности установки, амплитуда аномалии (в ВЧР) уменьшается с увеличением стороны ГП.



**Рисунок 3.4 – Разрезы аномального поля разломной зоны, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)**

Для крутопадающего разлома были получены значения амплитуды аномалии, выявленной по данным от источников с различной длиной стороны ГП (Таблица 3.2). Кроме того, в таблице приведены истинные значения амплитуд аномалий (здесь и далее, под *истиной аномалией* понимается

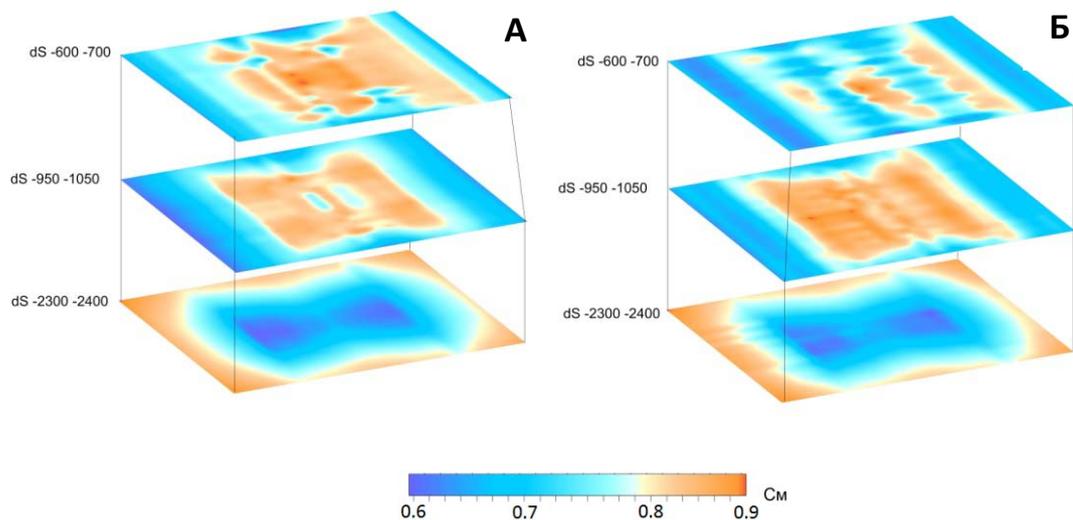
аномальная ЭДС ( $\text{ЭДС}_{3D}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ ) без влияния шума) для зондирований с разной стороной ГП.

В силу отличий на ранних временах сигналов, вызванных разным временем становления поля, от источников с разной длиной стороны ГП единого истинного значения амплитуды аномалии не существует. Однако будут приведены индивидуальные значения истинной аномалии для сигналов от источников с разной длиной стороны ГП.

Таблица 3.2 – Амплитуды аномалий, создаваемых разломной зоной, по данным от источников с разной стороной ГП

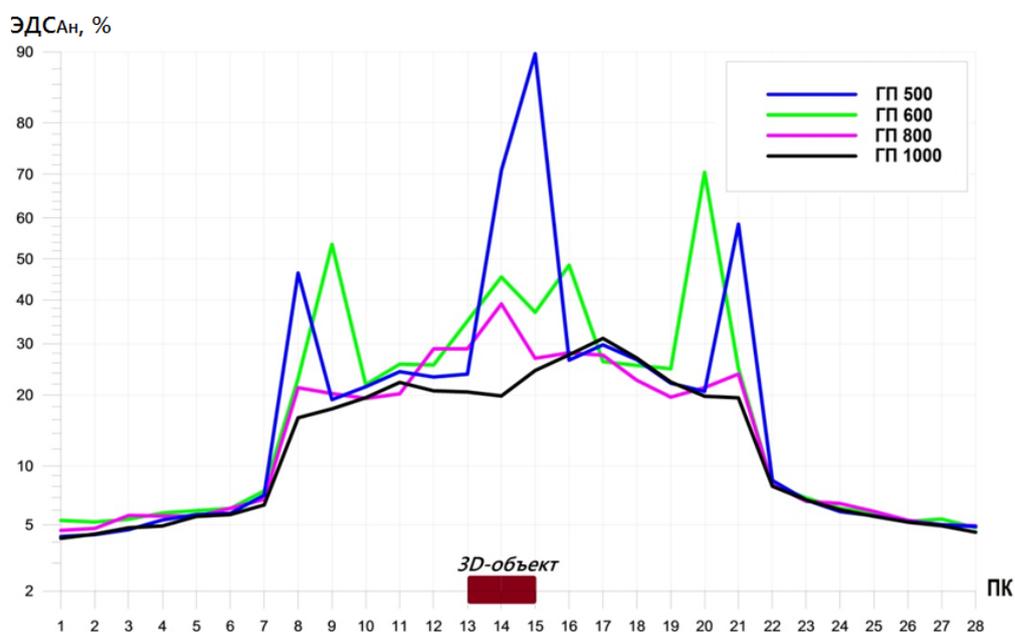
Длина стороны ГП, м	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ )	23.2	15.3	14.28	13.7
Истинная амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ )	22.8	15	14.15	13.4
Вклад шума в аномалию, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}}$ - $\text{ЭДС}_{3D}$ )	0.6	0.2	0.2	0.1

Большее отклонение трехмерных кривых «ГП-500» от одномерных обусловлено повышенной чувствительностью сигналов ЗСБ к верхней части разреза, предположительно, вследствие меньшего момента источника, а, следовательно, меньшей инерционности установки. Вышесказанное подтверждают карты прироста кажущейся проводимости ( $\Delta S$ ), для разных интервалов глубин (см. рисунок 3.5) по сигналам «ГП-500» и «ГП-1000». Карты  $\Delta S$  иллюстрируют следствие влияния инерционности установки на кривые ЗСБ – для кривых «ГП-1000», геоэлектрические свойства ВЧР осреднены и проявление неоднородности сглажено.



**Рисунок 3.5 – Карты прироста кажущей проводимости ( $\Delta S$ ) для различных интервалов глубин по данным: А – «ГП-500»; Б – «ГП-1000»**

Анализ результатов трехмерных расчетов для разломной зоны показал, что при картировании аномалий рассматриваемого масштаба различие в сигналах, зарегистрированных от источников с разной длиной стороны, не принципиальное и обуславливается преимущественно инерционностью установок больших размеров, что также иллюстрируется на графиках аномалии (см. рисунок 3.6).



**Рисунок 3.6 – Графики аномалии от разломной, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» зоны (под графиками обозначена проекция на дневную поверхность)**

### 3.3.2 Модель №2: «пласт-коллектор»

Типичными неоднородностями, являющимися объектами исследования методом ЗСБ на юге Сибирской платформы, являются пласты-коллекторы, как с водным, так и с нефтегазовым насыщением. Обычно, в рамках Непского свода, пласты-коллекторы представлены доломитами, алевролитами и песчаниками [10, 88, 29].

Геологическое строение месторождений УВ отличается значительным разнообразием. Чаще всего это слоистые толщи большой фациальной изменчивости и переменной мощности, в той или иной степени нарушенные разломами, что и приводит к формированию литологических и тектонических ловушек. Залегание может быть близгоризонтальным или складчатым [75]. Залежи нефти и газа могут быть пластово-сводовыми, пластовыми или другой морфологии. Во многих случаях они занимают различные уровни в пределах достаточно мощных стратиграфических интервалов (500 метров и более). В процессе формирования залежей нефть и газ могут мигрировать по поверхностям несогласия из одних слоев в другие (боковая миграция) или в различных направлениях по разломам.

Пласты-коллекторы выклиниваются, нарушаются разломами. Последние обеспечивают гидродинамические связи между тектоническими блоками. Залежи УВ имеют литологические ограничения. Обычно состав пластов определяется переслаиванием мелкозернистых песчаников и аргиллитов, залегающих под покрывкой глинистой толщи мощностью около 200 м.

Весьма показательным является Чаяндинское нефтегазовое месторождение, уникальное по запасам газа и сложное по геологическому строению. Так, на одном из участков пласт-коллектор, сложенный главным образом песчаниками, залегает на серо-зеленых глинах и алевролитах и перекрывается аргиллитами. На другом участке пласт-коллектор содержит среднезернистые среднесцементированные олигомиктовые и кварц-полевошпатовые

нефтенасыщенные песчаники. Фильтрационно-емкостные свойства являются благоприятными. Открытая пористость коллекторов варьирует от 6 до 19 %, проницаемость  $(3-20) \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^3$ . На ряде площадей наилучшими ёмкостными свойствами обладают некоторые разновидности доломитов.

Задачей трехмерного моделирования на данном этапе является анализ чувствительности сигналов ЗСБ к влиянию углеводородонасыщенного пласта-коллектора, залегающего на глубинах 450 и 1700 м. Расчеты производились в двух вариантах для того, чтобы оценить чувствительность сигналов от источников с разной длиной стороны ГП (500, 600, 800 и 1000 м) к верхней и нижней частям разреза [97, 12].

В фоновую модель помещен трехмерный объект (для расчета №1 – глубина залегания кровли 457 м; для расчета №2 – 1707 м), являющийся аппроксимацией углеводородонасыщенного пласта-коллектора с сопротивлением 6 Ом·м [14, 17, 22].

Для территории Непского свода сопротивление коллектора 6 Ом·м является типичным, что подтверждают петрофизические исследования. Для расчета сопротивления коллектора необходимо знать петрофизическую зависимость, которая связывает сопротивление коллектора и его параметры (коэффициент пористости (Кп) и коэффициент водонасыщенности (Кв)) [39].

В случае, если в слое несколько коллекторов, Кп и Кв рассчитываются как средневзвешенные значения коллекторов, входящих в интересующий геоэлектрический слой, а эффективная толщина суммируется.

Для исследуемой территории петрофизическая модель описывается уравнениями Дахнова-Арчи (7):

$$P_n = \frac{\rho_{вп}}{\rho_в}; P_n = \frac{\rho_{нп}}{\rho_{вп}}, \quad (7)$$

где  $P_n$  – параметр пористости, ед.;

$P_n$  – параметр насыщения, ед.;

$\rho_{вп}$  – сопротивление водонасыщенной породы, Ом·м;

$\rho_в$  – сопротивление пластовой воды, Ом·м;

$\rho_{нп}$  – сопротивление насыщенной породы (сопротивление коллектора), Ом·м.

Сопротивление пластовой воды известно по результатам испытания скважин (0.042 Ом·м). По результатам петрофизических лабораторных исследований керна известны коэффициент и показатели степени  $K_n$  и  $K_e$ , описывающие влияние на величину  $P_n$  формы поровых каналов и характер распределения флюидов в поровом пространстве, соответственно формулам (8).

$$P_n = 0.79 \cdot K_n^{-1.94} ; P_n = 1.36 \cdot K_e^{-1.51} , \quad (8)$$

где  $K_n$  – коэффициент пористости, %;

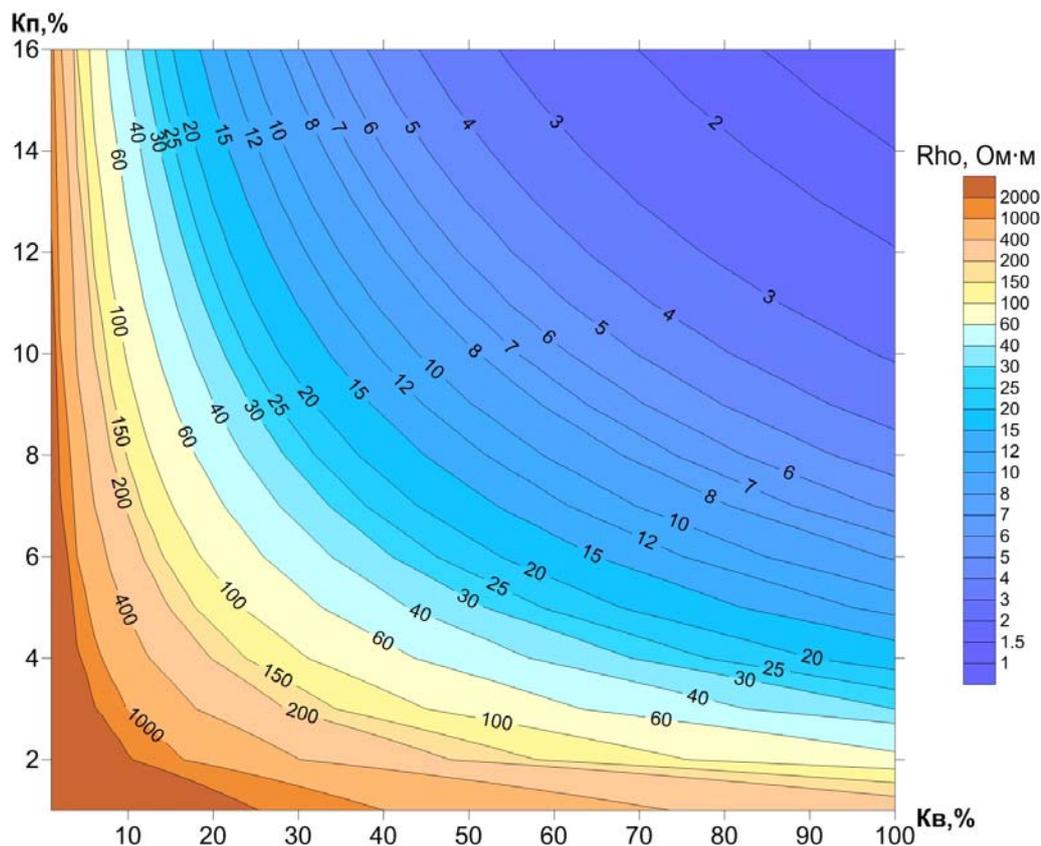
$K_e$  – коэффициент водонасыщенности, %.

Из формул расчета параметра пористости и параметра насыщения можно вычислить сопротивление насыщенной породы (сопротивление коллектора).

$$\rho_{ин} = P_n(K_n) \cdot P_n(K_e) \cdot \rho_e = 0.79 \cdot K_n^{-1.94} \cdot 1.36 \cdot K_e^{-1.51} \cdot 0.042 \quad (9)$$

Подставляя в полученную формулу (9) средневзвешенные значения коэффициента пористости и коэффициента водонасыщенности, рассчитывается сопротивление коллектора.

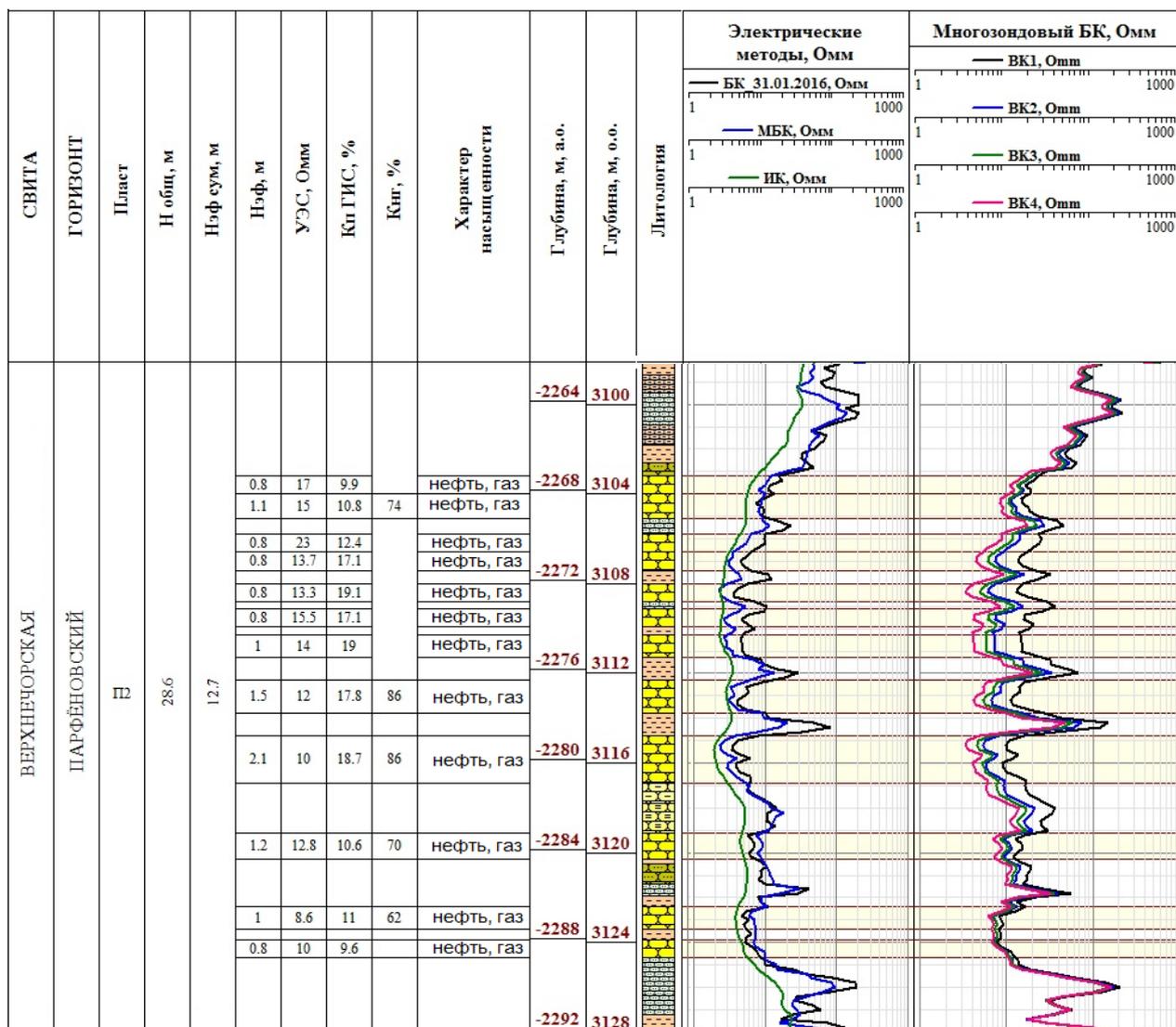
Для рассматриваемой территории построены номограммы зависимости продольного сопротивления коллектора от  $K_n$  и  $K_e$ . По результатам ГИС известно, что для Непского свода типичными являются  $K_n = 8 - 10\%$  и  $K_e = 60 - 70\%$  (см. рисунок 3.7).



**Рисунок 3.7 – Номограмма зависимости продольного сопротивления коллектора от  $K_p$  и  $K_v$  для территории Непского свода**

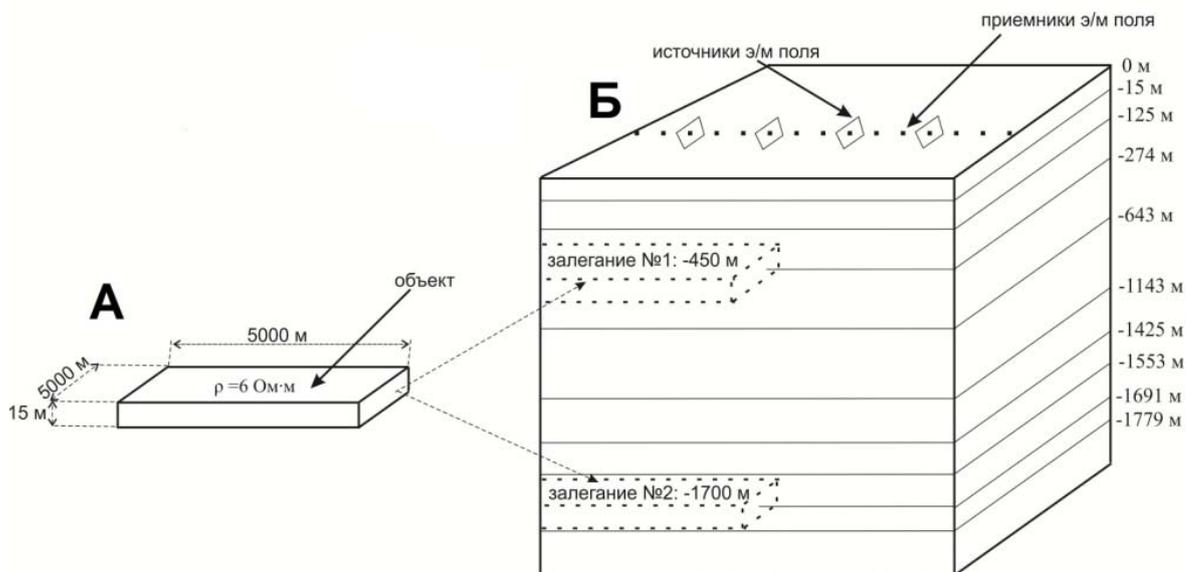
Соответствующее указанным параметрам сопротивление коллектора – 6 – 7 Ом·м [36, 85, 123].

Также, упомянутое сопротивление коллекторов для рассматриваемой территории подтверждают каротажные диаграммы [17, 72, 37, 70]. На рисунке 3.8 представлены фрагменты диаграмм электрического каротажа, полученные на одной из скважин Непского свода. Геологическое строение области, в которой пробурена скважина, можно считать типичным для рассматриваемой территории.



**Рисунок 3.8 – Фрагменты диаграмм электрического каротажа, полученные на одной из скважин Непского свода, соответствующие парфеновскому горизонту верхнечонской свиты**

Трехмерное моделирование проводилось для профильной системы наблюдений. Профиль проходит через эпицентр объекта, шаг между приемниками ЭМ поля составляет 200 м, всего 28 приемников (см. рисунки 3.2, 3.9).



**Рисунок 3.9 – Трехмерный объект (пласт-коллектор) (А) относительно сети наблюдения (Б)**

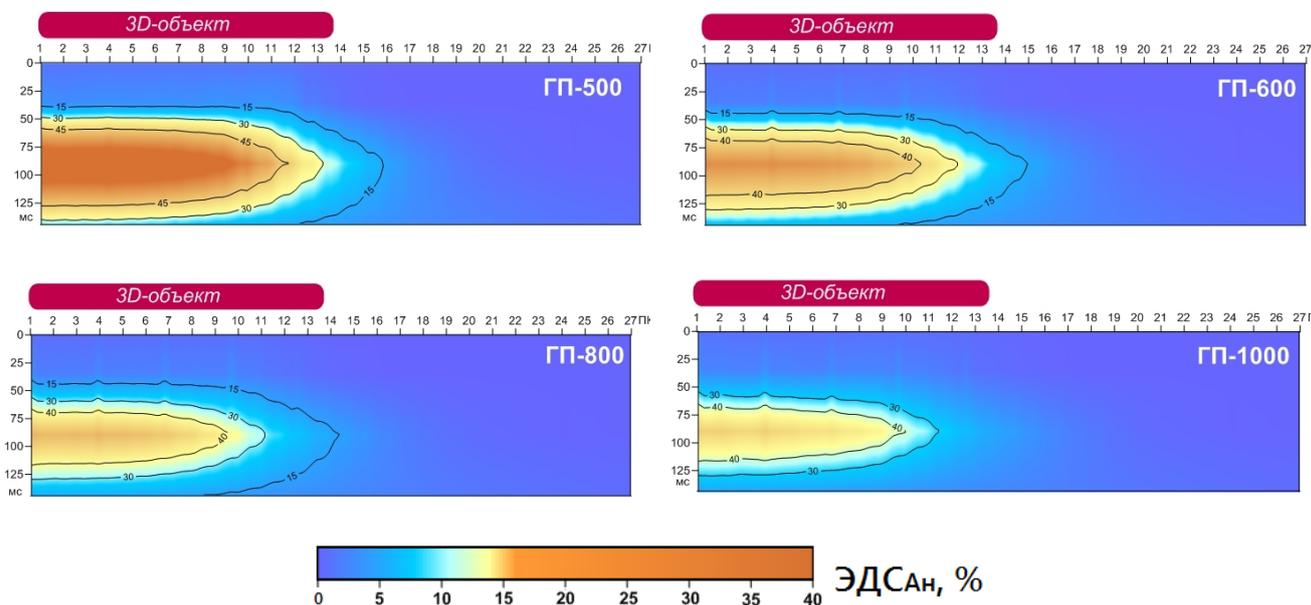
От УВ коллектора в верхней части разреза ( $H = -450$  м) рассчитаны амплитуды аномалии для источников с различной длиной стороны ГП (Таблица 3.3). Результат инверсии кривых, осложненных влиянием неоднородности в верхней части разреза, не позволяет оценить ошибку инверсии в силу инерционности установок с большей длиной стороны ГП [18].

Таблица 3.3 – Амплитуды аномалий, создаваемых пластом-коллектором на глубине 450 м, по данным от источников с разной стороной ГП

Длина стороны ГП, м	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	20.2	13.2	12	11.9
Истинная амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	19.6	13	11.8	11.8
Вклад шума в аномалию, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{3D}$ )	0.6	0.2	0.2	0.1

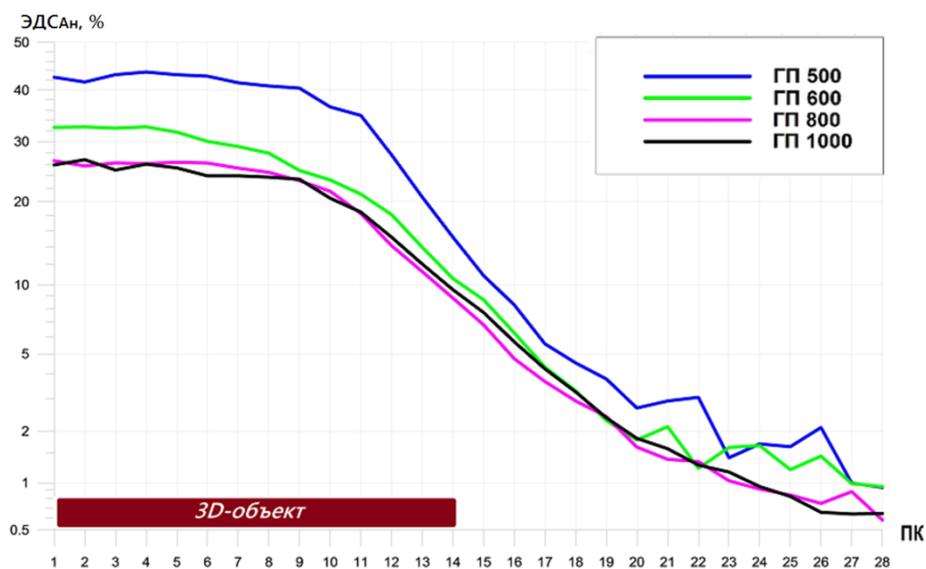
На разрезах аномального поля ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{1D}$ ) для всех ГП в широком временном диапазоне прослеживается четкая аномалия (см. рисунок 3.10).

Аномалия уменьшается с увеличением стороны ГП, что обусловлено меньшей чувствительностью сигналов от источников с большей стороной ГП к неоднородностям ВЧР.



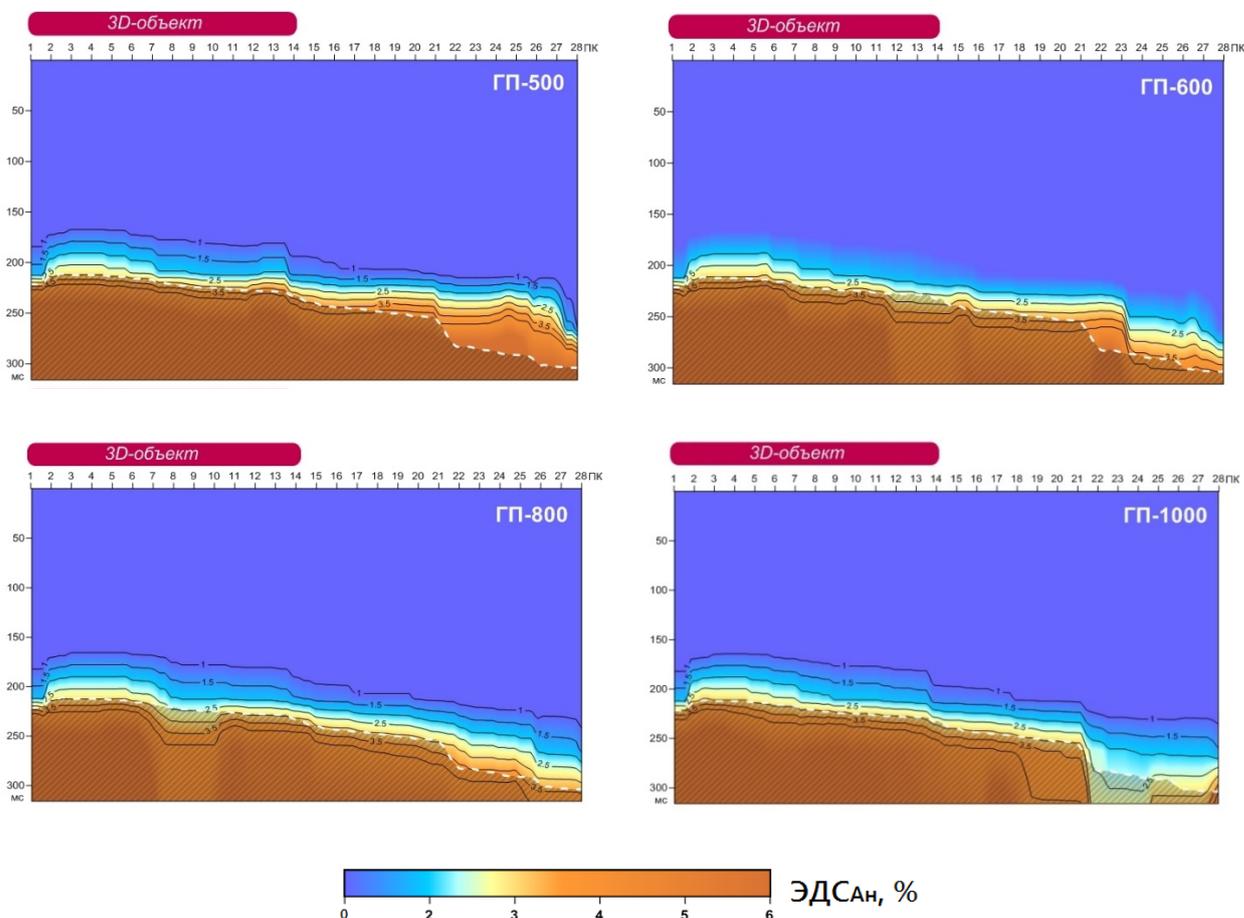
**Рисунок 3.10 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 450 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность), построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000»**

На графиках аномалии также прослеживается аномалия большой амплитуды (см. рисунок 3.11).



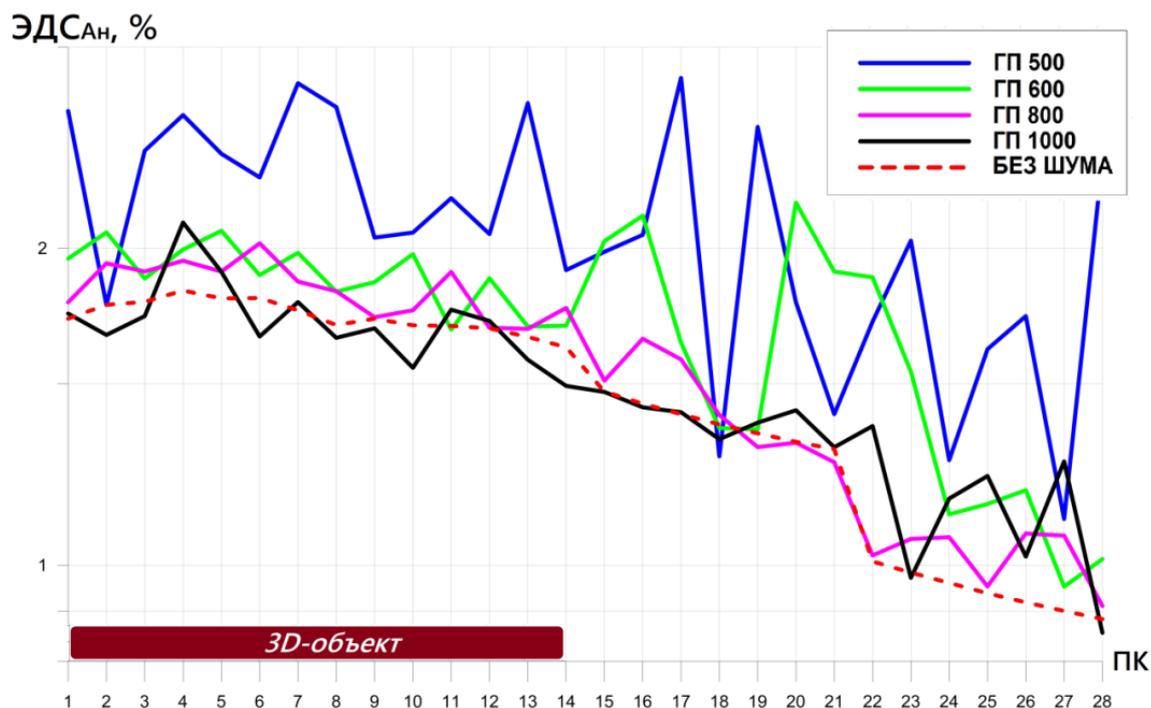
**Рисунок 3.11 – Графики аномалии от пласта-коллектора на глубине 450 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность), построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000»**

На рисунке 3.12 представлены разрезы аномального поля, построенные по результатам расчетов с коллектором, глубина залегания кровли которого составляет 1700 м.



**Рисунок 3.12 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 1700 м, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (над разрезами показана проекция на дневную поверхность). Белым пунктиром обозначена истинная аномалия (без влияния шума)**

Большие аномалии по сигналам от ГП с меньшей стороны объясняются большим вкладом шума вследствие худшего отношения сигнал/помеха. На разрезах видно, что наибольшее отличие от истинной аномалии (белый пунктир) имеют аномалии по сигналам с меньшей стороной ГП. Подобная ситуация также прослеживается и на графиках аномалии (см. рисунок 3.13).



**Рисунок 3.13 – Графики аномалии от пласта-коллектора на глубине 1700 м, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

На поздних временах шум маскирует влияние пласта-коллектора, что делает невозможным выделение и оконтуривание последнего. При увеличении стороны ГП отношение сигнал/шум возрастает и разрезы аномального поля имеют наибольшее сходство с разрезами, построенными по незашумленным данным, что говорит о большей информативности сигналов «ГП-1000».

Наименьшая амплитуда аномалии прослеживается для «ГП-1000», что иллюстрирует таблица амплитуд аномалии (Таблица 3.4). Данный факт обусловлен большей подверженности влиянию ЭМ помех сигналов с меньшей стороной ГП. Согласно расчетам, истинная амплитуда аномалии составляет 1.4% ( $ЭДС_{3D}-ЭДС_{1D}$ ). Поэтому лучшее приближение зарегистрированной аномалии к этому значению говорит о большей точности оконтуривания исследуемой аномалии.

Поскольку аномалия, превышающая уровень шума в 2 и более раз, считается выделяемой, аномалии по всем сигналам, кроме «ГП-500», выделяемы на заданном уровне ЭМ помех.

Таблица 3.4 – Амплитуды аномалий, создаваемых пластом-коллектором на глубине 1700 м, по данным от источников с разной стороной ГП

Длина стороны ГП, м	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D_{\text{шум}}}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ )	2.5	2.1	1.8	1.6
Истинная амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ )	1.4	1.4	1.4	1.4
Вклад шума в аномалию, % ( $\text{ЭДС}_{3D_{\text{шум}}}$ - $\text{ЭДС}_{3D}$ )	1.1	0.7	0.4	0.2

Для расчетов с коллектором на глубине 1700 м была произведена инверсия, по результатам которой были построены геоэлектрические разрезы, позволяющие оценить точность оконтуривания аномалии (см. рисунок 3.14). Инверсия производилась специалистом, не имевшим представления о характеристиках исследуемого объекта [42].

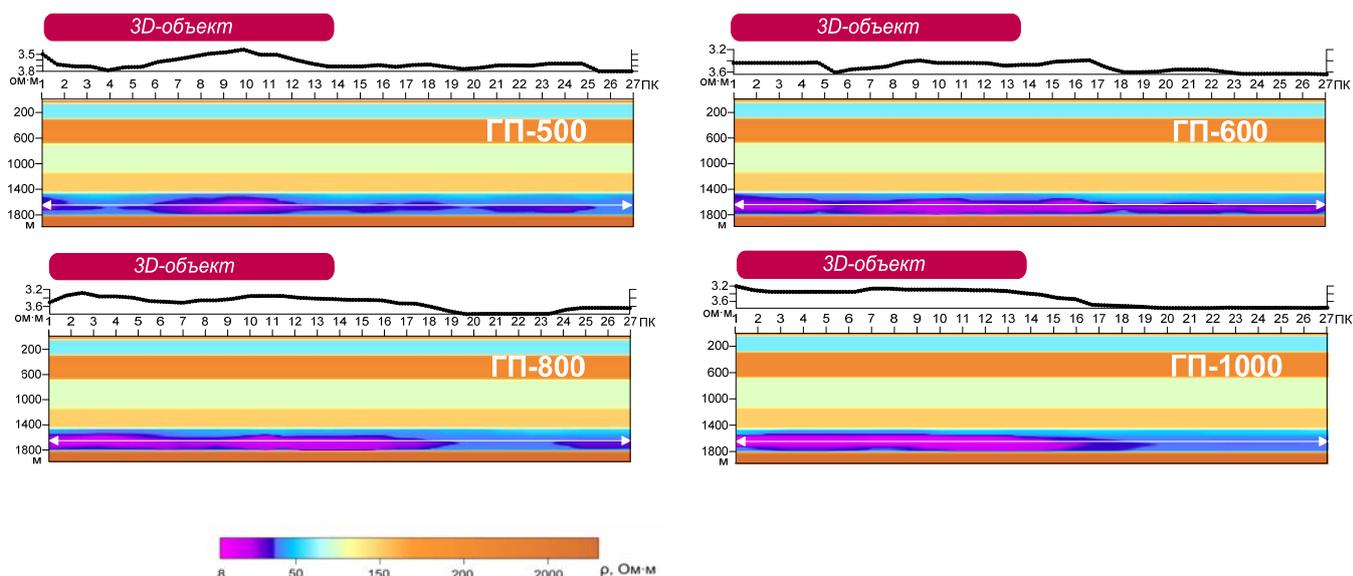


Рисунок 3.14 – Геоэлектрические разрезы УЭС, построенные по 3D кривым от источников со стороной ГП – 500, 600, 800, 1000 м (над разрезами представлены графики прироста сопротивления для глубины 1700 м и проекция трехмерного объекта на поверхность)

Аппарат автоматической инверсии данных ЗСБ для описываемой работы был настроен следующим образом:

- Использовалась одномерная прямая задача для расчета одномерных переходных характеристик;
- В качестве оценки погрешности использовалась невязка между теоретической кривой и псевдопрактической кривыми;
- Расчет невязки производился в диапазоне от 10 до 300 мс;
- За стартовую модель принималась фоновая модель;
- Для поиска глобального минимума целевой функции использовался алгоритм «имитации отжига» в многомерной модификации;
- Диапазон сопротивлений, в котором осуществлялся поиск, для каждого слоя задавался индивидуально.

Производить одномерную инверсию 3D данных некорректно, однако, выявить аномалию и проследить ее амплитуду вполне возможно. На основе анализа геоэлектрических разрезов и ошибок подбора модели, установлено, что наименьшей амплитудой обладает аномалия – «ГП-500» (аномальные значения теряются на фоне заданного шума), а наибольшей «ГП-1000». По кривым «ГП-1000» аномалия уверенно прослеживается на геоэлектрическом разрезе. Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии, свидетельствуют, что *аномалия амплитудой >1% выделяема*.

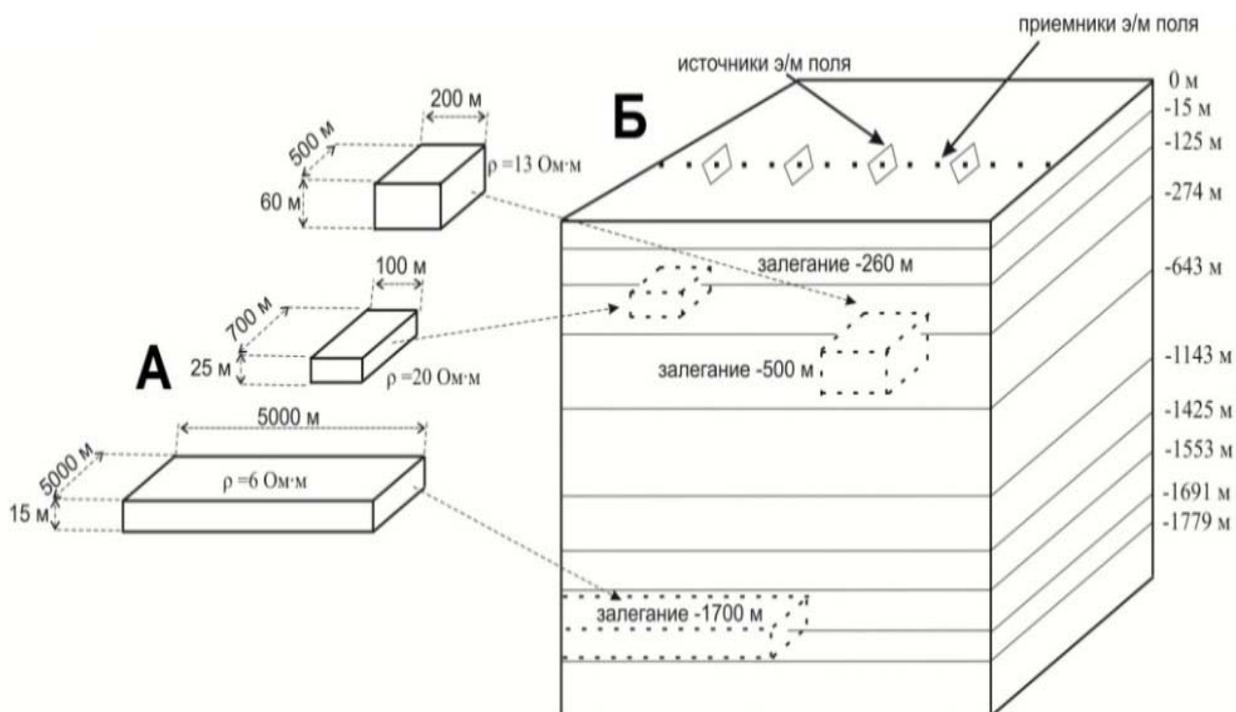
Для пласта-коллектора, залегающего в нижней части разреза (Н = - 1700 м), ошибки инверсии данных от источников с различной длиной стороны ГП, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Погрешность инверсии для пласта-коллектора на глубине 1700 м, для кривых от источников с разной стороной ГП

Размер стороны ГП, м	500	600	800	1000
Ошибка восстановления модели, %	11.2	9.1	7.7	6.9

На территории юга Сибирской платформы распространены трехмерные неоднородности, залегающие в ВЧР, которые осложняют индукционные переходные характеристики. Упомянутыми неоднородностями могут являться талики, дайки, небольшие разломы, пласты коллекторы и т.д. На фоне этого влияния выявление пласта-коллектора в подсолевом комплексе усложняется.

Рассмотрим искажение аномалии, создаваемой пластом-коллектором, вызванное влиянием перекрывающих локальных неоднородностей (см. рисунок 3.15).

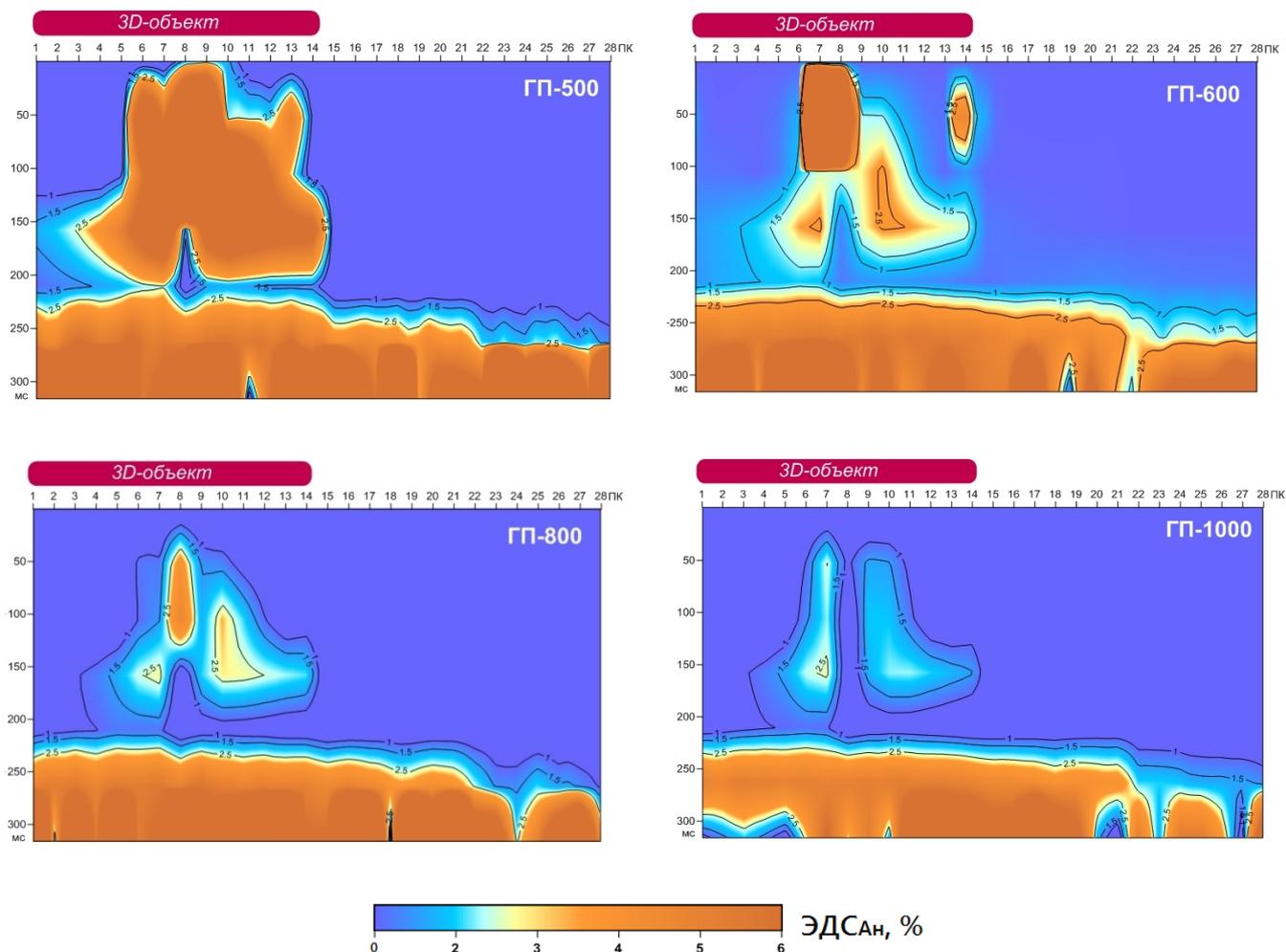


**Рисунок 3.15 – Пласт-коллектор, перекрытый проводящими неоднородностями (А), относительно сети наблюдения (Б)**

На рисунке 3.16 представлены разрезы аномального поля, создаваемого пластом-коллектором и перекрывающими его неоднородностями.

Результаты моделирования для неоднородности на глубине 450 м позволяют сделать вывод, что сигналы «ГП-500» больше всего чувствительны к ВЧР. Однако в силу небольшого отношения сигнал/шум выделить коллектор в нижней части разреза на заданном уровне помех невозможно. С увеличением стороны ГП влияние приповерхностных неоднородностей нивелируется,

отношение сигнал/шум растет, и аномалия от исследуемого объекта проявляется на разрезе.



**Рисунок 3.16 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 1700 м, перекрытого проводящими неоднородностями, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)**

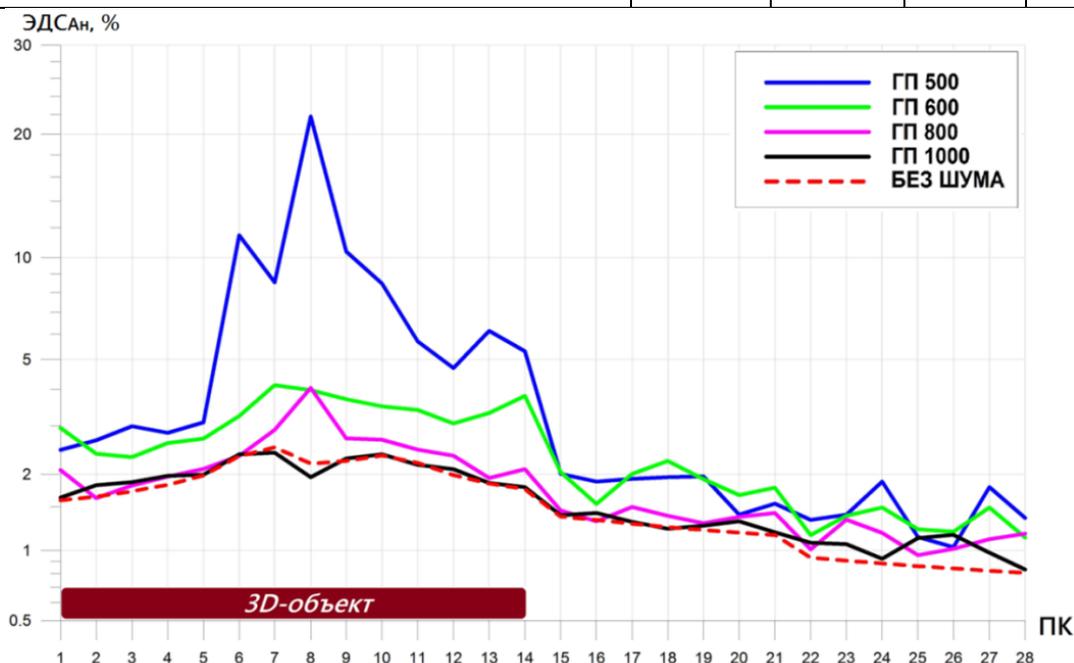
Источник со стороной 1000 м сглаживает влияние неоднородностей в ВЧР, однако сигналы от такого источника наиболее чувствительны к нижней части разреза в силу большего отношения сигнал/шум. Сигналы «ГП-600» и «ГП-800» не имеют большого отличия друг от друга в отношении чувствительности как к верхней, так и к нижней частям разреза.

Меньшую чувствительность сигналов от источников с меньшей стороной ГП к нижней части разреза подтверждает таблица амплитуд аномалии (Таблица 3.6) и графики аномалии (см. рис. 3.17). Из таблицы следует, что наибольшее

сходство с истинной аномалией (1.4%), создаваемой коллектором без учета ЭМ помех и перекрывающих отложений, имеют аномалии по сигналам с большей стороной ГП.

Таблица 3.6 – Амплитуды аномалии, создаваемой пластом-коллектором на глубине 1700 м, с учетом влияния перекрывающих неоднородностей, по данным от источников с разной стороной ГП

Размер стороны ГП, м	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии (коллектор + перекрывает объекты), % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	3.2	2.4	2.1	1.9
Истинная амплитуда аномалии (без перекрывает объектов), % ( $\text{ЭДС}_{3D} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	1.4	1.4	1.4	1.4
Вклад шума в аномалию, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{3D}$ )	1.8	1	0.7	0.5



**Рисунок 3.17** Графики аномалии от пласта-коллектора на глубине 1700 м, перекрытого проводящими неоднородностями, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (под графиками показана проекция на дневную поверхность)

### 3.3.3 Модель №3: «рудное тело»

Железорудные месторождения известны на ряде площадей Сибирской платформы в породах фундамента и осадочного чехла: пластовые тела железных руд осадочного типа в Западной Сибири, сложные жильно-пластовые тела гидротермального типа в Восточной Сибири (Ангаро-Илимский район). Наиболее крупной рудоносной площадью является территория Приобья. В тектоническом плане – это северное окончание куполообразного Бакчарского вала северо-восточного простирания. Здесь в породах мезозойского и кайнозойского возраста находятся рудные горизонты мощностью от 3,1-12 до 25 м, которые можно разрабатывать с помощью скважинной гидродобычи.

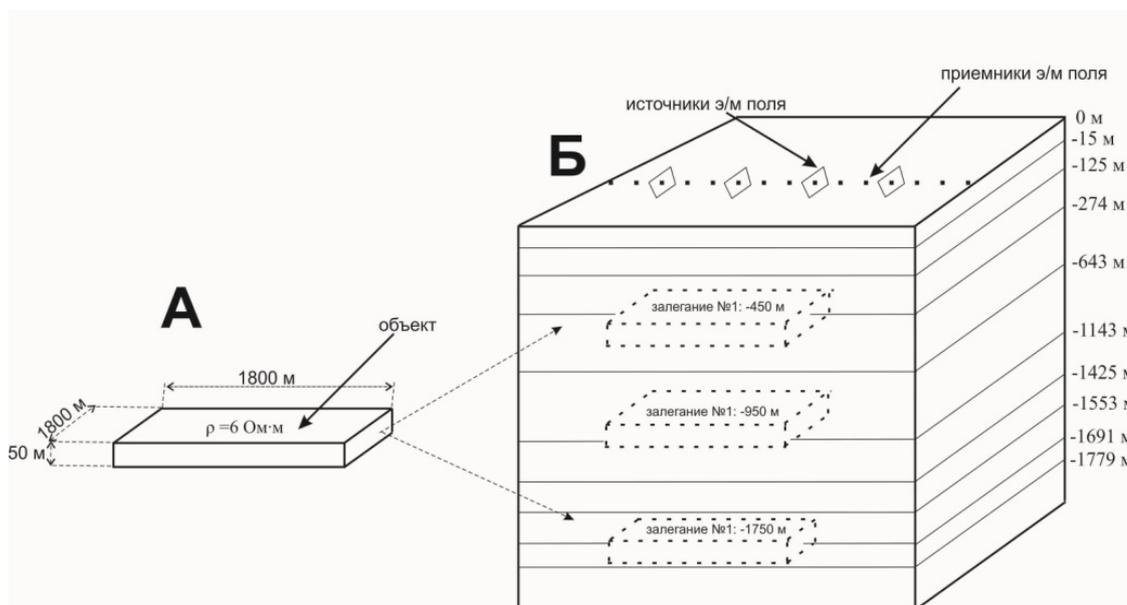
На Бакчарском месторождении три наиболее богатых рудоносных горизонта состоят из терригенных пород – кварцевых песков, прослоев серых глин, железистых песчаников. В обломочном материале кварц, полевой шпат, хлорит, обломки переотложенных железных руд, цемент крупнозернистый, часто сидеритовый. Встречаются прослои и линзы бурых железняков, железистых песчаников, углей, лигнитов. Выделяются несколько минеральных типов руд. Железорудная минерализация представлена сидеритом, гидрогёттом, лептохлоритом в прибрежно-морских отложениях. Руды разделяются на сыпучие и сцементированные, часто имеют оолитовые текстуры [7, 26].

Мощность отдельных пластов и линз в составе горизонтов от нескольких сантиметров до 25 м. Часто эти тела сближаются в одно тело мощностью до 60 м. Наиболее богатые руды локализуются в центральных частях рудных тел (30 и более % железа). Границы тел часто постепенные с переходом по простиранию и вертикали в железистые песчаники, алевролиты и алевритистые глины.

На отдельных участках рудных тел содержатся золото до 1,8 г/т, платина, палладий, повышенные концентрации Mo, Sc, Ge, Be и U [91].

Целью трехмерного моделирования является анализ чувствительности сигналов ЗСБ от источников с разной длиной стороны ГП (500, 600, 800 и 1000 м), полученных от фоновой модели (Таблица 3.1), к влиянию горизонтального залегающего железорудного тела.

С целью изучения разрешающей способности сигналов от источников с разной длиной стороны, к проявлению небольшого слабоконтрастного объекта в разных частях геологического разреза (на глубинах 450 м, 950 м, 1700 м) расчет был произведен в трех вариантах. Геометрические параметры исследуемого объекта и его расположение в разрезе относительно сети наблюдения представлены на рисунке 3.18 [66, 68, 57].



**Рисунок 3.18 – Варианты расположения трехмерного объекта (рудного тела) (А) во вмещающей среде относительно сети наблюдения (Б)**

По кривым ЗСБ от источников с разной длиной стороны были рассчитаны амплитуды аномалии ЭМ поля, создаваемого рудным телом с разной глубиной залегания (Таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Амплитуды аномалий, создаваемых рудным телом с изменением глубины залегания, по данным от источников с разной стороной ГП

	Залегание №1, % (H=-450 м)	Залегание №2, % (H=-950 м)	Залегание №3, % (H=-1700 м)
<b>«ГП-500»</b> (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	7.8	3.2	1.4
(ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	7	2.3	0.6
(ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>3D</sub> )	0.8	0.9	0.8
<b>«ГП-600»</b> (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	7.4	2.8	1.1
(ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	6.8	2.3	0.6
(ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>3D</sub> )	0.6	0.5	0.5
<b>«ГП-800»</b> (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	6.9	2.5	0.9
(3D-1D)	6.6	2.2	0.6
(ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>3D</sub> )	0.45	0.3	0.3
<b>«ГП-1000»</b> (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	6.3	2.3	0.7
(ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	6.21	2.2	0.6
(ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>3D</sub> )	0.3	0.1	0.1

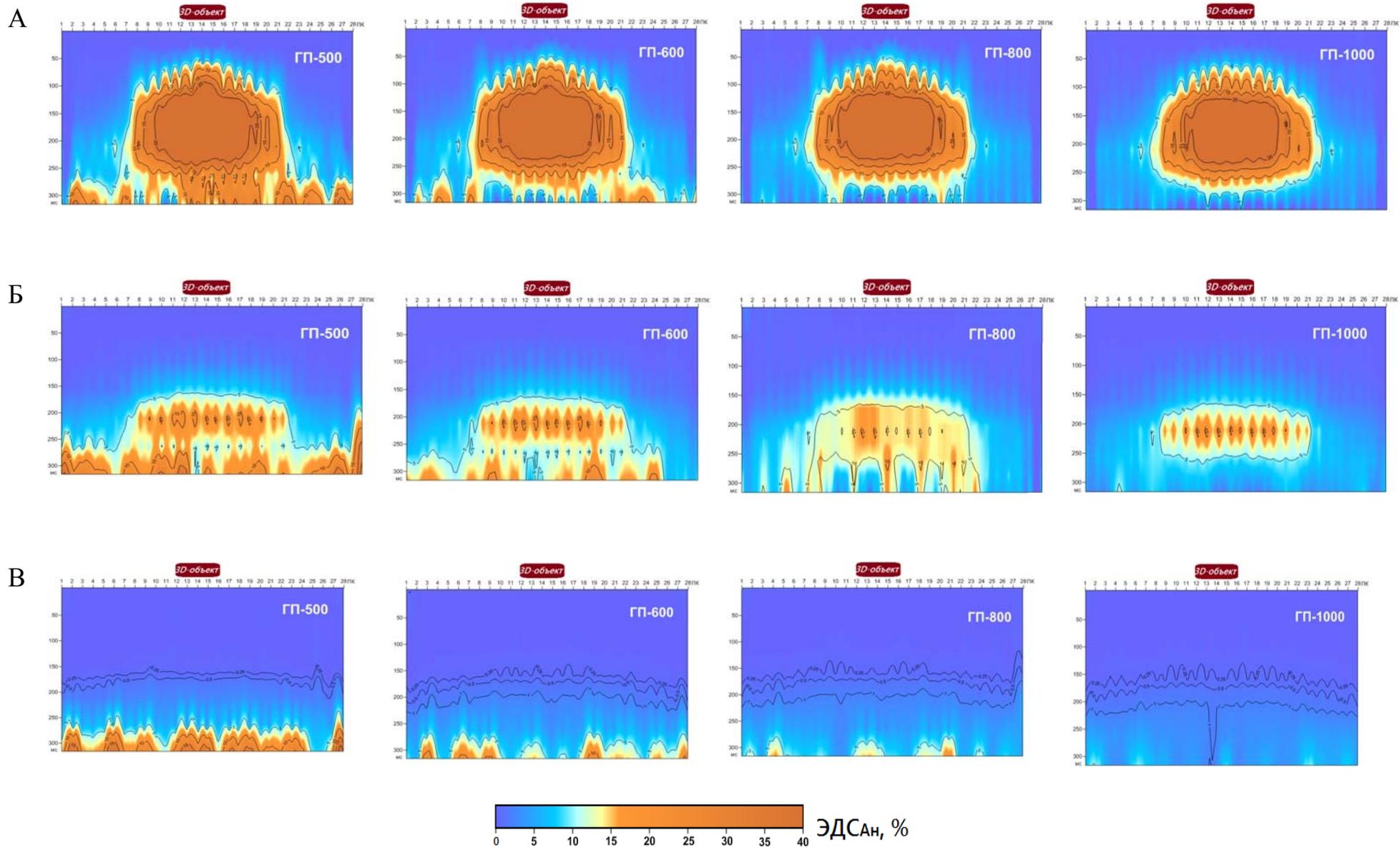
По разрезам аномального поля (ЭДС<sub>3Dшум</sub>-ЭДС<sub>1D</sub>) и из таблицы амплитуд аномалий, видно, что при залегании исследуемого объекта в ВЧР (H= - 450 м) аномалия имеет среднюю амплитуду более 6 % (при длине стороны ГП – 500, 600, 800 и 1000 м), что позволяет уверенно выявить её (см. рисунок 3.19 А).

На разрезах «ГП-500» и «ГП-600» аномалия, создаваемая рудным телом, залегающим в средней части разреза ( $H = - 950$  м), маскируется шумом, и ее выделение и оконтуривание затруднительно. Однако с увеличением стороны ГП, аномалия проявляется чётче, вследствие увеличения отношения сигнал/шум (см. рисунок 3.19 Б).

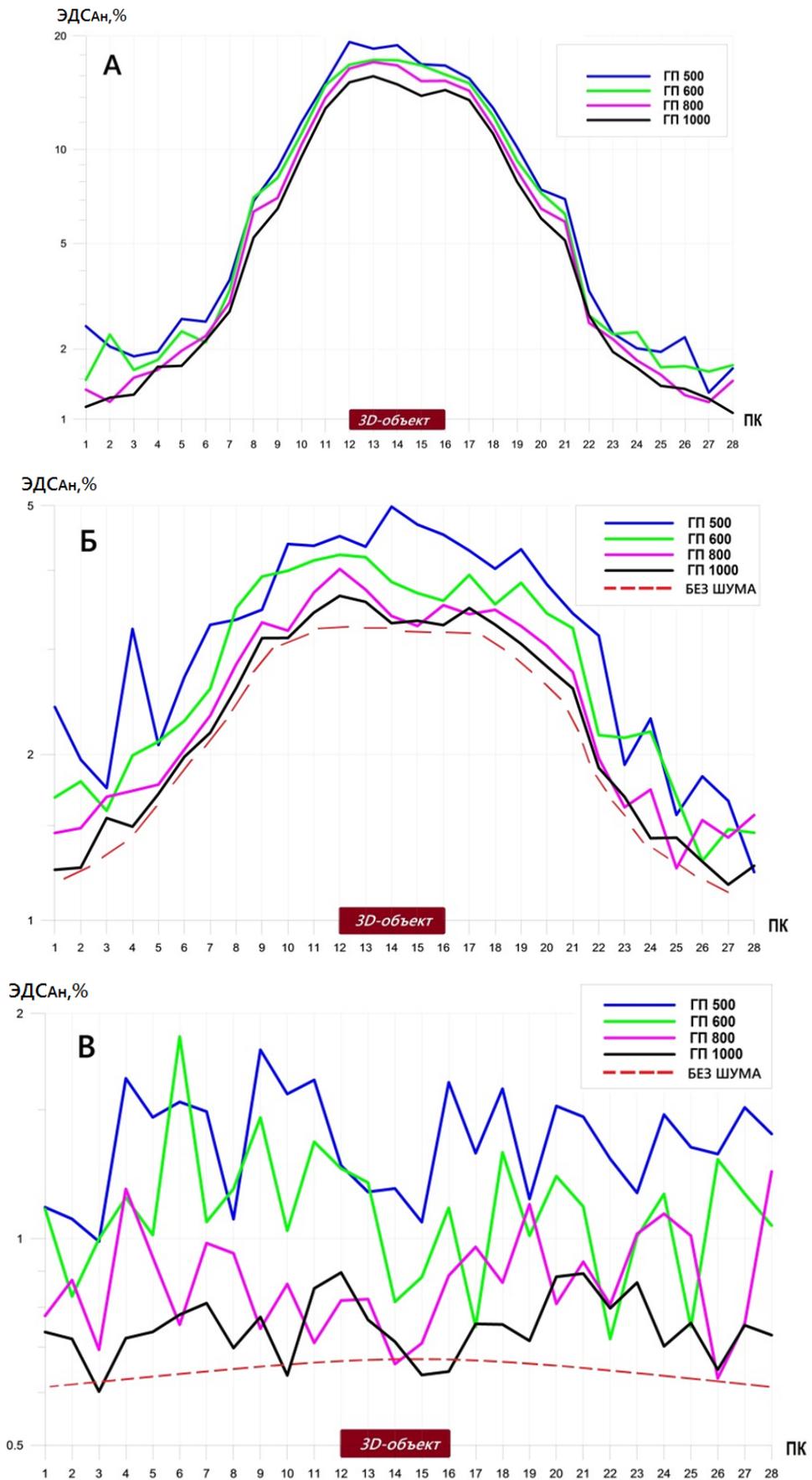
Анализа разрезов аномального поля для расчета с залеганием объекта исследования на глубине 1700 м показал, что при заданном уровне шума и остальных параметрах расчета объект создает слабую аномалию с амплитудой 1-2 %. Согласно таблице 3.7 наибольшая амплитуда аномалии отмечается по сигналам «ГП-500», что обуславливается высокой подверженностью данных сигналов ЭМ помехам. Наименьшая аномалия выявлена по сигналам «ГП-1000». Однако, зная истинную амплитуду аномалии, т.е. без влияния ЭМ помех (0.6 %), можно сделать вывод, что сигналы «ГП-1000» лучше отображают диапазон проявления аномалии от исследуемого объекта. Однако, несмотря на это, оценка влияния на сигнал слабоконтрастного объекта в нижней части разреза – чрезвычайно сложная задача (см. рисунок 3.19 В).

На основе трехмерных расчетов для рудного тела с разной глубиной залегания установлено, что его выделение в ВЧР не является сложной задачей по данным от источников с длиной стороны 500, 600, 800 и 1000 м. Однако задача усложняется с увеличением глубины залегания исследуемого объекта, что, скорее всего, объясняется его слабой контрастностью относительно вмещающих отложений.

Вышесказанное подтверждается графиками аномалии, построенными для рудного тела с изменением глубины залегания (см. рисунок 3.20). Наибольшее сходство с графиками истинной аномалии ( $\text{ЭДС}_{3D}$ - $\text{ЭДС}_{1D}$ ) имеют графики по данным от ГП с большей стороной. На графике, построенном для расчета с рудным телом в ВЧР, обозначить график единой истинной амплитуды аномалии (без шума) не корректно в силу разной инерционности установок.



**Рисунок 3.19 – Разрезы аномального поля рудного тела на глубине: А – 450 м; Б – 950 м; В – 1700 м, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)**



**Рисунок 3.20 – Графики аномалии от рудного тела на глубине: А – 450 м; Б – 950 м; В – 1700, построенные по сигналам от источников «ГП-500», «ГП-600», «ГП-800» и «ГП-1000» м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

### 3.3.4 Выводы

Результаты трехмерных расчетов полностью подтверждают вывод о том, что выбирать оптимальный размер источника ЭМ поля необходимо исходя из характера решаемых задач, поскольку проявление аномалии ЭДС зависит от размера источника ЭМ поля. Вышесказанное в общем виде было известно, однако автором приведены численные критерии и примеры выбора стороны ГП посредством новой технологии интерпретации данных ЗСБ.

Применительно к геологическим условиям Непского свода наиболее чувствительны к неоднородности в нижней части разреза сигналы, полученные от источника поля со стороной 1000 м. С одной стороны, такой сигнал имеет большую амплитуду и отношение сигнал/шум, что подтверждает низкий уровень дисперсии. С другой стороны, такие сигналы имеют неудовлетворительные показатели при изучении верхней части разреза (ВЧР). Кроме того, на самых ранних временах сигнал малоинформативен в силу инерционности больших ГП. При этом, чем больше источник, тем его инерционность значительнее. Следовательно, с большей глубины начинается полезный сигнал и, соответственно, ниже точность восстановления параметров ВЧР.

Сигналы от источника со стороной 500 м отличаются большей чувствительностью к неоднородностям в верхней части разреза. Это объясняется меньшими размерами ГП, а также инерционностью (чем меньше сторона ГП, тем быстрее происходит выключение тока; соответственно, изучение разреза начинается с более ранних времен). Однако на поздних временах сигналы от источника с длиной стороны 500 м имеют большой вклад дисперсии в силу небольшого момента источника, что значительно снижает информативность кривых ЗСБ.

Аномалии ЭДС, выявленные по сигналам от источников с длиной стороны 600 и 800 м, отличаются незначительно. Амплитуды истинных (без учёта ЭМ помех) аномалий по сигналам от упомянутых источников превышают

уровень ЭМ помех более чем в 2 раза. Таким образом, аномалии надежно выделяются в разрезе.

Следует отметить, что с производственной точки зрения использование источника с длиной стороны 600 м более удобно и требует меньших трудозатрат по сравнению с источником с большей длиной стороны. Таким образом, подобный источник является оптимальным для картирования пород осадочного чехла Непского свода вследствие высокой чувствительности сигналов, зафиксированных от него, к строению верхней и нижней частей разреза, а также устойчивости к воздействию ЭМ помех [104, 106, 105]. Очевидно, что наиболее достоверные результаты при изучении всего осадочного чехла до фундамента достигаются путем комплексного применения источников с меньшей и большей длиной стороны ГП [111, 119].

Однако при изучении конкретных глубин и горизонтов необходимо выбирать источник, кривые от которого наиболее чувствительны к данной части разреза. Очевидно, что наиболее достоверные результаты при картировании всего осадочного чехла до фундамента достигаются путем комплексного применения источников с меньшей и большей длиной стороны ГП [107].

### **3.4 Выбор оптимального шага между приемниками ЭМ: результаты 3D моделирования**

Для выбора оптимального расстояния между ПК использовались результаты расчетов, описанные в части 3.3. Поскольку установлено, что в рассматриваемых геологических условиях 600 м является оптимальной длиной стороны генераторной петли, расчеты для сигналов от других источников во внимание не принимались.

Неоднородности, принятые в качестве объектов исследования, и обоснование выбора длины стороны ГП (600 м) рассмотрены в части 3.3. Для оценки горизонтальной разрешающей способности, т.е. выбора оптимального

шага наблюдений, при котором локальный проводящий объект выделяется по данным ЗСБ, были построены разрезы аномального поля с шагом между приемниками: 200, 400 и 600 м.

### 3.4.1 Модель №1: «разломная зона»

Разрезы аномального поля, построенные с разным шагом между приемниками ЭМ поля для разломной зоны, представлены на рисунке 3.21. Аномалия прослеживается во всем временном диапазоне независимо от шага наблюдения. Поэтому для выделения и оконтуривания аномалии, создаваемой разломом с заданными геометрическими параметрами, шаг между приемниками (200, 400 или 600 м) не принципиален.

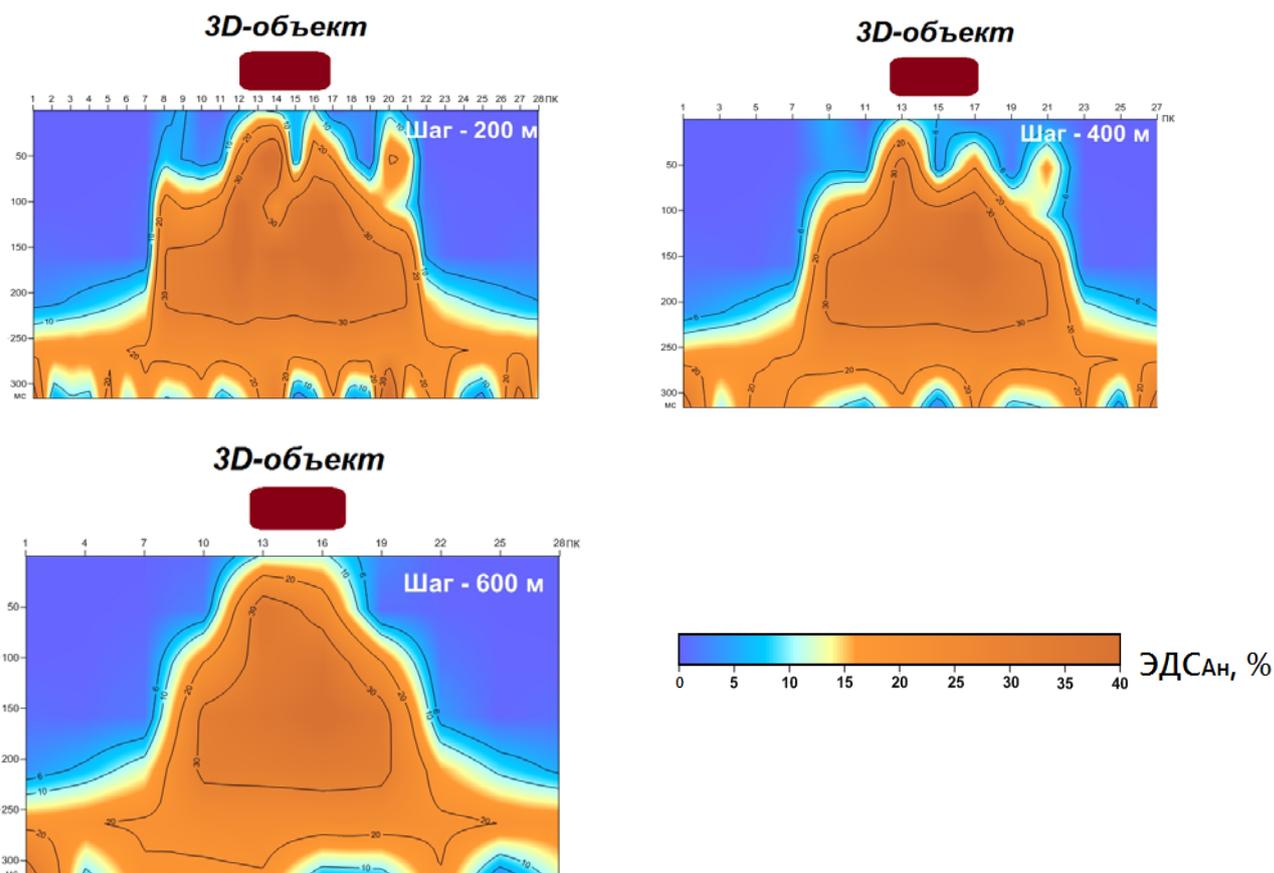


Рисунок 3.21 – Разрезы аномального поля разломной зоны, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)

Таблица амплитуды аномалии, выявленной с разным шагом, подтверждает не принципиальность выбора шага исследования для картирования разломной зоны (Таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Амплитуды аномалии, создаваемой разломной зоной, зафиксированные с разным шагом между ПК

Шаг между ПК, м	200	400	600
Амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>1D</sub> )	15.3	14.8	14.9
Истинная амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	15	14.5	14.6
Вклад шума в аномалию, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>3D</sub> )	0.3	0.3	0.3

Графики аномального поля, построенные для сигналов «ГП-600» с разным шагом между ПК по профилю, не имеют принципиального отличия между собой, что подтверждает рисунок 3.22.

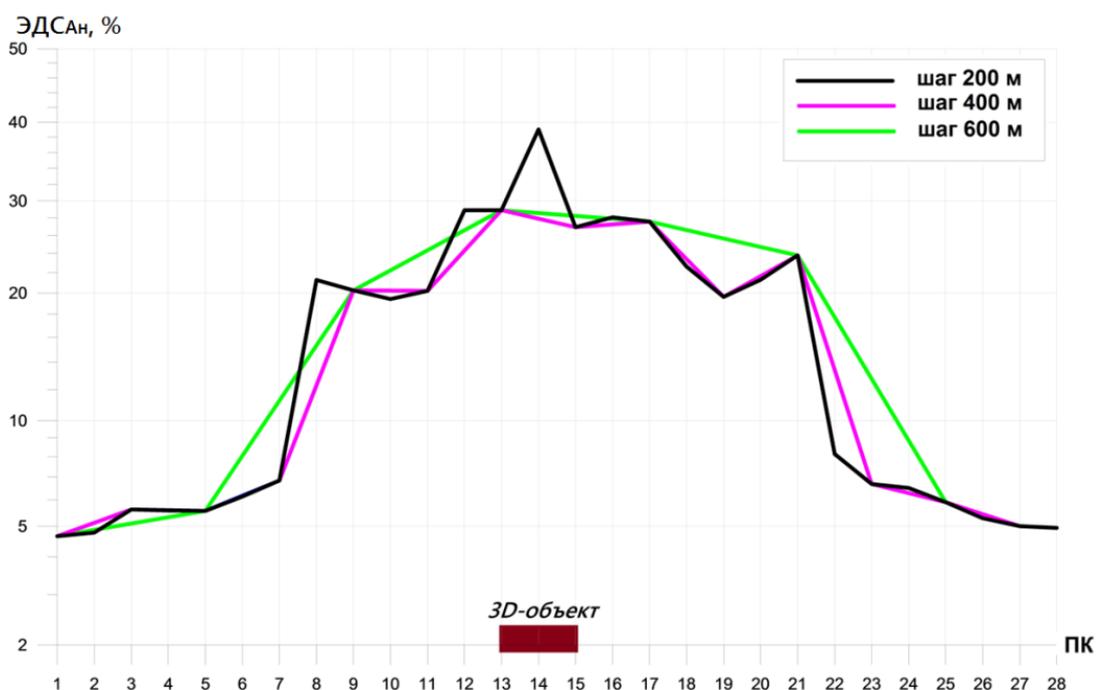


Рисунок 3.22 – Графики аномалии от разломной зоны, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)

### 3.4.2 Модель №2: «пласт-коллектор»

Разрезы аномального поля, построенные с разным шагом между приемниками для пласта-коллектора на глубине 450 м, представлены на рисунке 3.23. Для выделения и оконтуривания аномалии, представленной на разрезах, шаг между приемниками (200, 400 или 600 м) не принципиален. Это еще более наглядно показано и на графиках аномалии (см. рисунок 3.24).

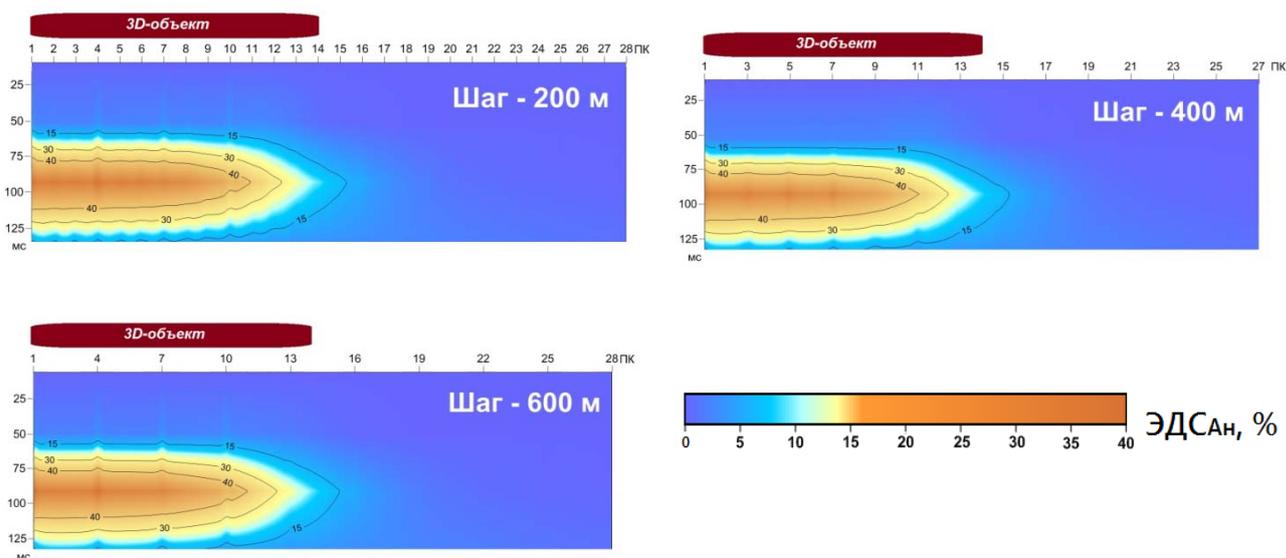


Рисунок 3.23 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 450 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)

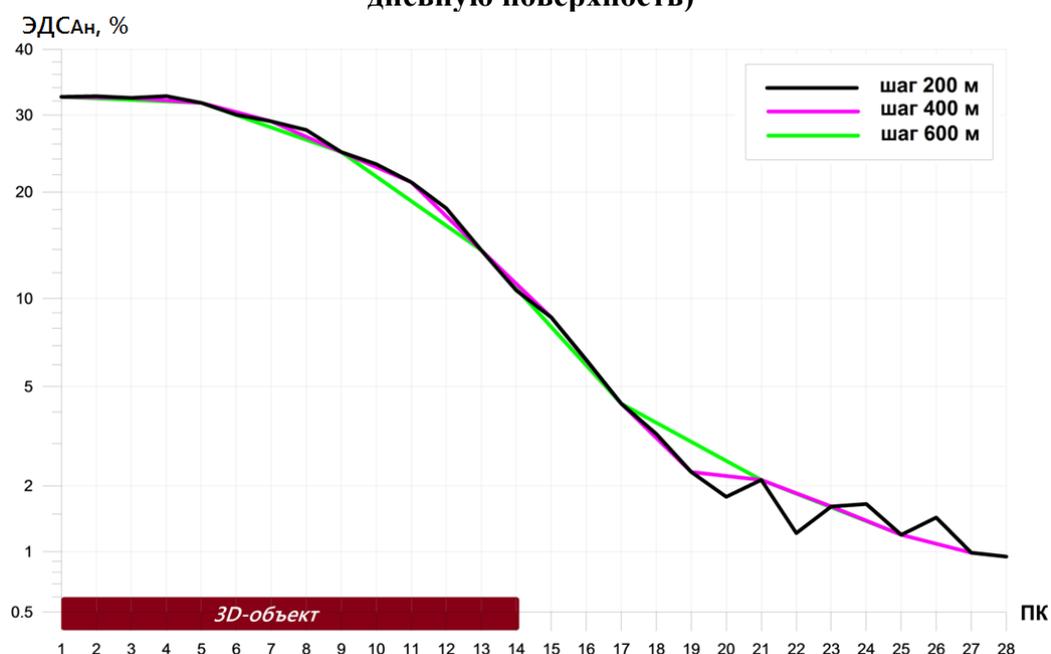


Рисунок 3.24 – Графики аномалии от пласта-коллектора на глубине 450 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)

Уверенное проявление аномалии от коллектора в ВЧР наблюдается при любом шаге исследования, что подтверждает таблица 3.9.

Таблица 3.9 – Амплитуды аномалии, создаваемой пластом-коллектором на глубине 1700 м, зафиксированные с разным шагом между ПК

Шаг между ПК, м	200	400	600
Амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>1D</sub> )	13.25	13.2	12.8
Истинная амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	13	13.2	12.8
Вклад шума в аномалию, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> - ЭДС <sub>3D</sub> )	0.25	0.2	0.18

Проявление аномалии от пласта-коллектора в нижней части разреза (Н=1750 м) принципиально зависит шага между ПК (см. рисунок 3.25).

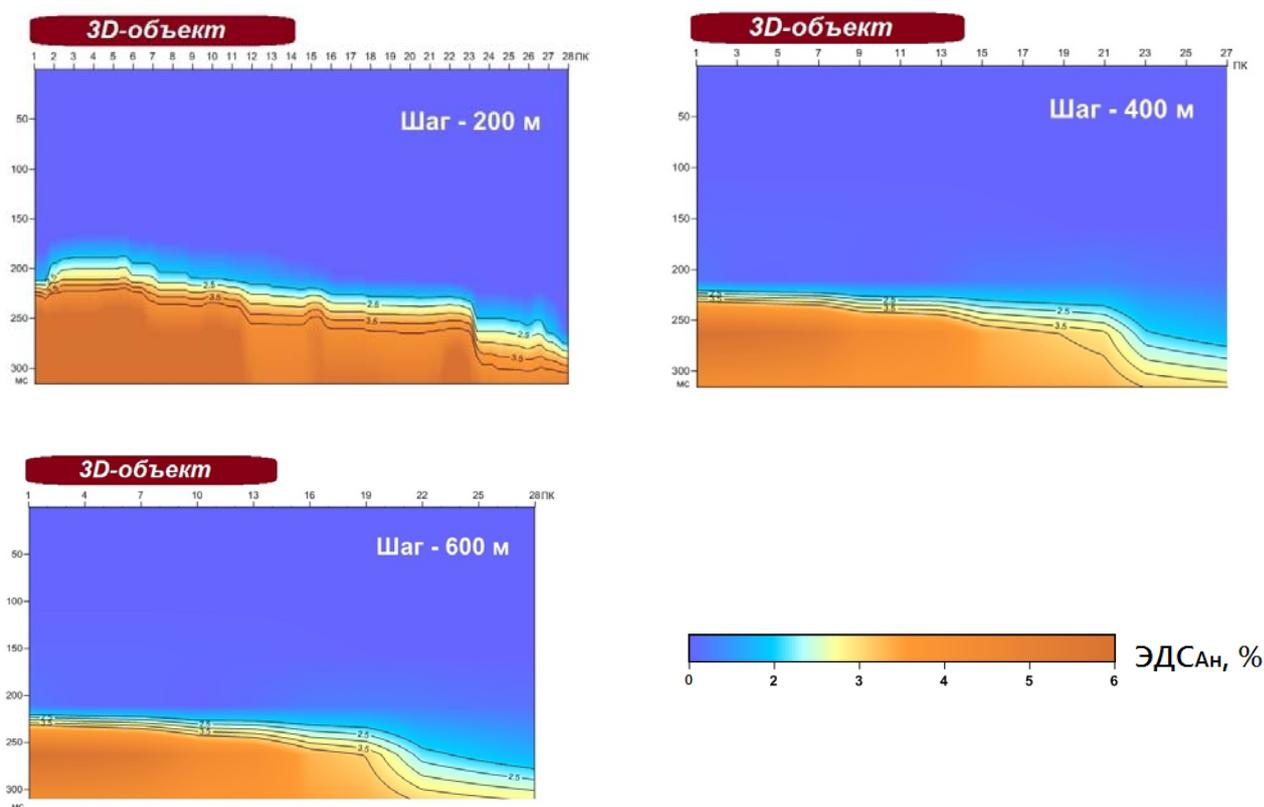


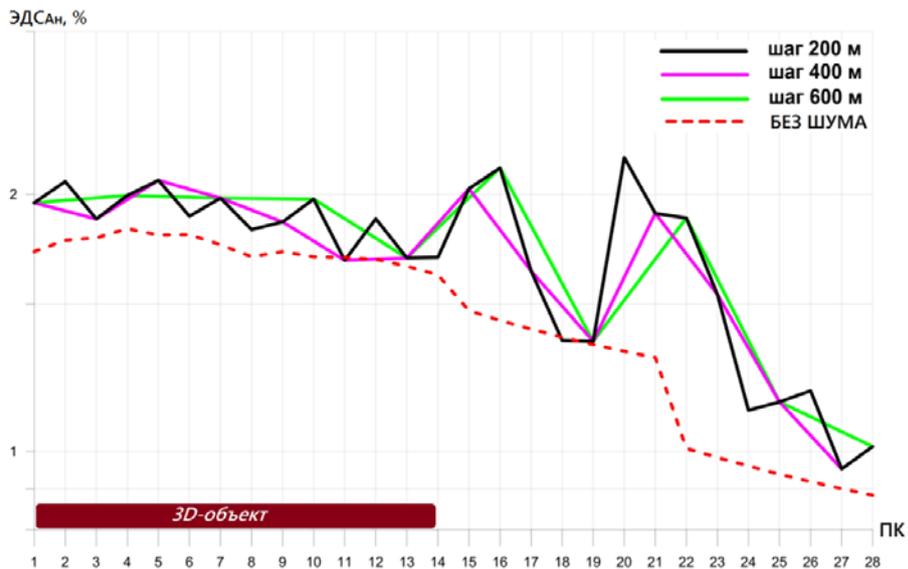
Рисунок 3.25 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 1700 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)

При шаге между ПК 200 м отношение аномалия/шум больше, чем при исследованиях с большим шагом, что видно из таблицы 3.10. Исследования с шагом 400 м позволяют выявить пласт-коллектор на качественном уровне (над объектом располагается 8 ПК), однако оконтуривание возможно с максимально частым шагом [84]. При шаге 600 м, истинная аномалия от пласта-коллектора в нижней части разреза не превышает уровень шума в 2 раза, что делает ее не выделяемой (над объектом располагается 4 ПК). Поэтому, увеличение шага между ПК приводит к уменьшению амплитуды аномалии, что снижает вероятность ее выявления.

Таблица 3.10 – Амплитуды аномалии, создаваемой пластом-коллектором на глубине 1700 м, зафиксированные с разным шагом между ПК

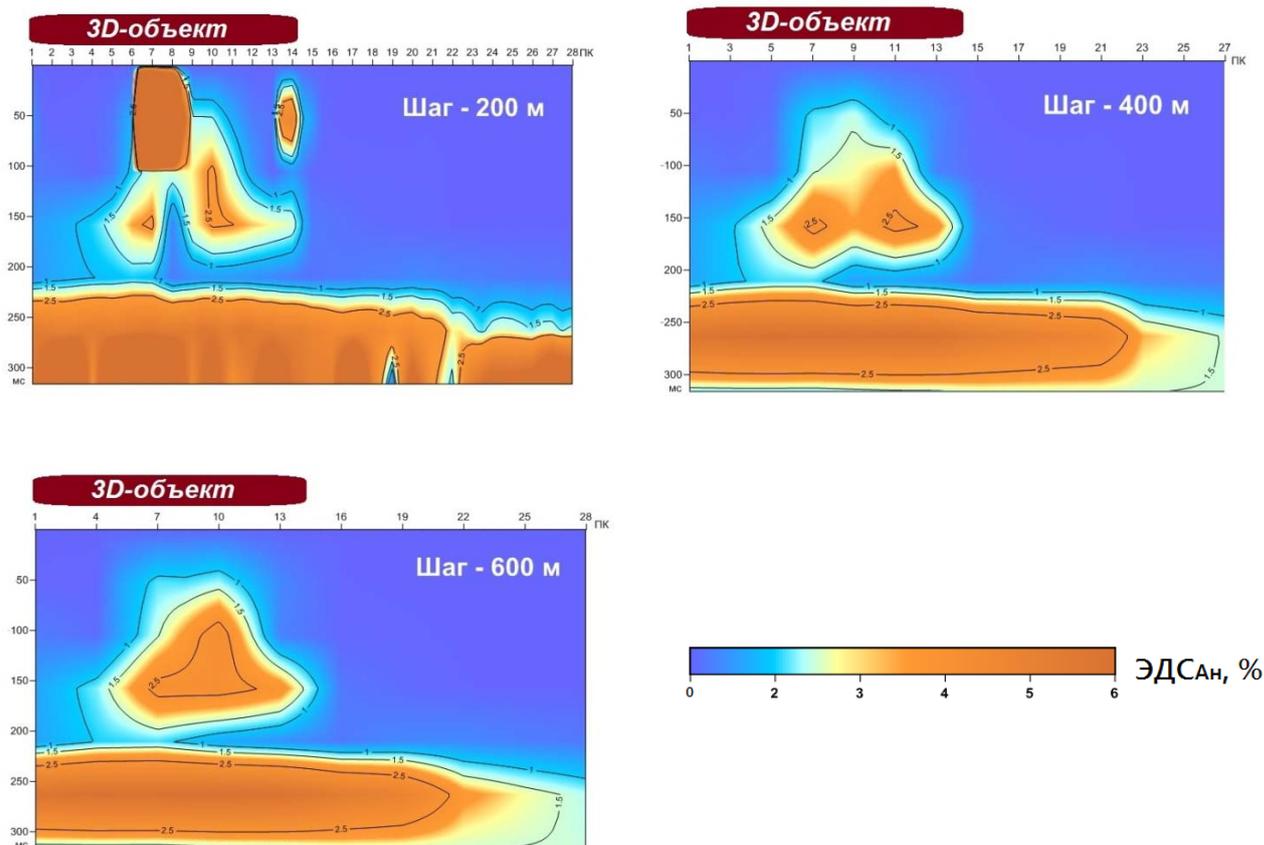
Шаг между ПК, м	200	400	600
Амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	2.1	2	1.9
Истинная амплитуда аномалии, % ( $\text{ЭДС}_{3D} - \text{ЭДС}_{1D}$ )	1.4	1.3	1.2
Вклад шума в аномалию, % ( $\text{ЭДС}_{3D\text{шум}} - \text{ЭДС}_{3D}$ )	0.7	0.7	0.7

Графики аномалии подтверждают большой вклад шума в аномалию (см. рисунок 3.26).



**Рисунок 3.26 – Графики аномалии от пласта-коллектора на глубине 1700 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

Разрезы аномального поля для пласта-коллектора на глубине 1700 м, перекрытого проводящими неоднородностями, представлены на рисунке 3.27.



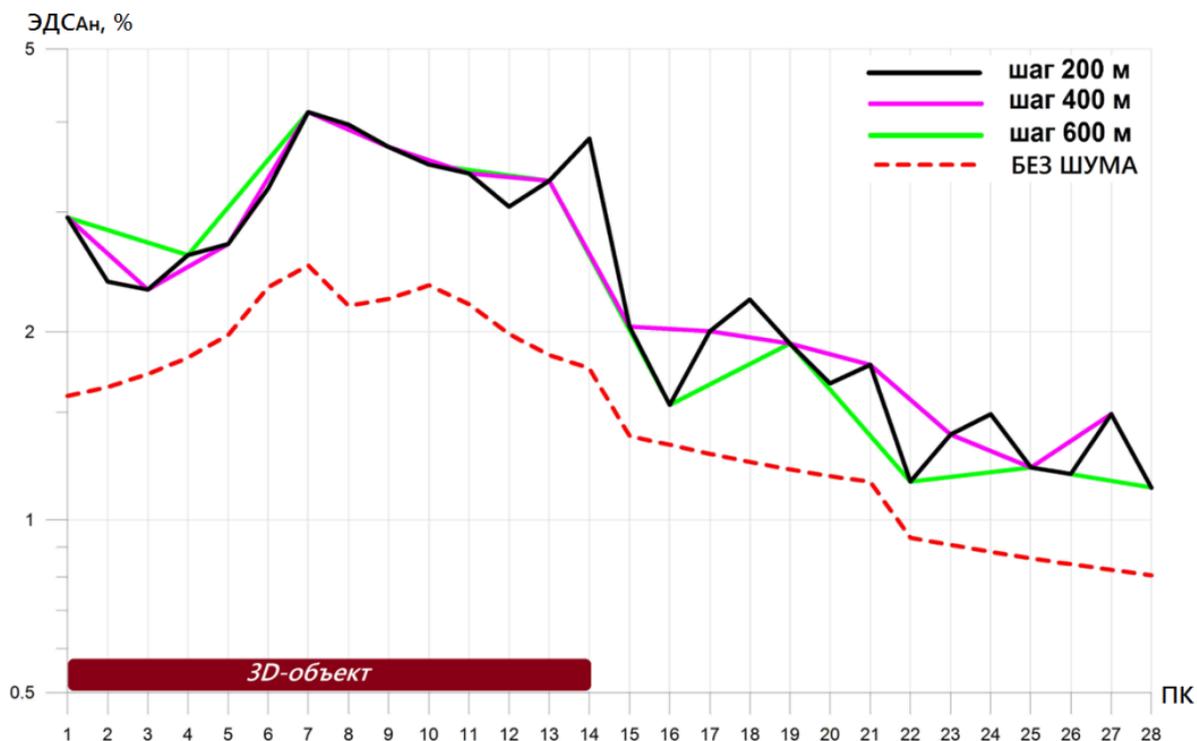
**Рисунок 3.27 – Разрезы аномального поля пласта-коллектора на глубине 1700 м, перекрытого проводящими неоднородностями, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)**

На представленных выше геоэлектрических разрезах прослеживается закономерность, которая заключается в убывании амплитуд аномалий, вызванных исследуемым пластом-коллектором и перекрывающими отложениями с увеличением шага между ПК. Это подтверждает таблица амплитуд аномалий (Таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Амплитуды аномалии, создаваемой пластом-коллектором на глубине 1700 м, с учетом влияния перекрывающих неоднородностей, зафиксированные с разным шагом между ПК

Шаг между ПК, м	200	400	600
Амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	2.4	2	1.7
Истинная амплитуда аномалии (без перекрыв. объектов), % (ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	1.4	1.3	1.2
Вклад шума в аномалию, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>3D</sub> )	1	0.8	0.5

Графики аномалии, приведенные на рисунке 3.28, свидетельствуют о том, что увеличение шага не позволяет выявить локальные аномалии, создаваемые небольшими объектами, аномалии сливаются вследствие интерполяции. Очевидно, что с большим увеличением шага, аномалии от небольших объектов выделить невозможно.



**Рисунок 3.28 – Графики аномалии от пласта-коллектора, перекрытого проводящими неоднородностями, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м на глубине 1700 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

### 3.4.3 Модель №3: «рудное тело»

На рисунке 3.29 представлены разрезы аномального поля, построенные с шагом исследования 200, 400 и 600 м для расчета с железорудным телом при разной глубине залегания.

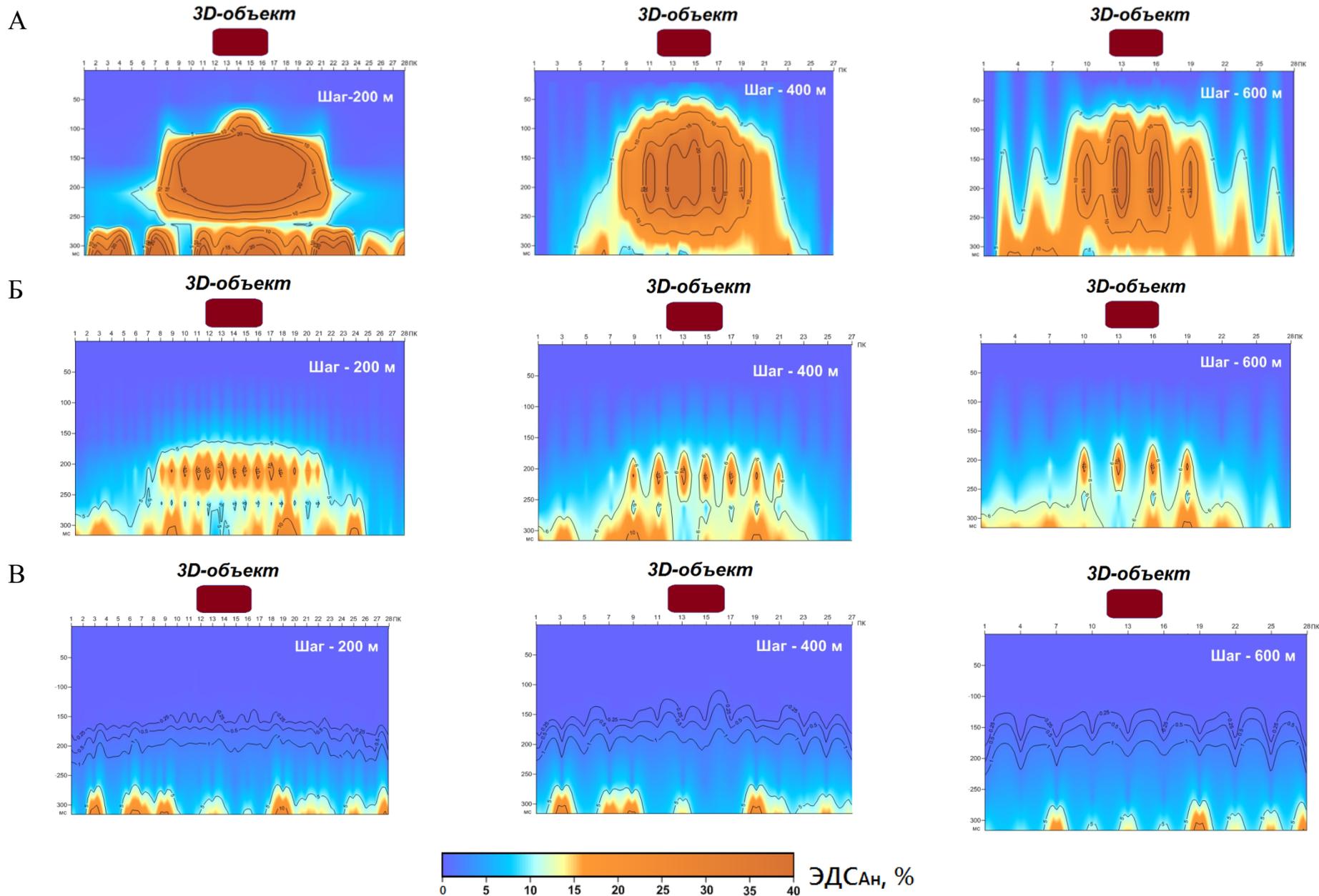


Рисунок 3.29 – Разрезы аномального поля рудного тела на глубине: А – 450 м; Б – 950 м; В – 1700 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (над разрезами показана проекция на дневную поверхность)

На разрезах 3.29 А при залегании рудного тела на глубине 450 м средняя амплитуда аномалии составила 7% (Таблица 3.12), максимальное значение аномалии (30%) прослеживается на приемниках, находящихся за пределами объекта на расстоянии от края объекта 800 м. Аномалия с такой амплитудой и временным диапазоном проявления надежно выделяется и прослеживается на геоэлектрическом разрезе при любом шаге исследования (200, 400, 600 м).

Таблица 3.12. Амплитуды аномалий, создаваемых рудным телом с изменением глубины залегания, зафиксированные с разным шагом между ПК

	Залегание №1 (Н = - 450 м)			Залегание №2 (Н = - 950 м)			Залегание №3 (Н = - 1700 м)		
	200 м	400 м	600 м	200 м	400 м	600 м	200 м	400 м	600 м
Амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	7.4	7.32	7.03	2.83	2.85	2.69	1.13	1.11	1.07
Истинная амплитуда аномалии, % (ЭДС <sub>3D</sub> -ЭДС <sub>1D</sub> )	6.8	6.7	6.72	2.3			0.5		
Вклад шума в аномалию, % (ЭДС <sub>3Dшум</sub> -ЭДС <sub>3D</sub> )	0.6	0.62	0.31	0.53	0.55	0.39	0.63	0.61	0.45

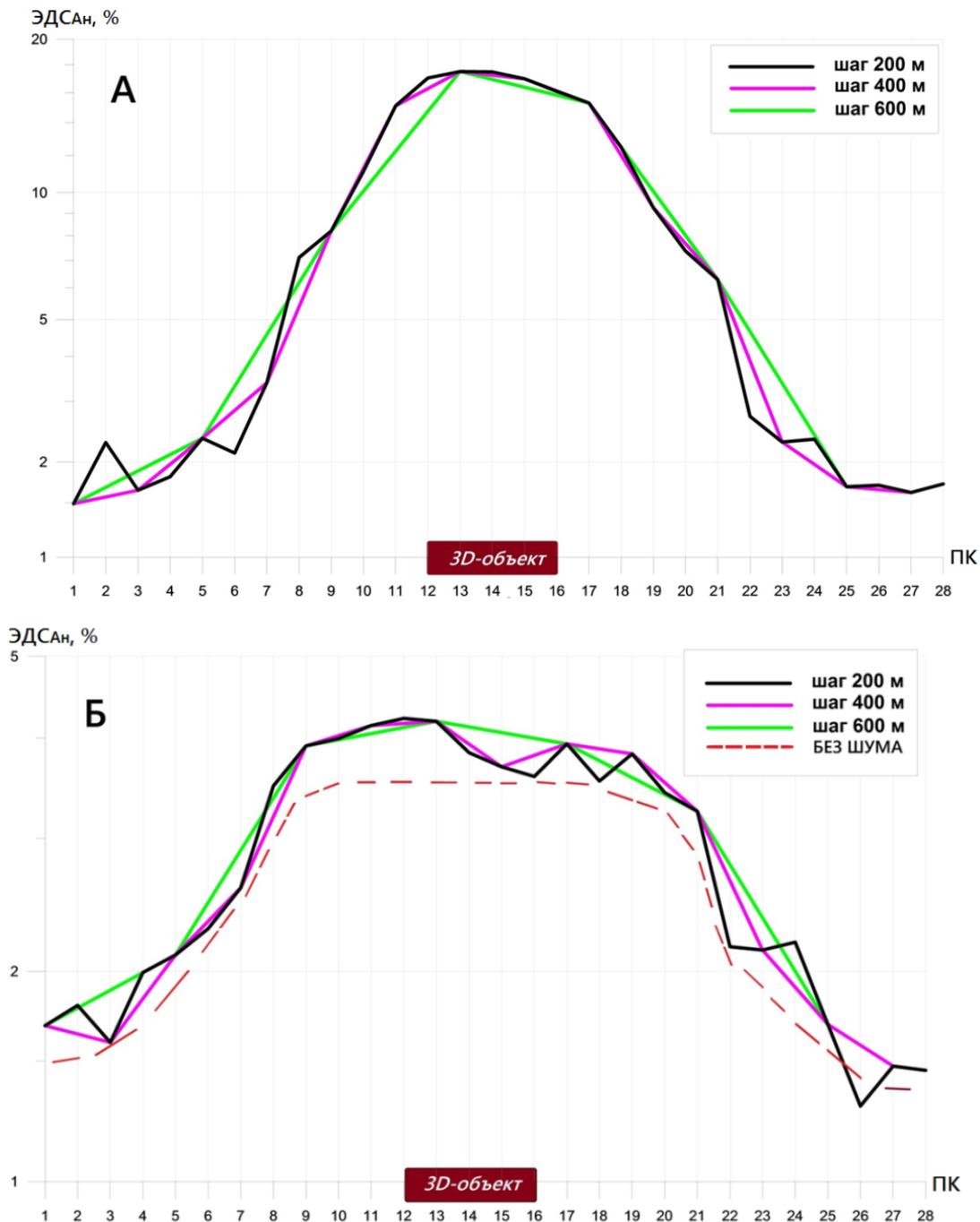
На разрезе 3.29 Б при залегании объекта исследования на глубине 950 м, построенном для наблюдений с шагом 200 м, аномальный эффект проявляется на приемниках, которые находятся на профиле за пределами искомого объекта. Средняя амплитуда аномального поля составляет 2.8%, на всех приемниках, находящихся над рудным телом; амплитуда аномалии достигает 10% и снижается до 2 – 3 % на расстоянии до 500 м от краев тела по профилю наблюдений. Латеральное аномальное влияние объекта распространяется в

среднем на 2200 м, при этом над объектом располагаются 9 приемников ЭМ поля.

На разрезе, построенном с шагом 400 м между ПК (см. рисунок 3.29 Б), аномалия от рудного тела прослеживается менее уверенно, чем при шаге 200 м (средняя амплитуда аномалии составляет 2.85%). Аномальное поле, в среднем, составляет 15 – 20 % в пределах объекта, по приемникам, находящимся за пределами, уровень аномалии снижается до 4 – 6 %. При этом над рудным телом располагается 5 приемников ЭМ поля.

При шаге 600 м (см. рисунок 3.29 Б) рудное тело мощностью 50 м и сопротивлением 6 Ом·м выделить сложнее: область его проявления на разрезах ЗСБ сокращается. Амплитуда аномалии над эпицентром объекта составляет 15 – 20 %, однако близко к границам объекта снижается до 3 – 5 %. Среднее значение аномалии составляет 2.69%. За пределами рудного тела в данном случае практически отсутствует аномальное поле. Размеры аномалии по латерали составляют около 1200 м, при этом над объектом располагаются 3 приемника ЭМ поля.

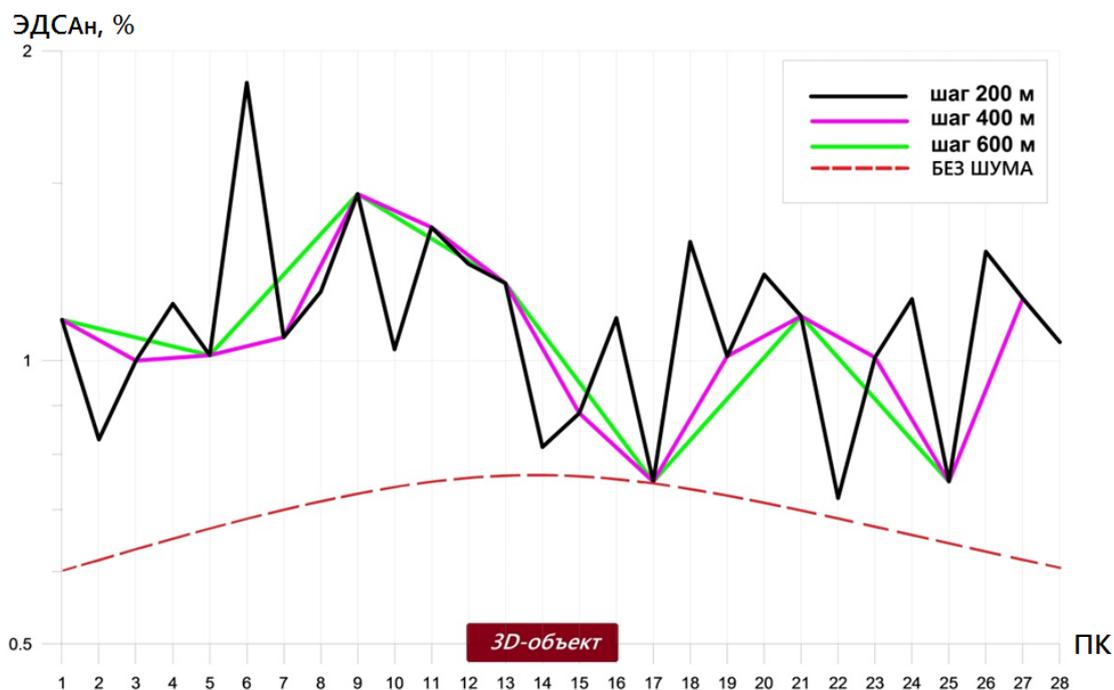
На рисунке 3.30 представлены графики аномалии от рудного тела на глубине 950 м, подтверждающие не принципиальность выбора шага между ПК, т.е., подобно расчетам с залеганием рудного тела на 450 м, выделение тела на глубине 950 м возможно при любом из рассматриваемых расстояний между ПК.



**Рисунок 3.30 – Графики аномалии от рудного тела на глубине 450 и 950 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

На разрезе 3.29 В при залегании рудного тела на глубине 1700 м аномалия имеет небольшую амплитуду. И без того незначительный временной диапазон проявления аномалии сокращается с увеличением шага между приемниками ЭМ поля. Среднее значение амплитуды аномалий от рудного тела при разном шаге исследования различаются на сотые доли процента. Такое отличие,

очевидно, не существенно – при разрежении шага сигналы от ПК, находящихся над эпицентром аномалии, вносят большой вклад в среднее значение амплитуды аномалии. Графики аномального поля иллюстрируют вышесказанное (см. рисунок 3.31). Выделение рудного тела на глубине 1700 м при указанных геолого-геоэлектрических условиях проблематично при любом шаге между ПК.



**Рисунок 3.31 – Графики аномального от рудного тела на глубине 1700 м, построенные с шагом между ПК – 200, 400 и 600 м (под графиками показана проекция на дневную поверхность)**

Таким образом при картировании слабо контрастных объектов в верхней и средней частях геологического разреза при любом шаге исследования (от 200 до 600 м) зона проявления объекта на геоэлектрических разрезах характеризуется аномалией по ЭДС более 2 %. В принципе, это позволяет надежно выделять рудное тело на фоне помех (как правило, не более 0.5 %). Однако оценить размеры объекта исследования возможно только при достаточном шаге между измерениями. На проявление аномалии от объекта в нижней части разреза шаг между ПК не влияет. Выделить и, тем более, оконтурить рассматриваемый объект чрезвычайно сложно.

### 3.4.4 Выводы

В результате трехмерного моделирования выявлена аномалия электромагнитного поля, интенсивность проявления которой зависит от шага исследований. Для картирования приповерхностных неоднородностей и неоднородностей большого размера (таких как разломная зона) шаг по профилю не имеет принципиального значения. Однако, при картировании аномалий от нескольких неоднородностей увеличение шага исследования приводит к слиянию аномалий.

Трехмерные расчеты показали, что латеральное проявление аномалии ЭМ поля при глубокозалегающих объектах уменьшается с увеличением шага между ПК. Такие аномалии проявляются в узком временном диапазоне. Известно, что амплитуды аномалии 2-2.5% достаточно для надежного выделения объекта (при заданном уровне помех). Для обнаружения глубокозалегающих объектов шаг исследования должен составлять около 400 м. Также исследования с данным шагом позволяют выделить аномалии, имеющие латеральное распространение от 1900 м, чего вполне достаточно для выявления искажения одномерного разреза. Дальнейшее сгущение шага приводит к неоправданным временным и финансовым затратам.

При тестировании предложенного способа выбора параметров установки ЗСБ показано, что применительно к геологическим условиям Непского свода шаг 400 – 500 м является оптимальным для выделения в геологическом разрезе контрастных проводящих объектов [107].

Возможность выделения рассматриваемых эталонных объектов зависит от конкретных условий:

1. Проводимости перекрывающих отложений;
2. Контрастности геоэлектрических свойств объекта по сравнению с вмещающими слоями;
3. Глубины залегания объекта;
4. Уровня ЭМ помех.

## **ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ (1D и 3D) ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЗСБ**

При интерпретации данных ЗСБ, полученных в условиях неоднородной среды, часто возникает вопрос о корректности применения 1D инверсии. 1D инверсия имеет определенные преимущества по сравнению с 3D инверсией, основным из которых является меньшая невязка подбора теоретической кривой к практической. Однако даже невязка менее 5% не гарантирует правильность подбора модели в силу эквивалентности решения [116].

Ситуация усложняется при влиянии трехмерных неоднородностей. В случае наличия зон осложненной интерпретации (невозможности подбора модели в рамках одномерной инверсии) целесообразно применять 3D моделирование, исключающее грубые ошибки в интерпретации данных, но не отличающееся оптимальной точностью подбора модели [2].

С начала XXI века активно развивается подход автоматического трехмерного подбора теоретических кривых к полевым (автоматической трехмерной инверсии). В основе указанного направления лежит представление, что все нижнее полупространство неоднородно и ограничивать интерпретацию одномерной инверсией не корректно [118]. Необходимо оценить эффективность применения одномерного и трехмерного подходов к инверсии данных в средах с различным геологическим строением.

### **4.1 Интерпретация данных ЗСБ, полученных в геологических условиях Непского свода, на основе комбинированного применения 1D и 3D инверсии**

Целью проведенного исследования являлась оценка эффективности 1D и 3D инверсий данных ЗСБ применительно к средам со сложным геологическим строением в свете решения нефтегазопроисследовательских задач.

Сущность эксперимента заключалась в следующем:

- 1) 1D и 3D инверсии данных, полученных на участке с горизонтально-неоднородным геологическим строением;
- 2) 1D и 3D инверсии данных, полученных на участке с горизонтально-однородным геологическим строением;
- 3) оценке прироста геологической информации в первом и во втором случаях.

#### **4.1.1 Участок с трехмерными неоднородностями**

Примером практического применения трехмерного моделирования при решении методом ЗСБ нефтегазопроисковых задач на юге Сибирской платформы выбрано месторождение «Модельное». Оно расположено в пределах южной периклинали Непского свода – Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА). Промышленная нефтегазоносность территории связана с подсолевыми горизонтами песчаников базальной ярактинской пачки в непской свите и верхнетирским горизонтом – в тирской свите нижнего венда.

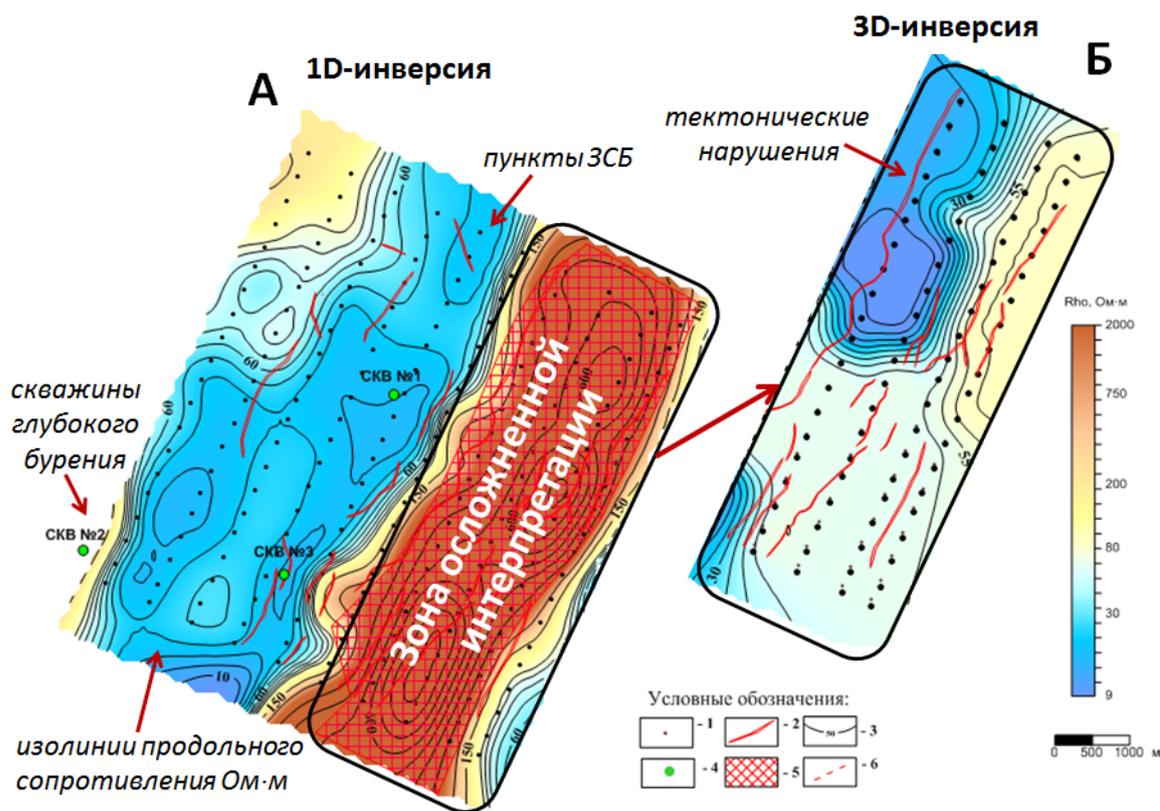
Разрез осадочного чехла представлен вендскими и кембрийскими отложениями, перекрытыми маломощными юрскими и четвертичными породами. Наряду с зонами отсутствия коллекторов установлены дизъюнктивные нарушения, которые прослеживаются в фундаменте. Главным поисковым объектом являются терригенные отложения венда. На месторождении пробурен ряд скважин.

1D инверсия кривых ЗСБ для западной части участка работ показала высокую эффективность: невязка подбора моделей не превышала 1 – 1.5 %. Однако в восточной части площади кривые ЗСБ осложнены влиянием трехмерной неоднородности. Предположительно это валлообразная структура, которая характеризуется существенной неравномерностью внутреннего строения. Как правило, в условиях Сибирской платформы центральная часть вала представлена солями, а крылья – карбонатными породами (доломитами, известняками). В связи с этим не удалось добиться невязки 1D обратной задачи

с невязками менее 10 – 20 %. На рисунке 4.1 приведены результаты 1D инверсии кривых в виде карты распределения продольного сопротивления отложений подсолевой части разреза.

Карта свидетельствует о том, что 1D инверсия кривых ЗСБ в восточной части участка неэффективна. Для учета влияния трехмерных неоднородностей была проведена 3D интерпретация материалов ЗСБ в программном комплексе «EMDataProcessor» [117]. Расчеты производились поэтапно:

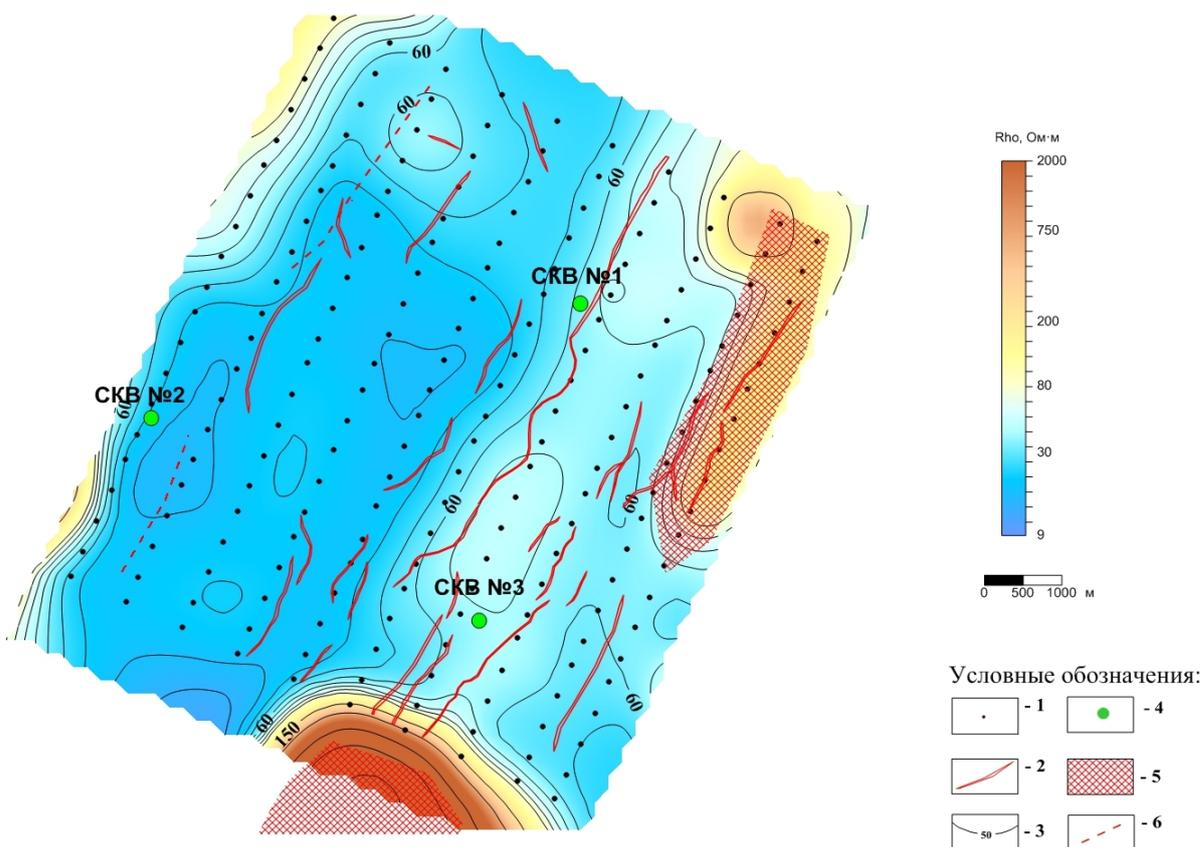
- 1) выявлялись сигналы ЗСБ, соответствующие горизонтально-слоистому разрезу;
- 2) построены модели верхней части разреза;
- 3) построены модели глубинной части разреза последовательно для установок ЗСБ вдоль профиля при фиксированной модели ВЧР для всей площади.



**Рисунок 4.1 – Карты распределения продольного электрического сопротивления отложений подсолевой части разреза по результатам А – 1D инверсии, Б – 3D инверсии: 1 – пункты наблюдения ЗСБ; 2 – тектонические нарушения, выделенные по результатам сейсморазведочных работ; 3 – изолинии продольного электрического сопротивления, Ом·м; 4 – скважины глубокого бурения; 5 – зона осложненной интерпретации; 6 – тектонические нарушения, выделенные по данным ЗСБ**

В восточной части площади 3D инверсия данных ЗСБ обеспечила невязку подбора моделей менее 10 %, это существенно меньше по сравнению с невязкой в случае 1D инверсии. Вместе с тем, погрешность 3D инверсии для западной части площади оказалась выше, чем при 1D. В рассмотренном случае применение 3D моделирования на северо-востоке участка позволило определить УЭС подсолевой части разреза (см. рисунок 4.1 Б).

Таким образом, для получения наиболее достоверной геоэлектрической модели разреза целесообразно комбинирование результатов 1D и 3D инверсии: применение 1D подхода в западной части территории исследования и 3D – в восточной (см. рисунок 4.2).



**Рисунок 4.2 – Карта распределения продольного электрического сопротивления отложений подсолевой части разреза по результатам 1D (запад) и 3D (восток) инверсии:**

**1 – пункты наблюдения ЗСБ; 2 – тектонические нарушения, выделенные по результатам сейсморазведочных работ; 3 – изолинии продольного электрического сопротивления, Ом·м; 4 – скважины глубокого бурения; 5 – зоны осложненной интерпретации; 6 – тектонические нарушения, выделенные по данным ЗСБ.**

Вследствие комбинирования результатов 1D и 3D подходов интерпретации данных ЗСБ получена геоэлектрическая модель участка Модельного. Влияние тектонических неоднородностей разреза на сигналы ЗСБ было учтено, что позволило с определенной точностью изучить геоэлектрические свойства подсолевой части разреза.

На карте продольного сопротивления подсолевой части разреза (см. рисунок 4.2) в западной части территории исследования в пределах зоны пониженного сопротивления выделена область коллектора преимущественно с водным или смешанным типами насыщения и с характерным для данного вида коллектора сопротивлением (по данным ЗСБ, менее 40 Ом·м). На периферии выделенной области располагается скважина №3 с притоками УВ, и отмечается обводнение коллектора.

На западе выявлена область с ухудшенными коллекторскими свойствами, в контуре которой располагается скважина №2 без притока и зоной ухудшенных фильтрационно-емкостных свойств.

На северо-востоке и востоке выделенная область граничит с участками развития коллектора с преимущественно УВ насыщением и характерным для данного типа коллектора сопротивлением 40 – 65 Ом·м. Зона коллектора с УВ насыщением в северо-восточной части раскрывается за пределы участка исследования в северном направлении, здесь располагается скважина №1 с притоками УВ. Также отмечаются участки с ухудшенными коллекторскими свойствами с сопротивлением 65 – 80 Ом·м. Зоны с сопротивлением выше 80 Ом·м следует относить к областям неколектора [102]. Впоследствии в пределах зоны коллектора, выделенного по данным ЗСБ, в результате бурения был получен приток углеводородов.

Применение 3D инверсии кривых ЗСБ целесообразно в случаях существенно неоднородной верхней части разреза. При этом результаты 1D инверсии являются начальным приближением для 3D подбора верхней части разреза.

Геоэлектрическая модель, полученная путем комбинирования результатов 1D и 3D инверсии ЗСБ, не противоречит структурно-тектоническим особенностям территории исследования и позволяет ранжировать территорию исследования по степени перспективности УВ насыщения. Полученные результаты интерпретации данных позволяют сделать вывод о низкой перспективности высокоомных зон подсолевой части разреза.

Эффективность применения электроразведочных работ 3D ЗСБ в полной мере подтверждается результатами работ на территории «Модельного» месторождения, характеризующегося сложным структурно-тектоническим строением осадочного чехла.

Применение 3D сети наблюдения ЗСБ позволяет обосновано применять подход 3D интерпретации, и в конечном итоге повысить точность и достоверность геоэлектрических моделей разреза.

Повышение точности 3D интерпретации ЗСБ возможно за счет увеличения площади исследования для параметризации 3D объектов в верхней части разреза, а также разбиения модели, приуроченной к нижней части разреза, на большее количество объектов [101].

#### **4.1.2 Участок с горизонтально-слоистым строением**

В качестве еще одного примера применения 1D и 3D интерпретации данных ЗСБ были рассмотрены результаты работ на месторождении «Модельное-2», расположенном в центральной части Восточной Сибири.

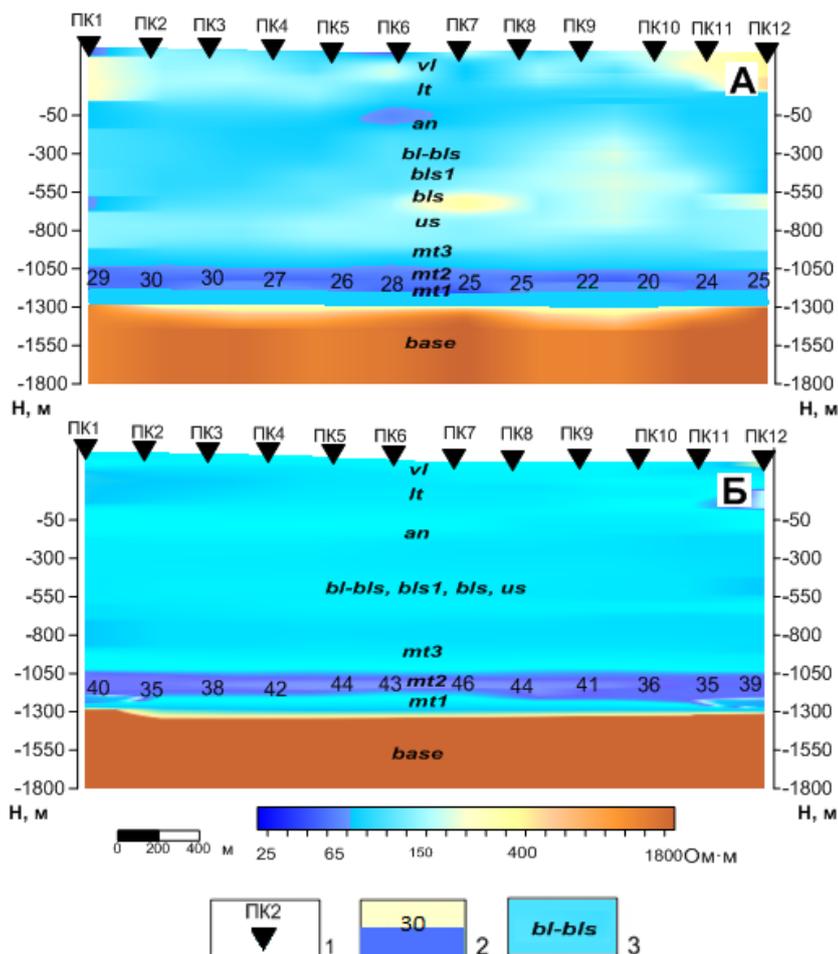
Промышленные притоки нефти и газа в данном районе связаны с терригенно-карбонатными отложениями венд-нижнекембрийского подсолевого терригенно-карбонатного и галогенно-карбонатного нефтегазоносных комплексов. В их составе выделяются продуктивные горизонты: верхнечонский, преображенский, усть-кутский, осинский. Они сложены песчаниками с прослоями аргиллитов, алевролитов и, в редких случаях, гравелитов. Образование коллекторов в этих горизонтах контролируются постседиментационными процессами,

которые связаны с эпигенетической карбонатизацией, сульфидизацией, регенерацией и особенно засолением. Упомянутые процессы нарушили связь между литологическими и физическими параметрами.

Невязка решения обратной задачи при 1D инверсии варьируется в диапазоне от 0.5 до 1.5%, что свидетельствует об отсутствии (или слабом влиянии) трехмерных неоднородностей в пределах рассматриваемого месторождения.

Для выявления возможности получения дополнительной геологической информации за счет трехмерных моделей была проведена 3D инверсия (модельные расчеты М.Г. Персовой). Невязки подбора составили 3-5 %.

Результаты 1D и 3D инверсии в виде разрезов удельного электрического сопротивления представлены на рисунке 4.3.



**Рисунок 4.3 – Разрезы УЭС осадочной толщи месторождения «Модельное-2» на Непском своде, построенные по результатам А – 1D инверсии и Б – 3D инверсии: 1 – пункты наблюдения ЗСБ; 2 – значение удельного электрического сопротивления, Ом·м; 3 – стратиграфический идентификатор**

Как видно на рисунке, между результатами 1D и 3D принципиальных отличий не выявлено. По данным каротажа скважин и петрофизических расчетов установлен диапазон сопротивлений верхнечонского горизонта-коллектора, равный 25-40 Ом·м.

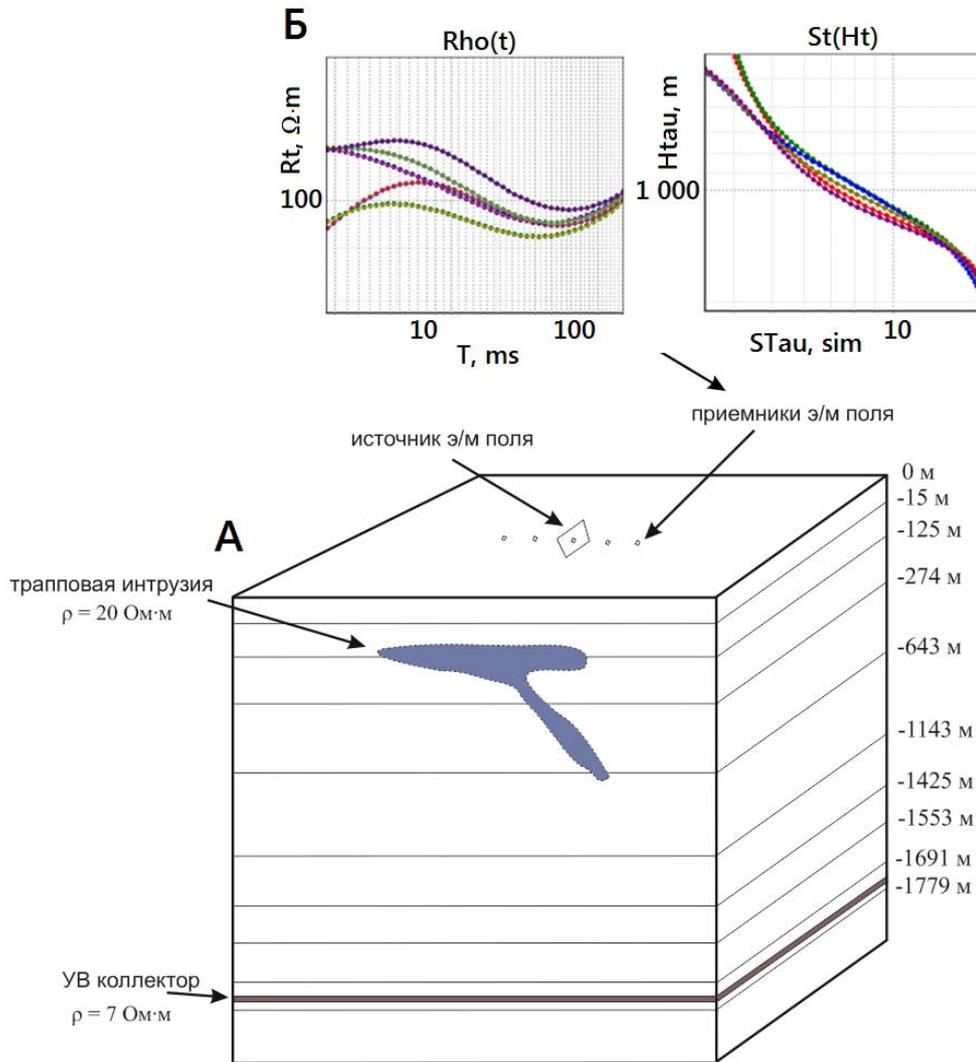
Геологическая интерпретация результатов 1D и 3D инверсии данных ЗСБ на месторождении «Модельное-2» подтверждает схожесть прогнозов. Принципиальный прирост геологической информации вследствие проведения трехмерной инверсии в условиях строения разреза близкого к горизонтально-слоистому не установлен. Отметим, что детальность результатов трехмерной инверсии ввиду аппроксимации разреза несколькими объектами уступает одномерной инверсии. По сравнению с 1D инверсией, трехмерное моделирование – процесс ресурсоемкий, т.е. при работе с горизонтально-слоистым разрезом (или близким к нему) в производственных интересах целесообразно ограничиваться одномерным подходом к интерпретации данных.

#### **4.2 Ранжирование кривых ЗСБ по степени влияния 3D неоднородностей**

Как было установлено в результате комплексной инверсии данных ЗСБ, применение определенного подхода к интерпретации должно диктоваться степенью «неоднородности» зондируемого пространства. Необходимо понять, какой ее уровень не позволяет в рамках 1D инверсии изучить геологический разрез с достаточной точностью. Требуются численные критерии необходимости применения 1D/3D инверсии. Для получения таких критериев проведен модельный эксперимент, направленный на картирование пород осадочного чехла и выделение углеводородонасыщенного горизонта-коллектора в подсолевой части разреза.

Автором были сгенерированы синтетические кривые от фоновой модели, включающей УВ-насыщенный пласт-коллектор в подсолевой части разреза (см. рисунок 4.4). Кривые осложнены влиянием перекрывающей неоднородности (предположительно – трапповой интрузии в надсолевой части разреза).

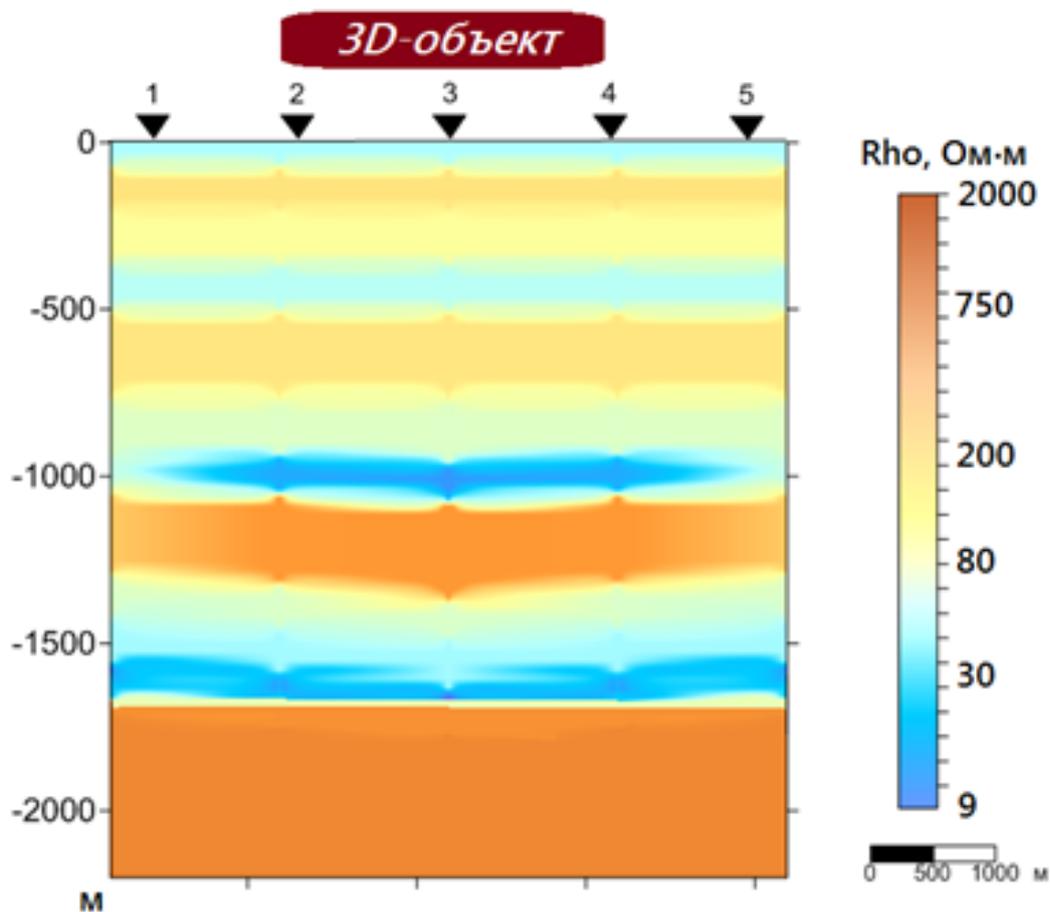
Трапп является магматическим телом, УЭС которого составляет первые сотни Ом·м. Однако в суммарное сопротивление породного массива вносит определенный вклад и приконтактовая зона, которая вследствие обводнения, как правило, характеризуется повышенной проводимостью.



**Рисунок 4.4 – ФГМ, использованная в расчетах синтетических кривых ЗСБ, осложненных влиянием трапповой интрузии с сопротивлением 20 Ом·м: А – расположение интрузии в среде относительно сети наблюдения; Б – кривые ЗСБ. Над ФГМ – трансформанты синтетических кривых ЭДС**

Расчеты показали, среднеквадратическое расхождение между кривыми  $\rho_t$  от одного источника составляет около 8%. Далее проведена одномерная инверсия кривых (см. рисунок 4.5), средняя невязка между теоретической и практической кривыми составила 5%. 1D инверсия показала, геоэлектрические

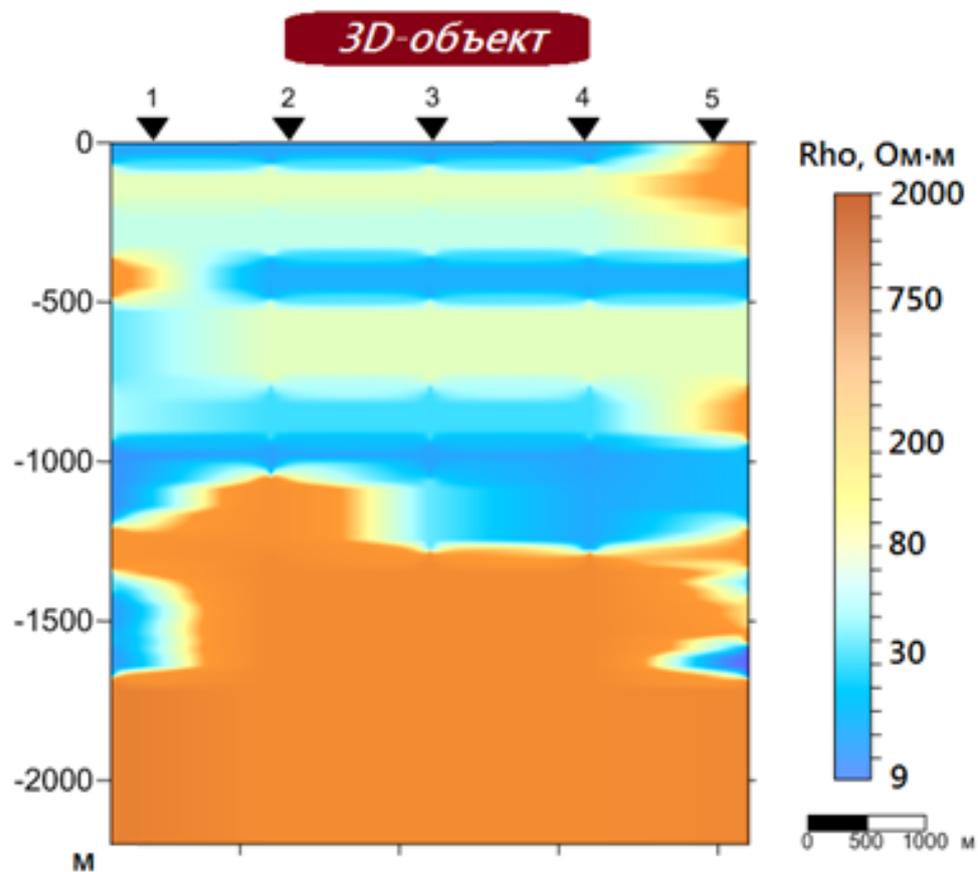
свойства трапповой интрузии, фоновой модели и, в частности, пласта-коллектора в подсолевой части разреза определены с приемлемой точностью.



**Рисунок 4.5 – Разрез УЭС по результатам одномерной инверсии кривых ЗСБ, осложненных влиянием интрузии с сопротивлением 20 Ом·м (вверху – проекция объекта на дневную поверхность)**

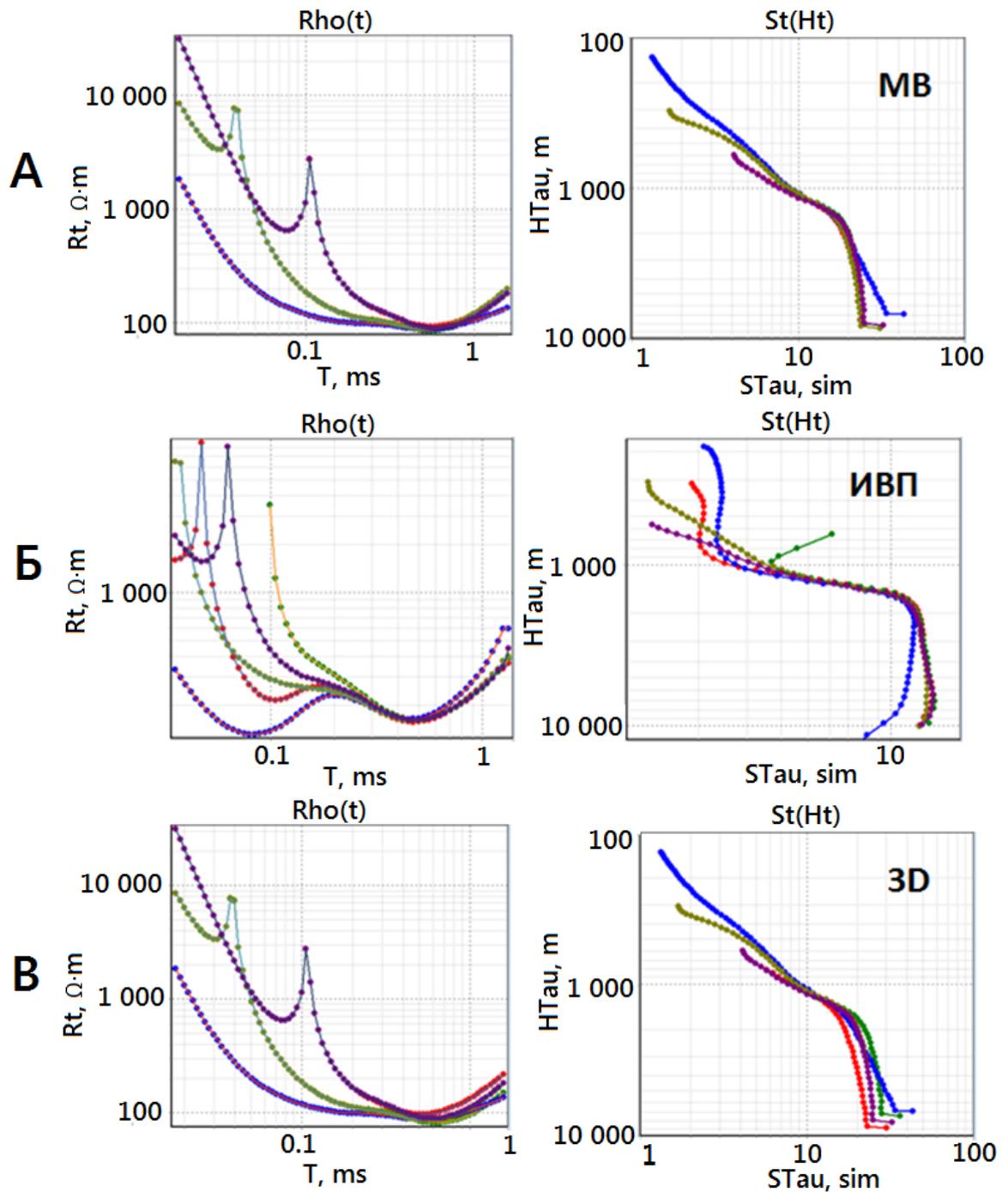
После этого с целью усложнения задачи изучения геоэлектрических свойств осадочного чехла УЭС пластовой интрузии задано 2 Ом·м. Как видно на рисунке 4.6, среднее квадратическое расхождение между кривыми  $\rho_t$  от одного источника составило около 14 %.





**Рисунок 4.7 – Разрез УЭС по результатам одномерной инверсии кривых ЗСБ, осложненных влиянием интрузии с сопротивлением 2 Ом·м (вверху – проекция объекта на дневную поверхность)**

Отметим, что, кроме рассмотренных выше, факторами, осложняющими одномерную инверсию, являются эффекты ИВП и МВ. Зачастую проявление этих эффектов трудно отличить от влияния «неоднородности» зондируемого пространства (см. рисунок 4.8).



**Рисунок 4.8 – Типы осложнения индукционных переходных характеристик ЗСБ различными геологическими эффектами: А – магнитная вязкость, Б – индукционно вызванная поляризация, В – влияние трехмерной неоднородности**

Тем не менее, упомянутые эффекты можно диагностировать с помощью использования многоразносных установок. Как известно, МВ и ИВП сильнее всего проявляются на ПК, находящихся в контуре генераторной петли. В случае присутствия трехмерных неоднородностей, как правило, осложнены все ПК независимо от разноса. В связи с этим, можно предположить, что отличие

кривой соосного ПК от других (в рамках одной установки) обусловлено преимущественно эффектами ИВП и МВ.

Исходя из вышеизложенного, «граничными уровнями (критериями) трехмерности» являются:

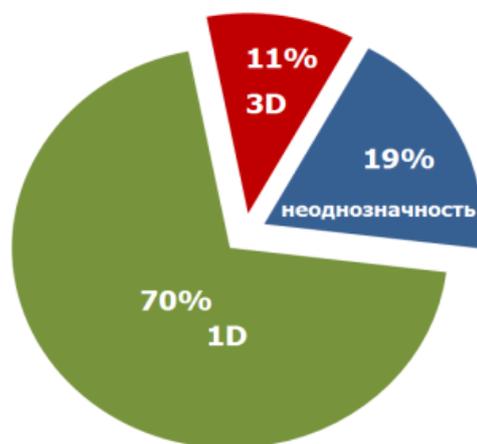
1) невязка подбора теоретической кривой к практической (в рамках одномерной инверсии) более 10 %;

2) среднеквадратическое расхождение кривых  $\rho_t$  от одной установки более 10%.

Хотя эти критерии являются оценочными, модельный эксперимент подтвердил, что их применение обосновано, особенно на первых этапах интерпретации.

Используя современное программное обеспечение, базу данных зондирований и предложенные критерии, автором проведена оценка «размерности» кривых ЗСБ, зарегистрированных на юге Сибирской платформы. На рисунке 4.9 приведена статистическая диаграмма для оценки «размерности» кривых ЗСБ, построенная на основе анализа 80 000 физических наблюдений из архива «ИЭРП».

Отметим, что при оценке «размерности» кривые, осложненные эффектами МВ и ИВП, были исключены из статистических расчетов. Оценка проводилась на основе отклонения группы разнесенных кривых относительно друг друга для одной ГП в программе «EMQS» [33].



**Рисунок 4.9 – Диаграмма для оценки «размерности» кривых ЗСБ на основе выборки из 80 000 физических наблюдений (юг Сибирской платформы)**

Одним из критериев при оценке является расхождение сигналов становления на поздних временах, что более явно проявляется в трансформациях  $\rho_T$  и  $S_T(H_T)$ . Для количественной оценки применяется процентное отклонение кажущейся проводимости от среднего значения:

$$K_{S_t} = \left| \frac{(\overline{S_T(H_{TB})} - S_{Tt}(H_{TB}))}{S_T(H_{TB})} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

где  $\overline{S_T(H_{TB})}$  – среднеарифметическое значение суммарной продольной проводимости (на глубине  $H_{TB}$ ) для сигналов от одного источника ЭМ поля.

Критерий  $K_S$  позволяет оценить интегральный вклад различных факторов:

1. Влияние неоднородностей геоэлектрического разреза;
2. Эффект МВ и влияние ИВП;
3. Влияние случайных (природных, техногенных) и систематических (методических, инструментальных) погрешностей.

Таким образом, чем меньше значение  $K_S$ , тем больше сигналы соответствуют отклику от горизонтально-слоистой среды и выше качество сигналов становления [33].

Как показывает рисунок 4.9, 70 % данных ЗСБ, полученных на площадях юга Сибирской платформы, соответствует горизонтально-слоистой среде, а 11% – горизонтально-слоистой с присутствием трехмерных неоднородностей; кроме этого имеется область неоднозначной оценки, к которой относятся 19% данных. Наибольшее количество осложненных кривых зарегистрировано в северной части юга Сибирской платформы, что может объясняться присутствием в геологическом разрезе магматических тел.

Таким образом, имеющиеся на сегодняшний день средства для интерпретации данных ЗСБ, основанные на 3D моделировании, не всегда обеспечивают лучший геологический результат по сравнению с 1D инверсией. Несомненно, средства 3D инверсии данных ЗСБ развиваются и точность

подбора модели увеличится, но на данный момент, наилучшим способом получения приемлемого результата является комбинирование 1D и 3D подходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований состоят в оптимизации методики ЗСБ для геологических условий юга Восточной Сибири средствами 3D моделирования и в главном сводятся к следующему.

Разработан методический подход, применение которого повышает информативность зондирований на предполевом этапе работ путем выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ. Методика позволяет «настраивать» установку на выявление главных особенностей конкретного геологического разреза, обеспечивая при этом не только решение задачи на заданном уровне, но и оптимизацию производственных затрат.

Посредством применения указанной методики определены и численно обоснованы размеры установки ЗСБ применительно к геологическим условиям Непского свода. С помощью установки (длина стороны генераторной петли - 600 м; расстояние между ПК - 400-500 м) стало возможным уверенное выделение (на высоком уровне ЭМ помех) ряда структурных объектов, типичных для осадочного чехла рассматриваемой территории.

Произведена оценка одномерности данных ЗСБ, полученных для юга Сибирской платформы, на основе эмпирически обоснованных численных критериев. Установлено, что большая часть объема электроразведочных данных достоверно интерпретируются в рамках горизонтально-слоистой модели, что по большому счету обеспечивает правомерность применения одномерной инверсии при обработке материалов зондирований в изучаемом регионе.

Определен уровень прироста геологической информации вследствие применения трехмерного моделирования для случаев горизонтально-однородной и горизонтально-неоднородной сред. Установлена принципиальная необходимость применения 3D моделирования при превышении допустимого уровня «неоднородности», т.е. осложнения кривых влиянием трехмерной неоднородности. Использование одномерной инверсии в базовой части интерпретации данных ЗСБ и 3D моделирования для особых случаев горизонтально-

неоднородных сред повышает возможности метода для решения нефтегазопроисковых и структурных задач на территории юга Сибирской платформы.

В целом проведенные исследования позволяют вывести интерпретацию ЗСБ на качественный новый уровень за счет привлечения на всех этапах работ трехмерного моделирования.

С учетом результатов проведенной работы намечаются следующие направления повышения информативности ЗСБ:

1. Разработка оптимальной с производственной точки зрения технологии работ с комбинированием ГП разного размера (в случае детального картирования всего осадочного чехла);

2. Разработка новых критериев для оценки влияния 3D неоднородностей на кривые ЗСБ;

3. Создание базы данных геологических неоднородностей юга Сибирской платформы и создание альбома, иллюстрирующего различные 3D эффекты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Ю.А., Гомульский В.В., Буддо И.В., Шарлов М.В., Мисюркеева Н.В., Акулова И.В. Отчет о результатах электроразведочных работ методом 3D ЗСБ на территории Токминского НГКМ Западно-Ярактинского участка недр. АО «ИНК-Запад», АО «ИЭРП». Иркутск. – 2016. – 99 с.
2. Агафонов Ю.А., Кондратьев В.А., Ольховик Е.А., Пашевин А.М., Поспеев А.В. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр. – 2004. – №8-9. – С. 26-28.
3. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В. Программно-измерительный комплекс для работ методом ЗСБ // Геофизический вестник. – 2001. – №10. – С. 8-11.
4. Агафонов Ю.А., Суров Л.В., Шарлов М.В. Принцип работы и основные компоненты аппаратурно-программного комплекса цифровой телеметрической электроразведочной станции «Пикет» // Российский геофизический журнал. – 2006. – С. 98-102.
5. Агафонов Ю.А., Токарева О.В., Компаниец С.В., Багаева Н.В., Лукашева Л.С., Гомульский В.В., Бугакова Е.М., Семинский И.К., Сень Е.А., Шелохов И.А. Отчёт о результатах электроразведочных работ методом малоглубинных ЗСБ на Тымпучиканском лицензионном участке. ООО «Газпромнефть-Ангара», АО «ИЭРП». Иркутск. – 2013. – 123 с.
6. Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Татарников А.С. Возможности трехмерного математического моделирования для метода ЗСБ в программе «Tem-model» // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Сборник избранных трудов научно-технической конференции ФГГГ. – Иркутск: ИрГТУ. – 2004. – С. 240-245.
7. Барышев А.С., Вахрамеев Г.С., Житков А.Н., Ковалевич Б.В. Геофизические методы поисков железорудных месторождений на юге Восточной Сибири. – М.: Недра. – 1980. – 186 с.

8. Безрук И.А., Куликов А.В., Киселев Е.С. и др. Электроразведка в комплексе глубинных и поисковых геофизических работ // Геофизика. – 1994. – № 5. – С. 23-30.
9. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий электромагнитного поля Земли. – М.: Недра. – 1981. – 327 с.
10. Бернштейн Г.Л., Мандельбаум М.М., Рапопорт М.Б., Шорникова М.В. Методические особенности прямых поисков нефтегазовых месторождений на южном склоне Непского свода. – М: ВНИИЯГГ ОНТИ. – 1977.
11. Бродовой В.В. Комплексование геофизических методов. – М.: Недра. – 1987. – 471 с.
12. Бубнов В.М. Рабинович Б.И. Захаркин А.К. Прогноз траппов и скоростной характеристики ВЧР в Катангской седловине по данным ЗСБ // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля: Сборник науч.трудов. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1988 г. – С. 99-107.
13. Бубнов В.М., Захаркин А.К., Кунин Д.И., Рабинович Б.И. Шапорев В.А., Шатохин В.Н. Методика и результаты зондирования становлением поля в ближней зоне при изучении осадочных образований на Сибирской платформе // Разведочная геофизика СССР на рубеже 70-х гг.: Тезисы VII Всесоюзной науч. тех. конференции. – М.: Недра. – 1974. – С. 212-216.
14. Бубнов В.М., Рабинович Б.И., Захаркин А.К. Эффективное применение электроразведки ЗСБ при поисках нефти и газа на востоке Катангской НГО // Поиски и разведка месторождений нефти и газа в Красноярском крае: Тезисы 8-й регион. науч.-практич. конф. – Красноярск. – 1988. – С.77-79.
15. Бубнов В.М., Татаринов А.Б. Способ непалеточной интерпретации кривых кажущегося сопротивления ЗСБ // Геология и геофизика. – 1977. – №10. – С. 137-139.
16. 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. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – 2012. – 162 с.

17. Буддо И.В., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Некоторые аспекты выделения пластов-коллекторов в осадочном чехле юга Сибирской платформы по данным нестационарных электромагнитных зондирований: Материалы всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли. Кн. 2. – С.-Пб. – 2011. – С. 170-173.
18. Бучарский Б.В., Тикшаев В.В., Горячев В.В. Решение задач гидрогеологии с помощью электроразведки // Разведка и охрана недр. – 1985. – №5. – С. 49-53.
19. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир. – 1997. – 218 с.
20. Ваньян Л.Л., Давыдов В.М., Терехин Е.И. О некоторых причинах искажений кривых зондирований становления поля // Прикладная геофизика. Вып. 41. – М.: Недра. – 1965. – С. 84-94.
21. Вахромеев Г.С., Давыденко А. Ю. Моделирование в разведочной геофизике. – М.: Недра. – 1987. – 190 с.
22. Вахромеев Г.С. Петрофизика. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та. – 1997. – 462 с.
23. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю., Кожевников Н.О., Никифоров С.П. Физическое моделирование нестационарных полей при изучении магнетитовых месторождений юга Сибирской платформы // Математическое и физическое моделирование железорудных месторождений и рудных полей. – Новосибирск: СНИИГГИМС. – 1983. – С. 106-111.
24. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. – 1988. – 224 с.
25. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О., Никитин И.В. К теории возбуждения электромагнитных полей в электроразведке // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. – М.: Наука. – 1990. – С. 76-78.
26. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О., Никитин И.В. Методика и результаты малоглубинных ЗСБ при инженерно-геологических изысканиях в Иркутской

- области // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. – Свердловск: СГИ. – 1989. – С. 61-66.
27. Великин А.Б., Булгаков Ю.И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля. – Л.: Недра. – 1967. – 55 с.
28. Вознюк В.Р., Глинский Б.М., Исаев Г.А., Иванов В.М., Ним Ю.А. О результатах полевых испытаний электроразведочной аппаратуры «Зонд» по методу зондирования становлением поля в ближней зоне // Измерительная аппаратура для разведочной геофизики. – Новосибирск: Изд-во ИАЭ СО АН СССР. – 1973. – С. 102-113.
29. Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии. – М.: МГУ. – 2007. – 448 с.
30. Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе. – М.: Недра. – 1983. – 128 с.
31. Гитарц Я.И., Рабинович Б.И. Требования к приемникам, измеряющим компоненты магнитного поля в методе ЗСБЗ // Геофизическая аппаратура. – 1979. – Вып. 69. – С. 133-145.
32. Горностаев В.П. Панкратов В.М. Рабинович Б.И. Опыт применения метода ЗСБ в восточной части Иркутского амфитеатра // Геология и геофизика. – 1973. – №73.
33. Гусейнов Р.Г. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований: автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ. – 2015. – 24 с.
34. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 5(100). – С. 53-60.
35. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Шарлов М.В. Интеграция оперативной системы обработки и хранилища данных электромагнитных зондирований // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 4(87). – С. 18-23.
36. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефте-газонасыщения горных пород. – М.: Недра. – 1985. – 310 с.

37. Дегтярев Б.П. Возможности ГИС при классификации рифейских коллекторов и толщ Сибирской платформы // Каротажник. – 2002. – № 99. – С. 51–60.
38. Дикмарова Л.П. Анализ геометрии установок индуктивных методов электроразведки. – Киев: Наукова думка. – 1968. – 156 с.
39. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). – М.: Недра. – 2004. – С. 119-184.
40. Евдокимов И.М., Селезнева Г.В., Хахалина Т.А. О возможности использования индуктивности петли для электроразведочных целей // Электрометрические исследования при поисках и разведке рудных месторождений. – Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР. – 1977. – С. 121-123.
41. Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация зондирований становлением поля в горизонтально-слоистых средах: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Новосибирск. – 1990. – 16 с.
42. Емельянов В.С., Суров Л.В., Шарлов М.В., Агафонов Ю.А. Современное программное средство 1D инверсии и моделирования данных ЗСБ MODEL4 // XIII международный геофизический научно-практический семинар: Тезисы докладов. – С.-Пб. – 2016. – С. 115-122.
43. Жданов М.С. Электроразведка. – М.: Недра. – 1986. – 316 с.
44. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО ИПЦ "Маска". – 2009. – 376 с.
45. Захаркин А.К. Временная дискретизация сигнала становления поля в нефтяной электроразведке / Результаты применения метода зондирования становлением поля в районах Сибирской платформы. – Новосибирск: СНИИГ-ГиМС. – 1987. – С. 90-98.
46. Захаркин А.К. Компактная приемная петля для импульсной электроразведки // Российский геофизический журнал. – 1998. – № 9-10. – С. 95-99.
47. Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1981. – 98 с.

48. Захаркин А.К. Могилатов В.С. Горошко Н.В. Первичная обработка материалов ЗСБ, полученных на аппаратуре «Цикл-2» // Результаты применения метода зондирования становлением поля в районах Сибирской платформы. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1987. – С. 120-125.
49. Захаркин А.К. Особенности методики ЗСБЗ в высокоомных средах // Матер. Всесоюзного семинара по методу становления электромагнитного поля. – Новосибирск. – 1977.
50. Захаркин А.К. Оценка оптимальных разносов установки и длины питающей линии в методе ЗСБЗ // Новые данные по геологии и геофизике: Тезисы докладов мол. ученых и специалистов. – 1972. – С. 81-83.
51. Захаркин А.К. Погрешности дифференциальных трансформаций результатов зондирования становлением поля в ближней зоне // Изучение нефтегазонасыщенности Сибирской платформы геофизическими методами. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1980. – Вып. 281. – С. 79-84.
52. Захаркин А.К. Разработка аппаратурно-методического обеспечения импульсной индуктивной электроразведки для нефтепоисковых работ в условиях Сибирской платформы: Дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск. – 2000. – 133 с.
53. Захаркин А.К., Кунин Д.И. Зондирование становлением поля в ближней зоне. – М.: Недра. – 1976. – 102 с.
54. Захаркин А.К., Кунин Д.И., Рабинович Б.И., Шатохин В.Н. Обоснование технических условий построения электроразведочной станции, предназначенной для метода ЗСБЗ // Вопросы разведочной и промысловой геофизики Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1973. – Вып.168. – С. 38-43.
55. Захаркин А.К., Рабинович Б.И., Финогеев В.В., Морозова Г.М., Панкратов В.М., Холин Б.Н., Бубнов В.М., Никитин В.П. Возможности метода ЗСБЗ при изучении палеозойских отложений Сибирской платформы и поисках в них залежей нефти и газа // VIII Всесоюз. науч.-техн. геофизическая конференция: Тезисы докладов. – Тюмень. – 1976. – С. 16-18.

56. Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. – Л.: Недра. – 1984. — 534 с.
57. Исаев Г.А., Ремпель Г.Г. Метод переходных процессов при поисках полиметаллических месторождений пластообразной формы. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1974. – 88 с.
58. Исаев Г.А., Ицкович Г.Б., Тригубович Г.М., Филатов В.В. Методические рекомендации по интерпретации зондирований методом переходных процессов. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1985. – 90 с.
59. Каменецкий Ф.М., Новиков П.В., Тимофеев В.М. Использование дифференциальных трансформаций для качественной интерпретации данных электромагнитных зондирований методом становления поля // Физика Земли. – 1993. – №9. – С. 91-96.
60. Карнаухов В.В. Зыкова Н.Ф., Лаврентьева А.Е. Новотнова О.Я., Лагута Н.А. Отчет о работах Ярактинской электроразведочной партии №20. – 1973. – 120 с.
61. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. – М.: Недра. – 2000. – 519 с.
62. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирований становлением поля в ближней зоне. – Новосибирск: Наука. – 1970. – 123 с.
63. Кожевников Н.О., Никитин И.В. Влияние типа установки на результаты измерений в методе переходных процессов // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири. – 1987. – С. 38.
64. Кожевников Н.О. К теории возбуждения переходных процессов при изучении верхней части геоэлектрического разреза // Использование новых геофизических методов при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач: Тезисы докладов 10-го Всесоюзного научно-технического семинара. – М. – 1989. – С. 17-19.

65. Кожевников Н.О. Методика ЗСБ при изучении элементов структур рудных полей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... канд. геол.- минерал. наук. – Иркутск: Изд-во ИПИ. – 1983. – 18 с.
66. Кожевников Н.О. Роль геоэлектрического моделирования при изучении железорудных месторождений юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Модели и моделирование при поисках и разведке. – Иркутск: Изд-во ИПИ. – 1989. – С. 122-128.
67. Кожевников Н.О., Никитин И.В. Особенности методики нестационарных электромагнитных зондирований верхней части геологического разреза (ВЧР) // Использование новых геофизических методов для решения инженерно-геологических и гидрогеологических задач: Тезисы докладов 10-го Всесоюзного научно-технического семинара. – М. – 1989. – С. 19-20.
68. Кожевников Н.О., Никифоров С.П. Метод ЗСБ при изучении структуры Октябрьского железорудного месторождения // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. – Свердловск: СГИ. – 1982. – С. 24-27.
69. Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Никитин И.В. Применение метода ЗСБ для выявления и оценки параметров тектонических нарушений при решении задач сейсмического микрорайонирования // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. – Владивосток. – 1989. – Ч. 2. – С. 8-9.
70. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. – 2014. – Вып. №88 (5). – С. 53-62.
71. Конторович А.Э. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО». – 2000. – 165 с.
72. Корольков Ю.С., Эффективность электроразведочных методов при поисках нефти и газа. – М.: Недра. – 1988. – 226 с.

73. Крюкова Л.Г. Приближенный способ интерпретации зондирований становлением поля в ближней зоне // Мат. моделирование электромагнитных полей. – М.: Изд-во ИЗМИРАН. – 1983. – С. 214-222.
74. Кунин Д.И. Цифровая аппаратура для электроразведки методом ЗСБ: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск. – 1981. – 18 с.
75. Мандельбаум М.М., Рабинович Б.И., Сурков В.С. Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе. – М: Недра. – 1988. – 182 с.
76. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. – М.: Недра. – 1974. – 232 с.
77. Матвеев Б.К. Электроразведка: учебник для вузов. – М.: Недра. – 1990. – 368 с.
78. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие / В.С. Могилатов. – Новосибирск: Изд-во НГУ. – 2002. – 208 с.
79. Могилатов В.С. Развитие интерпретационных средств индуктивной импульсной электроразведки: дис. ... канд. техн. наук. – 1998. – 141 с.
80. Могилатов В.С., Эпов М.И. Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. – 1999. – №11. – С. 78-86.
81. Набигян М.Н. Квазистатический переходный отклик проводящего полупространства. Приближенное представление // Геофизика. – 1979. – – – №10. – С. 1700-1705.
82. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. – Издательство ГЕРС. – 2004. – 294 с.
83. Никифоров С.П., Кожевников Н.О. Комплексный показатель неоднородности геоэлектрического разреза // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири. – Иркутск. – 1989. – С. 84.
84. Орлов Н.Н. Методика электромагнитных зондирований в ближней зоне при решении гидрогеологических и инженерно- геологических задач: Автореф. дис. ... канд. геол.- минерал. наук. – 1987. – 22 с.

85. Орлова Д.А., Компаниец С.В., Токарева О.В., Агафонов Ю.А. Анализ зависимостей геоэлектрических параметров по данным ЗСБ с параметрами коллекторов (на примере одного из участков Восточной Сибири) // 18 конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель-2016»: Тезисы докладов. – Геленжик. – 2016. – С. 97-109.
86. Персова М.Г. Зондирование становлением поля трехмерных сред и проблемы интерпретации // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2009. – Том XII. – № 2(38). – С. 84-86.
87. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Токарева М.Г., Алексеева Е.Д., Блинова М.Е., Гусейнов Р.Г., Давыденко М.А., Егоров И.В., Ерпулев А.А., Кандакова Т.А., Семинский И.К., Трусков А.А., Яковлев С.В. Применение программных комплексов Geo-EM и WebGEM для решения научных и практических задач геоэлектроразведки // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №4 (53). – С. 12-24.
88. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Научно-технический журнал Евро-Азиатского геофизического общества «Геофизика». – Тверь: Изд-во ГЕРС. – 2010. – № 6. – С. 47 -52.
89. Поспеев А.В., Буддо И.В., Суков Л.В. К вопросу о разрешающей способности нестационарных электромагнитных зондирований при картировании горизонтов-коллекторов в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIV Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2011. – С. 209-210.
90. Поспеев А.В., Пашевин А.М., Яговкин А.Л. Применение компьютеризированной аппаратуры СГС-ТЕМ при исследованиях методом ЗСБ // Геофизика. Специальный выпуск к 50-летию Иркутскгеофизика. – 1999. – С. 45-46.
91. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Колпакова Н.А. Проявления благороднометальной минерализации в осадочных железных рудах Бакчарского

- месторождения // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири. – Томск. – 2005. – С. 274-277.
92. Рабинович Б.И. Захаркин А.К. Результаты опытных полевых работ методом ЗСБЗ в западной части Сибирской платформы // Вопросы разведочной и промысловой геофизики в Западной Сибири: Труды СНИИГГиМС.– 1972. – Вып. 156. – С. 79-82.
93. Рабинович Б.И. Метод зондирования становлением поля в ближней зоне и результаты его применения на Сибирской платформе: Дис.... докт. геол.-минер. наук. – Новосибирск. – 1977. – 445 с.
94. Рабинович Б.И. Наставление по электроразведочным работам методом ЗСБЗ: Интерпретация. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1973. – 80 с.
95. Рабинович Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: конспект лекций. – Иркутск: Изд-во ИПИ. – 1987. – 52 с.
96. Рабинович Б.И., Захаркин А.К. Дифференциальные зондирования как один из способов повышения разрешающей способности метода ЗСБЗ // Новое в развитии нефтяной геофизики в Сибири: Труды СНИИГГиМС. – 1976. – Вып. 239. – С. 34-42.
97. Рабинович Б.И., Захаркин А.К., Кунин Д.И. и др. Результаты и перспективы развития электроразведочных работ в Восточной Сибири для поисков месторождений нефти и газа // Состояние и пути повышения эффективности геофизических работ в Сибири: Материалы IX Всесоюзной науч.-техн. геофиз. конференции. – 1980.
98. Рабинович Б.И., Захаркин А.К., Финогеев В.В., Бубнов В.М. Методические указания по применению метода ЗСБ с аппаратурой «Цикл-2» в районах Сибирской платформы. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1984. – 68 с.
99. Рабинович Б.И., Финогеев В.В. Методические рекомендации по анализу зондирований становлением поля в ближней зоне в горизонтально-неоднородных средах. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1983. – 48 с.
100. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. – М.: Недра. –1973. – 254 с.

101. Семинский И.К. К вопросу о повышении информативности ЗСБ // Электронный сборник тезисов IV всероссийского научно-практического семинара с международным участием имени Г.С. Вахромеева. – 2017.
102. Семинский И.К., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А., Белая А.А., Тригубович Г.М. Опыт комбинирования 1D и 3D подходов интерпретации материалов ЗСБ при решении нефтегазопроисловых задач в Восточной Сибири // ГЕОБАЙКАЛ 2016: Материалы третьей международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования. – Иркутск. – 2016.
103. Семинский И.К., Буддо И.В., Суров Л.В., Агафонов Ю.А. Опыт 3D моделирования сигналов становления электромагнитного поля в условиях осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. – 2012. – Вып. 65. – С. 49-53.
104. Семинский И.К., Гусейнов Р.Г., Жаргалов Б.Б., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимальной сети наблюдения для метода ЗСБ посредством 3D моделирования для геологических условий Восточной Сибири // ГЕОБАЙКАЛ 2014: Материалы второй международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования. – Иркутск. – 2014.
105. Семинский И.К., Емельянов В.С., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального размера источника электромагнитного поля в методе ЗСБ для геологических условий Восточной Сибири // Геофизика-2015: Тезисы X международной конкурс-конференции молодых специалистов. – 2015. – С. 72-75.
106. Семинский И.К., Емельянов В.С., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Макаров А.А., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального размера источника электромагнитного поля в методе ЗСБ для геологических условий Иркутской области // Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Известия Сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. –2017. – Вып. 2 (40). – С. 75-88.
107. Семинский И.К., Ильин А.И., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. – Выбор оптимального шага между приемниками ЗСБ посредством 3D мо-

- делирования для геологических условий Восточной Сибири // Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Известия Сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. –2014. – Вып. №4 (47). – С. 56-63.
108. Сидоров В.А., Ключников В.А., Яхин А.М. и др. Применение зондирования становлением поля в гидрогеологии и инженерной геологии // Геофизические методы в гидрогеологии, инженерной геологии и гидротехнике: Тезисы докладов 8-го научно-технического семинара-совещания. – Ереван. – 1985. – С. 191-102.
109. Сидоров В.А., Губатенко В.П., Глечиков В.А. Становление поля в неоднородных средах применительно к геофизическим исследованиям. – Саратов: Изд-во СГУ. – 1977. – 223 с.
110. Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка становлением поля в ближней зоне. – Саратов: Изд-во НВНИИГГ. – 1969. – 58 с.
111. Смилевец Н.П. Комплексная интерпретация геофизических данных в сложнопостроенных районах // Разведочная геофизика. – М.: Недра. – 1980. – Вып. 91. – С. 68 - 79.
112. Суров Л.В. Создание единой эффективной программной среды обработки, визуализации и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Вторая Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о Земле: Тезисы докладов. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та. – 2004. – С. 162-163.
113. Табаровский Л.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. – Новосибирск. – 1988. – 22 с.
114. Табаровский Л.А., Эпов М.И., Сосунов О.Г. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения. – Новосибирск. – 1985. – 47 с.
115. Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А. Комплексование геофизических методов. – М.: Недра. – 1982. – 295 с.

116. Тригубович Г.М. Электромагнитная разведка становлением поля наземного и воздушного базирования: новая концепция и результаты // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. – С-Пб.: Изд-во СПбГУ. – 2011. – С. 118-132.
117. Тригубович Г.М., Белая А.А., Чернышев А.В., Симанкович Н.В. Комплексная интерпретация электроразведочных данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе EM-DataProcessor // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 237-242.
118. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Наука. – 2009. – 214 с.
119. Финогеев В.В. Метод зондирования становлением поля в ближней зоне с индукционным возбуждением и результаты его применения в восточной части Сибирской платформы: Дис.... канд. геол.–минер. наук. – СНИИГ-ГиМС. – 1979.
120. Финогеев В.В., Соломон А.З. Выявление водонасыщенных коллекторов с помощью метода ЗСБ на Среднеботуобинском месторождении // Тр. СНИИГГиМС.– 1979. – Вып. 271. – С. 106-111.
121. Шапорев В.А. Методическое пособие по интерпретации ЗСБ. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1986. – 20 с.
122. Шапорев В.А., Овелян С.П. О точности кривых  $S_{\tau}$  ЗСБ // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 1988. – С. 64-68.
123. Шерман Г.Х. Исследование зависимости коэффициента увеличения сопротивления от водонасыщенности в области малых значений насыщения // Каротажник. – № 98. – С. 150-163.
124. Электроразведка. Справочник геофизика. – М.: Недра. – 1979. – 441 с.
125. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. – Новосибирск. – 1992. – 31 с.

126. Якубовский Ю.В., Каменецкий Ф.М., Светов Б.С. Индуктивные методы электроразведки. – М.: ОНТИ ВИЭМС. – 1964. – 212 с.
127. Buselli G. The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47. – № 9. – P. 1315-1324.
128. Colani C., Aitken M.J. Utilization of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospecting // *Nature*. – 1966. – N 5069. – P. 1446-1447.
129. Hill D.A., Wait J.R. Anomalous vertical magnetic field for electromagnetic induction in laterally varying thin conductive sheet // *Radio Science*. – 1986. – Vol. 21. – № 4. – P. 617-621.
130. Kaufman A.A., 1978. Inductive source method of induced polarization prospecting: U.S. Patent N 4, 114, 086 to Scintrex Limited, Sep. 12.
131. Lee T.J. The transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49. – № 7. – P. 854-860.
132. McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques. – Missauga, Canada: Geonics Limited. – TN 7, 1980. – 17 p.
133. Morrison H.F., Phillips R.J., O'Brien D.P. Quantitative interpretation of electromagnetic fields over a layered halfspace // *Geophysical Prospecting*. – 1969. – Vol. 17. – P. 82-101.
134. Ogilvy R.D. Interpretation of EM common-loop anomalies by response characteristics // *Geophysical prospecting*. – 1987. – Vol. 35. – № 4. – P. 454-473.
135. Persova M.G., Soloveychik Y.G., Shilak D.V. et al. Software for solution of 3D problems of electrical survey by transient electromagnetic field using finite elements method // *Korus-2005: The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology*. – Novosibirsk. – 2005.
136. Stefanescu S., Schlumberge C.M. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre verticale dans un terrain couches horizontales homogènes et isotrope // *J. de Physik*. – 1930. – Vol. 1. – № 4.