

На правах рукописи



ОСИПОВА Полина Сергеевна

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ
ДЛЯ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ
АЛЛЮВИАЛЬНЫХ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Оленченко Владимир Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Куликов Виктор Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизических методов исследований земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), главный геофизик ООО «Северо-Запад»;

Гурин Григорий Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 30 сентября в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3; факс 8-(383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/osipova2025>

Автореферат разослан 8 августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м. н., доцент

Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – аллювиальные россыпи золота на предмет их проявления в данных электротомографии.

Актуальность. В настоящее время геолого-разведочные работы (ГРП) на россыпных месторождениях золота выполняются на основе методических рекомендаций (Методика разведки россыпей золота и платиноидов, 1992). В них отмечается необходимость применения геофизических методов для решения геологических задач на россыпях. Основными методами решения указаны вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирование (ЭП). Современной модификацией этих методов является электротомография (ЭТ), для которой существует как высокопроизводительная аппаратура, так и программное обеспечение для двумерной и трёхмерной инверсии, что позволяет применять ЭТ при изучении сложно построенных сред. Однако, применение ЭТ для поисков и разведки россыпей не регламентировано современной нормативной базой, поэтому оставалось неясным – насколько разнообразны двумерные и трёхмерные геоэлектрические модели аллювиальных россыпей, и до последнего времени не были разработаны критерии интерпретации данных.

Ещё одной актуальной задачей является разведка частично отработанных россыпей, пригодных для повторной отработки, поскольку содержание в них неучтённого золота достигает промышленных значений. В существующих нормативных документах отсутствуют методики оценочных и разведочных работ для техногенных россыпей (Чернявский, 2020). При этом металл в пределах отработанных участках распределён незакономерно, что при повторной разведке обуславливает необходимость определения границ целиков, отработанных участков и рекультивированных полигонов.

На основе анализа геологического строения и опыта эксплуатационной разведки россыпных месторождений для решения геологических задач, предлагается использование метода ЭТ. Исследования, направленные на обоснование применения предложенного метода, а также его возможностей и ограничений при поисках и разведке являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

В мировой практике имеются отдельные работы, посвящённые поискам и разведке аллювиальных россыпей золота геофизическими методами, такими как ВЭЗ, ЭП, ЭТ, зондирования становлением поля (ЗСБ) и метод переходных процессов (МПП), магниторазведка, гравиразведка, сейсморазведка. Однако это единичные исследования, проведённые на отдельных участках и зачастую только с коммерческими целями. Выделить авторов, направленно занимающихся научным исследованием поставленных актуальных вопросов, определить не удалось.

Цель исследования – на основе численного, физического моделирования и полевого эксперимента обосновать целесообразность применения метода электротомографии для поиска и разведки аллювиальных россыпей золота.

Научные задачи:

1. Разработать геоэлектрическую модель аллювиальной россыпи на основе анализа строения речных долин и фациального состава отложений;
2. Установить оптимальные параметры сети наблюдения методом электротомографии для картирования русловой фации аллювия при поисковых и разведочных работах на россыпное золото.
3. Определить геоэлектрические критерии выделения рекультивированных полигонов в пределах отработанных россыпей и оконтуривания нетронутых участков (целиков).

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов заключается в обосновании и создании теоретической геоэлектрической модели речной долины с аллювиальной россыпью золота.

Разработанная геоэлектрическая модель и установленные критерии интерпретации данных использованы при поисковых работах на лицензионных площадях в Республике Бурятия, Иркутской, Кемеровской и Томской областях, Алтайском, Забайкальском и Камчатском краях. Полученные данные позволили недропользователям спланировать горные работы, задать положение разведочных буровых линий и шурфов, что повысило геологическую и экономическую эффективность поисков. На площади в Иркутской области результаты ЭТ использованы для оценки прогнозных

ресурсов по категории P_1 , а в Томской области – для постановки на учёт прогнозных ресурсов по категории P_1 .

Результаты исследования предлагаются как основа для методических рекомендаций по поискам и разведке россыпных аллювиальных месторождений золота. Принципиально важно, что результаты ЭТ необходимо использовать для оценки прогнозных ресурсов по категории P_1 , а после заверочных работ шурфами и скважинами – для подсчёта запасов по категории C_2 .

Методы исследования и фактический материал

Исследования проведены с использованием численного и физического моделирования, полевых экспериментов методом электротомографии.

Прямое двумерное и трёхмерное численное моделирование электрических полей выполнено с использованием программного обеспечения ZondRes2D и ZondRes3D (автор Каминский А. Е.) соответственно.

Физическое моделирование проведено на стенде, имитирующем долину реки с палеоруслом.

Полевые эксперименты проведены на 9 участках в Республике Бурятия, Иркутской, Кемеровской, Магаданской и Томской областях, Алтайском, Забайкальском и Камчатском краях. Общий объем измерений составил более 70 погонных километров.

Зондирования в рамках полевых и лабораторных исследований выполнены сертифицированной электроразведочной аппаратурой «Скала-48K12» и «Скала-64K15» (ООО «КБ Электрометрии»).

Первичная обработка полевых данных производилась в программе Xeris (ООО «КБ Электрометрии»), поставляемой вместе с аппаратурой.

Одномерная инверсия данных выполнялась в программе IPI2Win (автор Бобачёв А. А.).

Для двумерной и трёхмерной инверсии соответственно использованы RES2DINV и RES3DINV (автор Loke M. H.).

Защищаемые научные результаты

1. Отложения фации плёсов и перекатов, перспективные на золотоносность, создают высокоомные корытообразные аномалии на геоэлектрических разрезах и лентообразные аномалии в плане, что даёт возможность для их поисков методом электротомографии.

2. В долинах полугорных рек оптимальными параметрами сети наблюдений для картирования отложений русловой фации аллювия на стадии поисков является масштаб съёмки не мельче 1:5000, а на стадии детальных поисков – не мельче 1:3000. Шаг измерений по профилю не должен превышать двойную ожидаемую мощность аллювиальных отложений.

3. На территории отработанных россыпей критерием распознавания рекультивированного полигона является выдержанный по мощности и удельному электрическому сопротивлению слой в верхней части геоэлектрического разреза, представленный техногенными отложениями полифациального гранулометрического состава, а россыпи, сохранившейся в естественном залегании – локальная высокоомная аномалия от палеорусл.

Научная новизна

1. На основе геологических представлений с учётом фациального состава отложений разработана геоэлектрическая модель долины реки, включающая аллювиальную россыпь. Фации плёсов и перекатов, перспективные на золотоносность, определены как объект, имеющий корытообразную форму и удельное электрическое сопротивление (УЭС) 300–1000 Ом·м.

2. Обоснована сеть наблюдений методом ЭТ для картирования палеорусел и даны рекомендации по её оптимизации с учётом морфологии речного русла.

3. Впервые обоснованы геоэлектрические модели и показаны различия в электрических полях целиков и рекультивированных полигонов.

Апробация результатов и публикации

Основные результаты диссертационной работы успешно докладывались на семинарах, международных и российских конференциях: 16-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2020 (г. Пермь, 12–16 мая, 2020); 17-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2021 (г. Геленджик, 26–30 апреля, 2021); 18-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2020 (г. Геленджик, 5–8 сентября, 2022); 19-я научно-практическая конференция и выставка

Инженерная и рудная геофизика 2023 (г. Санкт–Петербург, 15–19 мая, 2023); научно-практическая конференция «Электроразведка–2022»; научный семинар «Современные проблемы геофизики» (онлайн, г. Москва, 2022).

Материалы диссертации изложены в восьми публикациях, из них три статьи в ведущих рецензируемых журналах категории К1, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией ("Геология и геофизика", "Известия Томского политехнического института. Инжиниринг георесурсов") и четыре публикации в сборниках материалов научных конференций.

Личный вклад заключается в непосредственном участии соискателя в полевых исследованиях в качестве оператора электроразведочной станции в течение полевых сезонов 2018–2021 гг., количественной и геологической интерпретации данных, планировании и проведении физического эксперимента и численного моделирования, подготовке публикаций по теме диссертации.

Проанализировано геологическое строение речной долины и типичного геологического разреза аллювиальных отложений. На основе анализа геологического строения разработана геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи. Проведено численное моделирование электрических зондирований методом ЭТ долины реки с палеоруслом. Собран стенд с физической моделью долины реки с палеоруслом, на котором проведён физический эксперимент. С помощью полевых экспериментов подтверждены ожидаемые аномалии в данных ЭТ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения; пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы 109 страниц, включая 2 таблицы, 42 рисунка, список литературы из 88 наименований и 1 текстовое приложение.

Благодарности

Особую благодарность за годы научного руководства, наставничество и неоценимую помощь на всех этапах работы выражаю научному руководителю канд. геол.-мин. наук В. В. Оленченко.

За помощь в получении качественных полевых материалов, на которых основана диссертационная работа, и при проведении физического эксперимента выражаю благодарность сотрудникам лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН А. С. Калганову и А. В. Чекрыжову.

За внимание к работе, консультации, рекомендации по структурированию и оформлению диссертации выражаю благодарность академику РАН М. И. Эпову, д-ру физ.-мат. наук Е. Ю. Антонову, д-ру геол.-мин. наук Н. О. Кожевникову и д-ру геол.-мин. В. А. Куликову.

За внимание к работе, поддержку и советы благодарю коллег из лаборатории геоэлектрики и лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем ИНГГ СО РАН, д-ра геол.-мин. Н. Н. Неведрову, д-ра геол.-мин. наук С. Б. Бортникову, д-ра геол.-мин. наук Н. В. Юркевич и специалиста отдела подготовки кадров высшей квалификации Т. В. Дзюбенко.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Геологическая модель аллювиальной россыпи золота

В первой главе даётся определение аллювиальной россыпи золота и её геологическое строение, определяется объект геофизических поисков и его геологические характеристики.

Аллювиальной россыпью являются речные отложения, образованные при определённых гидродинамических условиях переноса и преобразования водным потоком обломочного материала и содержащие промышленные концентрации рудных минералов (Билибин, 1955; Кухаренко, 1961; Методика, 1992). Наиболее благоприятные условия для формирования россыпей создаются на полугорных реках, которые характерны для переходных зон от гор к равнине, предгорий, межгорных и внутригорных котловин (Чалов, 2016). Полугорные реки широко распространены в Сибири, на Дальнем Востоке и северо-востоке России, в предгорьях Алтая, Саян, горных массивов Забайкалья, Приморья, Урала и Северного Кавказа (Чалов, Чалова, 2019).

Согласно типовому разрезу аллювиальной россыпи по (Кухаренко, 1961; Herail, 1989) основная масса металла сосредоточена в отложениях плёсовой фации, состоящих из валунов и галечника (рис. 1.1).

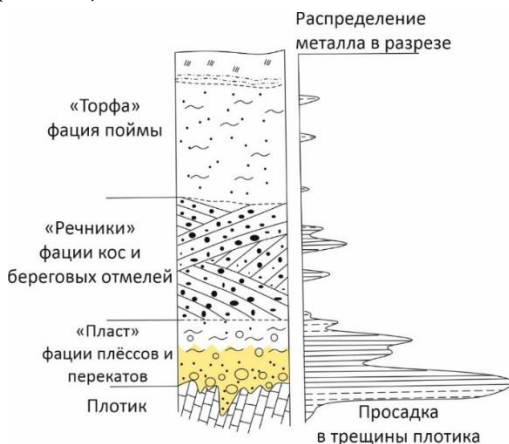


Рисунок 1.1 – Типовой разрез аллювиальной россыпи по Кухаренко (Кухаренко, 1961)

Осадки фации перекаатов характеризуются различной степенью сортировки аллювия и представлены отложениями более мелкого валунно-галечника с неравномерным распределением металла. Фации кос и береговых отмелей содержат преимущественно тонкое золото. Русловые отложения перекрываются песчано-глинистыми образованиями пойменных фаций без значительных концентраций металла. «Пласт» залегает на коренных породах плотика, вблизи кровли которых встречаются углубления («карманы»), где происходит концентрация полезного ископаемого (Ильенок, 1970; Шило, 2002).

Объектом геофизических исследований при поисках и разведке золотоносных аллювиальных россыпей являются структуры, сложенные отложениями русловой фации аллювия – песками, галькой, валунами, залегающие в приплотиковой части разреза в виде протяжённых узких лент в днищах эрозионных долин, на террасах, а также в погребённых долинах (Методика..., 1992).

Важно отметить, что геофизические методы не являются прямыми методами поисков золотоносных россыпей, а только позволяют установить структуру речной долины. Наличие и содержания металла в россыпях устанавливаются только по данным опробования.

2. Современное состояние поисков и разведки россыпей золота геофизическими методами

Во второй главе определено современное состояние геофизических исследований аллювиальных россыпей, сформулированы научные задачи.

Методические рекомендации по поискам и разведке россыпных месторождений золота (Методика, 1992) предусматривают использование геофизических методов, из которых основным является электроразведка на постоянном токе.

Геологический разрез долины реки является двумерным, но наличие «карманов» и сложных геологических форм приводит к трёхмерности среды. Кривые ВЭЗ трудно поддаются уверенной количественной интерпретации вследствие искажений как от приповерхностных неоднородностей, так и от влияния трёхмерных неоднородностей (Хмелевской, Шевнин, 1992; Электроразведка, 2013). Метод ЭТ даёт возможность получать информацию о среде в

виде двумерных и трёхмерных геоэлектрических моделей (Loke, Barker, 1996a, b; Loke, 2001, Бобачев, 2013).

В одном из ранних примеров (Ekström et al., 1996) метод ЭТ оценён как эффективный для выделения структур, сложенных отложениями русловой фации. Выявлена сложность в определении нижней границы аллювия при близком УЭС коренных пород и аллювия.

Опыт использования ЭТ на россыпных месторождениях представлен в ряде публикаций российских авторов. В исследованиях (Давыдов, Бакаев, 2012; Белохвостик и др., 2018) авторы пришли к выводу, что «для изучения россыпей геофизическими методами оптимальным будет сочетание электроразведки на постоянном и переменном токе с малоглубинной сейсморазведкой. Установлено, что при ассоциации золота с магнетитом в качестве дополнительного метода можно использовать магниторазведку» (Давыдов, Бакаев, 2012). Успешное применение магниторазведки подтверждается и работой (Foss et al., 2015), но в публикации (Eberle et al., 2017) аэромагниторазведка оказалась недостаточно чувствительной для выделения золотоносного аллювиального слоя.

Возможности метода электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ–ВП) продемонстрировали (Пустозеров, Тригубович, 2017) не только возможность локализации аллювиальных отложений, но и установление по аномалиям поляризуемости зон золотосульфидной минерализации, являющихся источниками россыпной золотоносности. Кроме того, авторами отмечена необходимость создания физико-геологических моделей для аллювиальных россыпей.

Электротомография для поисков и разведки золотоносных палеорусел успешно применяется и за рубежом (Kim et al., 2009; Swaim, Kamloops, 2013). В работе (Mohamed-Ali, Ibrahim, 2019) авторы установили геологический разрез долины и определили мощность золотоносных отложений. Исследования включали в себя бурение и отбор проб на содержание металла, что позволило оценить ресурсы россыпи.

В исследованиях (Gonzales et al., 2016; Ahmad et al., 2020) авторы рекомендуют выполнение ЭТ по регулярной сети и

применение 3-D инверсии для более точного определения рельефа плотика.

Применение комплекса геофизических методов позволяет повысить качество интерпретации. Наиболее часто встречается совместное применение ЭТ и георадиолокации (ГРЛ) (Hickin et al., 2009; Francke, 2012), поскольку ГРЛ позволяет с высокой достоверностью определять границу между рыхлыми и коренными породами. Однако для метода существует такое ограничение, как затухание сигнала в присутствии низкоомных отложений, к которым относятся торфа (пойменная глинистая фация) в разрезе аллювия.

Сейсмические исследования на россыпных месторождениях решают задачи установления границ аллювиальных отложений (Гайдай, Хасанов, 2019). Однако сейсморазведка является более трудозатратным методом по сравнению с ЭТ, как в полевых условиях, так и в дальнейшей обработке и интерпретации данных.

Из анализа российских и зарубежных публикаций следует вывод, что электроразведка, в том числе ЭТ, в настоящее время применяется для поисков и разведки аллювиальных россыпей, однако до сих пор не конкретизирована геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи и не определены критерии интерпретации данных для её выявления. Отсюда ставится **первая задача данного исследования – разработать двумерную геоэлектрическую модель аллювиальной россыпи на основе анализа строения речных долин и фациального состава отложений.**

В соответствии с методическими рекомендациями геофизические данные совместно с результатами опробования должны быть использованы для оценки ресурсов P_1 и подсчёта запасов категории C_2 . На практике для экономических расчётов необходимо оконтуривание россыпи в плане, что требует площадных зондирований. Из данной проблемы ставится **вторая задача – установить оптимальные параметры сети наблюдения методом ЭТ для картирования русловой фации аллювия при поисковых и разведочных работах на россыпное золото.**

В рассмотренных выше публикациях исследуются целиковые аллювиальные россыпи, т. е. находящиеся в естественном залегании. Однако существуют и уже перемытые долины, в которых сохраняются остаточные целиковые части, требующие повторной отработки (Методические рекомендации..., 2007). В случае

проведённой рекультивации при повторной отработке остро встаёт проблема определения границ перемытых отложений, целиков под выровненными отвалами и рекультивированных полигонов. Опыт разведки частично отработанных россыпей недостаточно обобщён, и рекомендации о параметрах разведочной сети носят предварительный характер (Чернявский, 2020). Для геофизических исследований отработанных россыпей по всей видимости проблема рассматривалась как труднорешаемая из-за отсутствия определённых критериев их идентификации. Необходимо решить **третью задачу – определить геоэлектрические критерии выделения рекультивированных полигонов в пределах отработанных россыпей и оконтуривания нетронутых участков (целиков).**

Решение поставленных задач диссертационной работы основано на материалах, полученных в ходе численных, физических экспериментов; полевых исследований, проведённых в течение 2018-2024 гг. на 11 участках Сибири и Дальнего Востока. Объем зондирований методом ЭТ составил 107 погонных километров.

3. Геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи золота

Третья глава посвящена разработке геоэлектрической модели аллювиальной россыпи, на основе которой проводится двумерное и трёхмерное численное моделирование, приведены результаты физического эксперимента на модели долины реки с палеоруслем и материалы полевых экспериментов.

Основываясь на опыте полевых исследований и известных зависимостях (Вахромеев и др., 1997; Resistivity characteristics, 1987), определены электрические свойства аллювиальных отложений и коренных пород Сибири и Дальнего Востока. Среди аллювиальных отложений максимальные значения УЭС (первые тысячи Ом·м) характерны для хорошо промытых валунно-галечниковых отложений. УЭС песков фаций кос и береговых отмелей изменяется в пределах первых сотен Ом·м. Минимальные значения УЭС (десятки Ом·м) свойственны пойменной фации (Ward, 1988; Вахромеев и др., 1997; Field geophysics, 2003). УЭС коренных пород карбонатного, магматического и метаморфического происхождения варьируется от нескольких сотен до нескольких тысяч Ом·м, иногда достигая десятков тысяч Ом·м (Осипова и др., 2023).

Разработанная геоэлектрическая модель долины реки с аллювиальной россыпью согласована с геологической моделью по Кухаренко (Кухаренко, 1961) (рис. 3.1). Модель включает слой песчано-глинистого материала пойменной фации мощностью 2 м и УЭС 50 Ом·м, суглинки мощностью 1 м с УЭС 30 Ом·м, отложения фации кос и береговых отмелей — мелкий валунно-галечник с песчаным заполнителем мощностью 2 м и УЭС 150 Ом·м, слой валунно-галечников с песчано-глинистым заполнителем (УЭС=800 Ом·м) мощностью 2 м и плотик, представленный трещиноватым песчаником с сопротивлением 300 Ом·м (рис. 3.2, а). В интервале 70–84 м в плотике смоделирован «карман» — углубление мощностью 3 м, заполненное валунно-галечниковыми отложениями (Оленченко, Осипова, 2022).

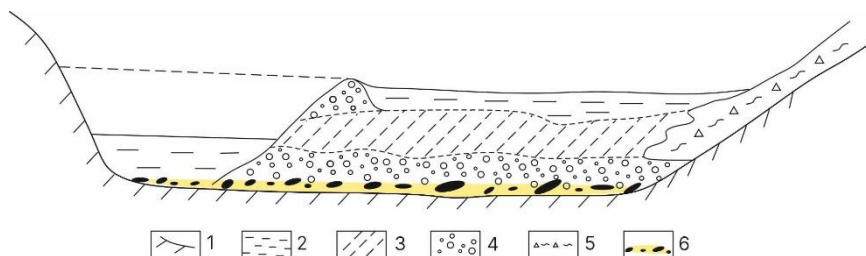


Рисунок 3.1 – Распределение фаций аллювиальных отложений на продольном профиле долины реки

1 – коренные породы; 2 – пойменная фация; 3 – фация кос и береговых отмелей; 4 – фация перекатов; 5 – фация плёсов; 6 – склоновые отложения.

На разработанной модели аллювиальной россыпи выполнено прямое численное двумерное моделирование. В результате инверсии на геоэлектрическом разрезе восстановлены все модельные слои аллювиальных отложений. Валунно-галечниковые отложения палеоруслы и карман в плотике определяются в виде корытообразной аномалии веского УЭС (380-650 Ом·м) (рис. 3.2, б). При этом участки углублений будут проявляться как локализованные зоны экстремально высокого УЭС (1300-1700 Ом·м). Мощность и УЭС восстанавливаются с погрешностью из-за принципа эквивалентности моделей (Бобачев и др., 2013). При наличии данных о глубине залегания кровли коренных пород, полученных посредством других геофизических методов или

разведочных шурфов и скважин, возможно фиксировать положение границ в процессе инверсии.

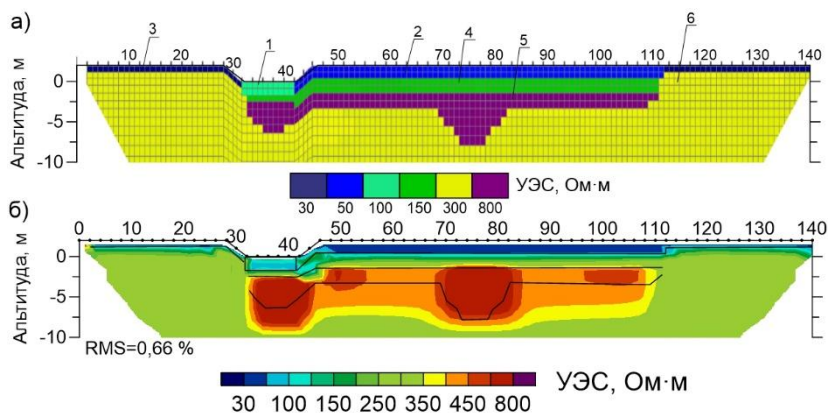


Рисунок 3.2 – Геоэлектрическая модель долины реки с аллювиальной россыпью (а) и геоэлектрический разрез, полученный по результатам 2-D инверсии синтетических данных (б) (Оленченко, Осипова, 2022)

1 – вода; 2 – песчано-глинистый материал пойменной фации; 3 – суглинки; 4 – фация кос и береговых отмелей (мелкий валунно-галечник с песчаным заполнителем); 5 – валунно-галечник с песчано-глинистым заполнителем; 6 – песчанник трещиноватый.

Двумерное численное моделирование показало, что метод ЭТ позволяет выделить в разрезе слои фаций плёсов и перекатов, что обосновывает целесообразность его применения при поисках аллювиальных россыпей (Оленченко, Осипова, 2022).

Для верификации результатов численного моделирования проведён **физический эксперимент на модели долины реки с палеоруслом**.

В соответствии с основами теории физического моделирования о соблюдении физического и геометрического подобия (Kuneš, 2012; Гатапова и др., 2014) собран стенд с моделью долины реки с аллювиальной россыпью и измерительная установка. За единицу масштаба съёмки принято межэлектродное расстояние a , равное 1 см (см. рис. 3.3, в).

Модель помещалась в контейнер из оргстекла. Листы пластика в основании контейнера имитировали коренные породы. Вмещающая среда смоделирована единообразным материалом – отсортированным мелкозернистым песком. Мелкий галечник (3–

5 мм) имитировал отложения русловой фации аллювия («пески») мощностью 1,5 см (рис. 3.3, а, б). Над «песками» располагался 0,5-сантиметровый слой «речников» (песчано-галечная смесь), перекрытый таким же по толщине слоем песчаных «торфов».

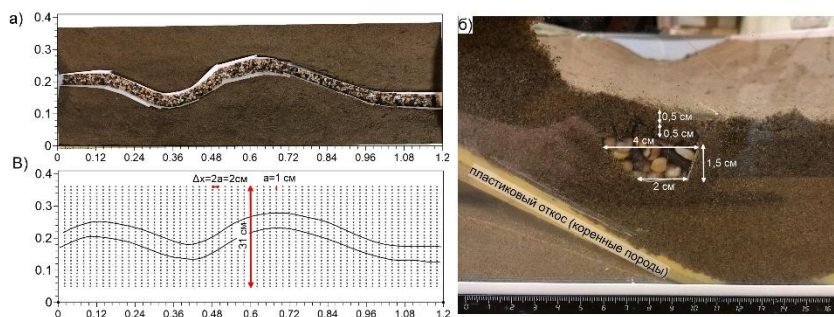


Рисунок 3.3 – Физическая модель и её параметры: а) вид сверху; б) вид в разрезе (вкост долины); в) схема сети зондирования

Результаты физического эксперимента. Геоэлектрический разрез по профилю по линии $X=0,5 \text{ м}$ (рис. 3.4, а) демонстрирует в интервале 0,11-0,155 м корытообразную зону повышенного сопротивления (150-450 Ом·м), интерпретируемую как русловая фация аллювия (палеорусло). Структура разреза осложнена высокоомными и низкоомными аномалиями, вызванными разной смачиваемостью и уплотнённостью песка. Коренные породы определяются по высокому УЭС в нижней части разреза. Глубина их залегания установлена корректно, но морфология кровли искажена вследствие появления ложных аномалий от рельефа.

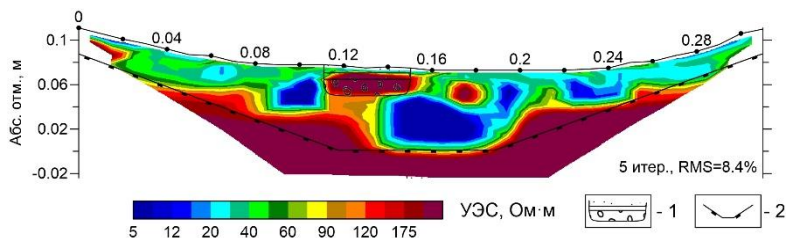


Рисунок 3.4 – Геоэлектрический разрез по линии $X=0,5 \text{ м}$ по результатам 2-D инверсии зондирования ЭТ на физической модели

1 – реальные границы палеорусла; 2 – реальное положение кровли коренных пород.

На карте распределения УЭС на уровне размещения палеоруслу (см. рис. 4.1, а) установлена вытянутая лентообразная зона с интенсивностью 100-400 Ом·м на фоне 10-70 Ом·м. Геометрические характеристики аномалии точно соответствуют палеоруслу в модели.

Физический эксперимент подтверждает результаты численного моделирования – палеорусло определяется в виде корытообразной высокоомной аномалии в разрезе и лентообразной аномалии в плане.

Опытно-методические работы проводились на эксплуатируемом месторождении ручья Кичаваям в Камчатском крае. Промышленная минерализация на территории локализуется в виде протяжённого лентообразного контура на надпойменной террасе. Четвертичный покров месторождения сформирован аллювием – среднеокатанным гравийно-галечниковым материалом с включениями песков, супесей и редких валунов.

Зондирования ЭТ проведены вдоль разведочной траншеи, заложенной поперёк горного отвода в блоке с подсчитанными запасами по категории С₁.

На фрагменте полученного геоэлектрического разреза верхняя часть до глубины 4–5 м характеризуется породами с показателями УЭС 1000-3000 Ом·м, которые представлены валунно-галечниковыми отложениями русловой фации (см. рис. 3.5, а, б). Подстилающие коренные породы, сложенные интенсивно трещиноватыми песчаниками, демонстрируют вариации УЭС от 250 до 2000 Ом·м в зависимости от степени дезинтеграции. Область пониженного УЭС до 50–200 Ом·м связана с зоной выветривания, где коренные породы разрушены до щебнистого состояния. Корытообразное углубление в кровле плотика сформировалось над зоной пониженного УЭС в коренном основании, интерпретируемой как разломная структура (рис. 3.5, в). Это согласуется с геологической характеристикой, что формирование речных долин происходило преимущественно вдоль малоамплитудных внутриблоковых разрывных нарушений (Оленченко, Осипова, 2022).

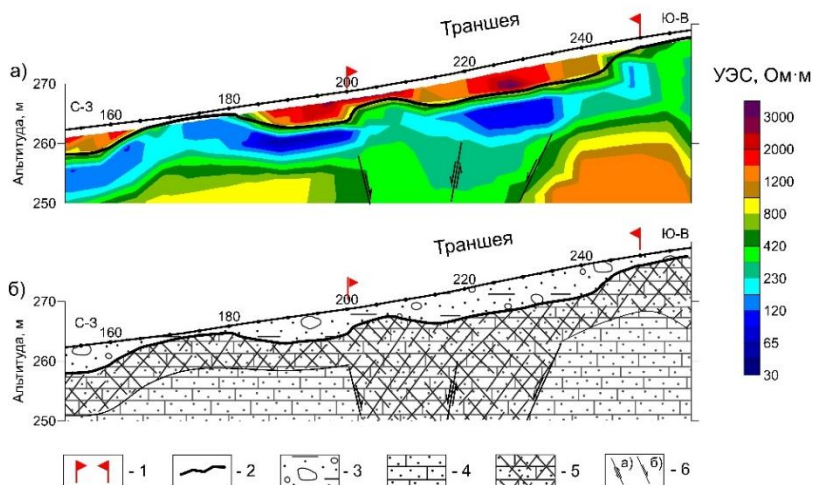


Рисунок 3.5 – Фрагмент геоэлектрического разреза вдоль разведочной траншеи в контурах горного отвода (а) и его интерпретация (Оленченко, Осипова, 2022)

1 – границы горного отвода; 2 – кровля коренных пород по данным геофизики и вскрыши; 3 – рыхлые отложения русловой фации; 4 – песчаники; 5 – трещиноватые песчаники коры выветривания и зоны разлома; 6 – разломы: а – магистральный сместитель, б – краевой сместитель.

Результаты опытно-методических исследований демонстрируют, что приповерхностные аномалии свыше 1000 Ом·м соответствуют отложениям русловой фации древних речных систем, перспективным для обнаружения золотой минерализации.

Примерами аллювиальных россыпей в условиях низкоомного плотика являются отложения реки Ануй в Алтайском крае и р. Средняя Иликта в Иркутской области.

Территория исследований на р. Средняя Иликта находится в узкой (200 м) речной долине, окружённой крутыми склонами с глыбовыми осыпями. Четвертичные отложения долины характеризуются мощностью от 2 до 5 м, что определяет мелкозалегающий характер россыпей. Продуктивный золотоносный горизонт относится к базальной части аллювиальных отложений и верхней зоне коренных пород. Плотик представлен метаморфизованными песчаниками, кварц-алевролитовыми сланцами, а его верхняя часть сложена корой выветривания с содержанием глинистой фракции 25–40 %.

На геоэлектрическом разрезе мощность рыхлых отложений русловой фации с УЭС 2600–4000 Ом·м в интервале профиля 115–140 м составляет 2,2 м, а в интервале профиля 155–180 м, где УЭС равно 3500–7000 Ом·м – около 3,0 м (рис. 3.6), что согласуется с априорной геологической информацией. При использовании шага 5 м мощность определяется завышенной в 1,5 раза.

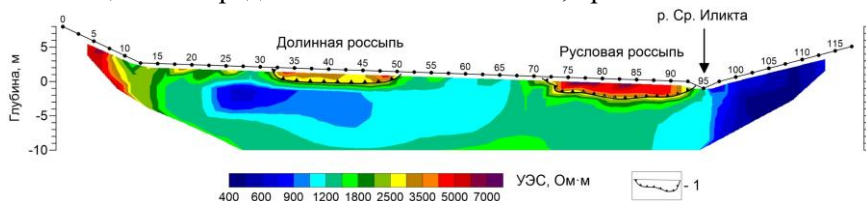


Рисунок 3.6 – Геоэлектрический разрез с элементами интерпретации в долине р. Средняя Иликта (Оленченко, Осипова, 2022)

1 – граница русловой фации аллювия.

На примерах полевых экспериментов в Алтайском крае и Прибайкалье показано, что в условиях низкоомного выветрелого или трещиноватого плотика вблизи своей кровли нижняя граница высокоомных аллювиальных отложений однозначно определяется из-за контраста УЭС.

По результатам исследований россыпей, расположенных на высокоомном плотике, сделан следующий вывод. Граница между аллювием и коренными породами устанавливается, когда аллювий представлен преимущественно пойменными отложениями – в таком случае УЭС аллювия на порядок ниже УЭС плотика. При этом внутри низкоомного слоя пойменного аллювия выделяются аномалии относительно повышенного УЭС от палеорусел.

На примере **полевых исследований в зоне распространения высокольдистых пород** показано, что по данным ЭТ невозможно установить глубину залегания поверхности плотика из-за экранирующего влияния высокоомного слоя ММП.

Полученные результаты. Анализ геологического строения аллювиальной россыпи показал, что поисковым объектом геофизических исследований являются отложения фации плёсов и перекастов.

Численное моделирование и физический эксперимент на разработанной геоэлектрической модели долины реки с

аллювиальной россыпью подтвердили эффективность метода ЭТ для выделения отложений русловой фации и определения морфологии кровли коренных пород. Установлено, что в плане эти зоны формируют протяжённые лентообразные аномалии, соответствующие палеоруслу.

Полевые исследования, проведённые в Камчатском и Алтайском крае, Иркутской области, выявили характерные признаки русловой фации аллювия – корытообразные аномалии с повышенным УЭС от 300 до первых тысяч Ом·м на геоэлектрических разрезах.

Первый защищаемый результат – отложения фации плёсов и перекатов, перспективные на золотоносность, создают высокоомные аномалии на геоэлектрических разрезах и лентообразные аномалии в плане, что даёт возможность для их поисков методом электротомографии.

4. Определение параметров оптимальной сети наблюдения для картирования палеорусла

В четвертой главе установлены оптимальные параметры измерительной сети ЭТ для картирования русловых отложений, показаны результаты полевых исследований с выбранным масштабом съёмки при разведочных работах в Камчатском крае и при поисковых работах в Иркутской области.

Сеть геофизических наблюдений оптимальна, когда с вероятностью близкой к единице определены геометрические параметры объекта исследования при наименьших затратах средств (Никитин, Хмелевской, 2004; Долгаль, 2012). Геофизические исследования при поисках и разведке россыпей выполняются в пределах долины реки, поэтому вероятность обнаружения руслового аллювия при пересечении долины профилем равна 1. Однако для восстановления формы палеорусла в плане необходимы площадные исследования. Согласно инструкции к программе 3-D инверсии (Loke, 2005) и рекомендациям для площадной съёмки (Gharibi, Bentley, 2005) для восстановления геометрии объекта расстояние между профилями не должно превышать двух–четырёхкратного расстояния между электродами. Но при такой детальности слишком велики временные и экономические затраты, поэтому требуется установить допустимый масштаб разряженной сети.

В рамках физического эксперимента на модели проведены площадные зондирования с максимальной плотностью наблюдений – межпрофильное расстояние (y) равнялось двойному межэлектродному расстоянию ($2a=2$ см) (см. рис. 3.2, в). При 3-D инверсии y разряжалось от $2a$ до $12a$, что при полевых исследованиях с шагом 5 м соответствует масштабам съёмки от 1:1000 до 1:6000.

Анализ карт разного масштаба показал, что при максимальной плотности сети на карте УЭС палеорусло чётко выделяется лентообразной высокоомной аномалией (рис. 4.1, а). При разрежении y от $4a$ до $6a$ аномалия становится фрагментарной (рис. 4.1, б, в), но при интерпретации фрагменты возможно объединить в единую структуру. При дальнейшем увеличении y от $8a$ до $12a$ объединение фрагментов затруднительно (рис. 4.1, г, д, е). Форма палеорусла прослеживается, когда интервал между профилями не превышает $6a$, что при шаге 5 м соответствует масштабу съёмки 1:3000. При поисковых геофизических работах y может быть увеличено до $10a$, что соответствует масштабу 1:5000 (Осипова и др., 2023). Разница экономических затрат на проведение ЭТ при выбранных масштабах составит 60 %.

Апробация выбранного масштаба сети наблюдений проводилась в долине реки Иликта в Прибайкалье и на россыпном месторождении золота Кичаваям в Камчатском крае.

Геофизические исследования на участке Кичаваям масштаба 1:5000 позволили подтвердить контуры известной террасовой россыпи и выявить неустановленные ранее зоны русловой фации на надпойменной террасе.

На р. Средняя Иликта проведена площадная съёмка в масштабе 1:5000. На карте изом, полученной по результатам 3-D инверсии, выделяются вытянутые аномалии высокого УЭС (рис. 4.2), маркирующие участки русловой фации. На каждом двумерном геоэлектрическом разрезе определена глубина залегания кровли коренных пород плотика и по этим данным построена карта мощности рыхлых отложений с поправкой на завышение мощности аллювия в 1,5 раза. В результате по данным ЭТ локализованы несколько участков с повышенной до 3–4 м мощностью (карманы). В контурах наиболее протяжённого кармана на местности обнаружены старые, добычные или разведочные, шурфы. По

результатам геологоразведки в выделенных аномалиях встречаются единичные знаки золота в галечниковых отложениях. Вне геофизических аномалий золото не обнаружено вовсе.

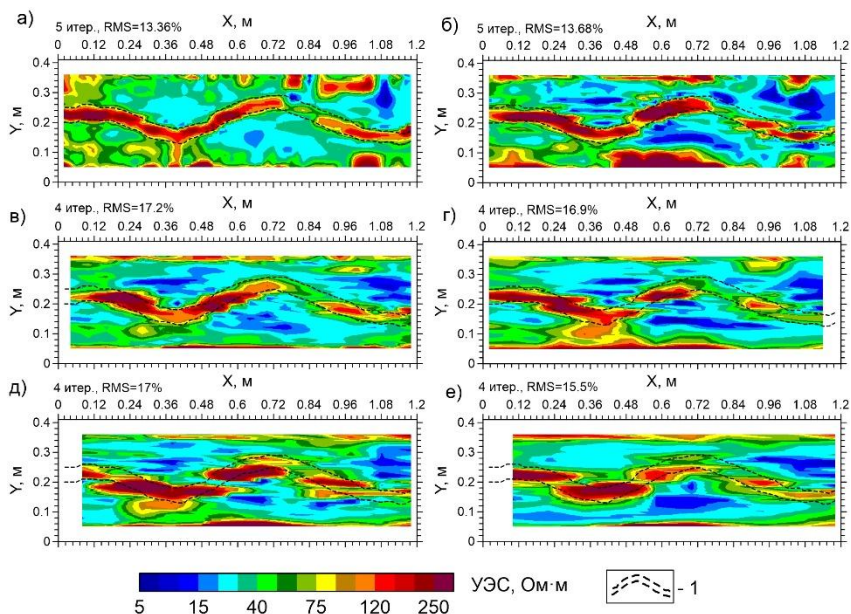


Рисунок 4.1 – Карты УЭС с интервалом между профилями: а – 2а (2 см), б – 4а (4 см), в – 6а (6 см), г – 8а (8 см), д – 10а (10 см), е – 12а (12 см).
(Осипова и др., 2023)

1 – границы палеоруслу.

Полученные результаты. Исследования, представленные в данной главе, дополняют методические рекомендации по выбору оптимального масштаба полевых исследований методом ЭТ при поисках и разведке аллювиальных россыпных месторождений золота. Комплексное применение физического и численного моделирования позволило установить оптимальные параметры измерительной сети для картирования палеоруслу. В результате сформулирован второй защищаемый результат – **оптимальными параметрами сети наблюдений для картирования отложений русловой фации аллювия на стадии поисков является масштаб съёмки не мельче 1:5000, а на стадии детальных поисков – не**

мельче 1:3000. Шаг измерений по профилю не должен превышать двойную ожидаемую мощность аллювиальных отложений.

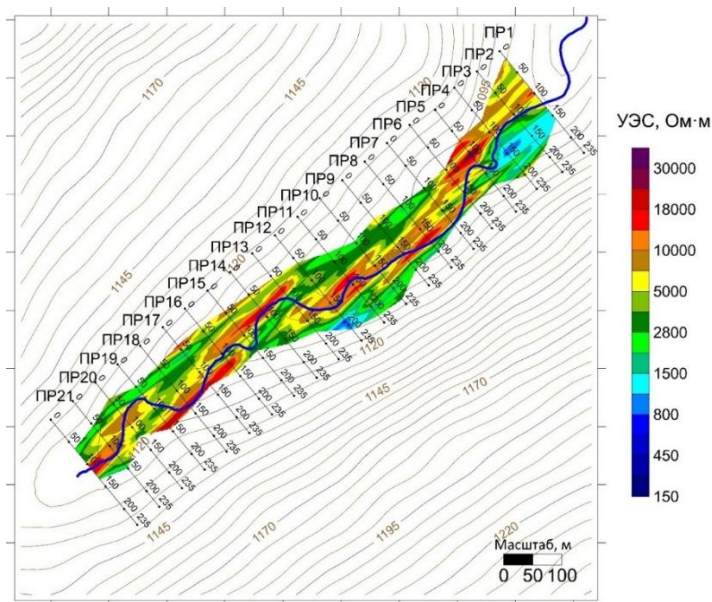


Рисунок 4.2 – Карта распределения УЭС на глубине 0–2,5 м по данным 3-D инверсии на р. Средняя Иликта (Оленченко, Осипова, 2022)

5. Критерии выделения рекультивированных полигонов в пределах отработанных россыпей и оконтуривание целиковых участков

В пятой главе описана геологическая и геоэлектрическая модель рекультивированного полигона, показано её отличие от модели целиковой россыпи, определены геоэлектрические признаки, позволяющие различать рекультивированные перемытые отложения и аллювиальные отложения в их естественном залегании (целики).

Эксплуатация месторождения гидравлическим или дражным способом сопровождается формированием гале-эфельных отвалов. В процессе рекультивации происходит их механическое выравнивание, что приводит к образованию техногенного слоя смешанного фациального состава.

Двумерное геоэлектрическое строение россыпи в естественном залегании характеризуется горизонтальной слоистой средой с высокоомным включением, имитирующим палеорусло (рис. 5.1, а). В геоэлектрической модели для рекультивированного полигона (рис. 5.1, б) верхний слой техногенного происхождения, имеющий полифациальный состав, демонстрирует однородное значение УЭС. Принципиальное отличие от целиковой россыпи – отсутствие палеорусла, что является основой для выявления отработанных россыпей методом ЭТ.

Результаты численного моделирования показали, что критерием для дифференциации целиковой россыпи и рекультивированного участка полигона отработанной россыпи по данным ЭТ является наличие аномалии с высокими значениями УЭС, связанной с палеоруслом (рис. 5.1, в), тогда как для рекультивированного полигона характерен однородный слой с равномерным значением УЭС (рис. 5.1, г).

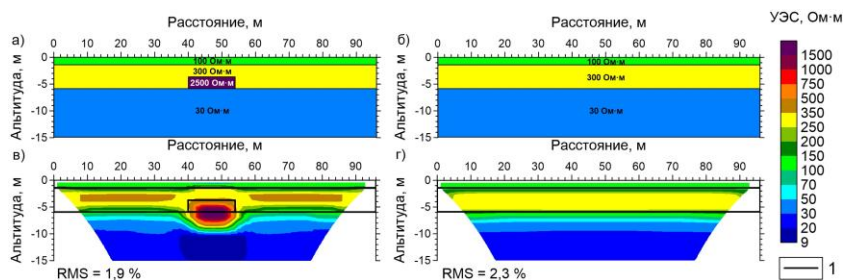


Рисунок 5.1 – Геоэлектрическая модель целиковой россыпи (а) и рекультивированного полигона (б), результат инверсии для модели целиковой россыпи (в) и рекультивированного полигона (г), (Осипова и др., 2023)

1 – граница слоя в модели.

Верификация численной модели полевым экспериментом проведена на аллювиальных россыпях регионов Сибири и Дальнего Востока.

На участке в долине реки Горхон в Забайкальском крае съёмка ЭТ выполнена в пределах известных границ рекультивированного полигона. Рыхлые отложения на участке достигают общей мощности около 5 м, где золотоносный слой занимает нижние 1,5 м.

Подстилающие породы представлены преимущественно сланцами, гнейсами и гранитами.

На геоэлектрическом разрезе по профилю через нетронутый отработкой участок (рис. 5.2), в интервале 180-300 м выявляется корытообразная аномалия УЭС 3000-15000 Ом·м – целик.

На разрезе профиля через рекультивированный полигон (рис. 5.3), в интервале 190–430 м рыхлые отложения выделяются как однородный слой с постоянной мощностью. УЭС слоя изменяется в пределах узкого диапазона от 1900 до 2300 Ом·м, что указывает на его однородность. Установленный однородный геоэлектрический слой служит критерием распознавания рекультивированного полигона отработанной россыпи.

Полученные результаты. На основании численного моделирования и полевых исследований методом ЭТ, проведённых на целиковых и отработанных аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока, определены геоэлектрические признаки, позволяющие различать рекультивированные перемытые отложения и аллювиальные отложения в их естественном залегании (целики). Численное моделирование показало, что критерием распознавания целиковой россыпи на двумерных геоэлектрических разрезах является высокоомная аномалия, связанная с палеоруслом. В свою очередь, рекультивированный полигон отработанной россыпи отличается наличием выдержанного по мощности слоя с однородным значением УЭС в верхней части разреза.

Третий защищаемый результат – критерием распознавания рекультивированного полигона отработанной россыпи является выдержанный по мощности и удельному электрическому сопротивлению слой в верхней части геоэлектрического разреза, представленный техногенными отложениями полифациального гранулометрического состава, а россыпи в естественном залегании – локальная высокоомная аномалия от палеорусла.

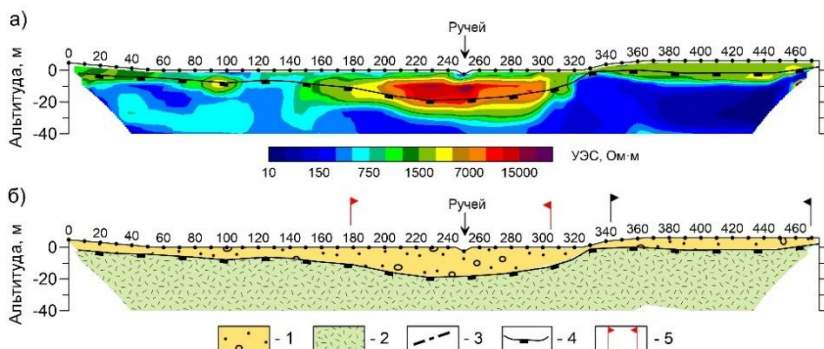


Рисунок 5.2 – Геоэлектрический разрез в долине р. Горхон через целиковую россыпь (а) и его интерпретация (б) (Осипова и др., 2023)

1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – кровля плотика; 4 – границы целиковой россыпи; 5 – границы рекультивированного полигона.

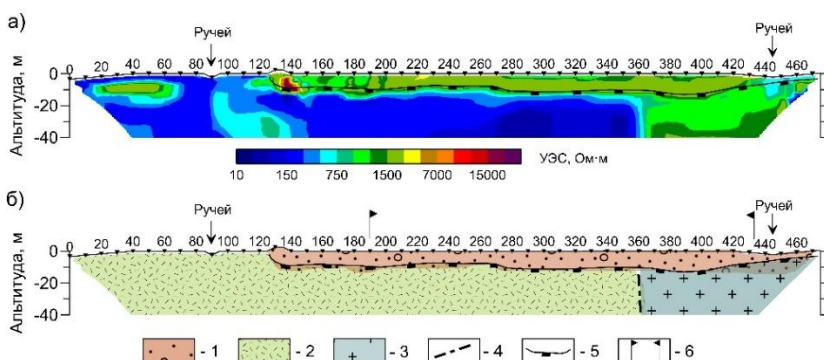


Рисунок 5.3 – Геоэлектрический разрез в долине р. Горхон через рекультивированный полигон (а) и его интерпретация (б) (Осипова и др., 2023)

1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – граниты; 4 – ось разлома; 5 – кровля плотика; 6 – границы рекультивированного полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года приоритетным направлением ГРП поисковой и последующих стадий является актуализация методического обеспечения с учётом современного уровня развития науки и технологий. Реализация этого плана невозможна без внедрения современных геофизических методов в практику ГРП.

Россыпная золотодобыча ежегодно сокращается, а оставшиеся на известных территориях россыпи характеризуются сложным строением, особенно если они уже частично отработаны. В то же время, в техногенных россыпях заключено значительное количество металла, составляющее величину порядка 10-30 %, а иногда и более, от запасов «первичной» россыпи. В силу сложности строения таких объектов для решения геологических задач необходимо применять современные методы электроразведки с разработанным математическим аппаратом двумерной и трёхмерной инверсии. Это позволит не только сократить расходы недропользователей, но и значительно повысить эффективность поисков и разведки россыпей. Отсюда вытекает цель диссертационной работы – обоснование применения метода ЭТ для поиска и разведки аллювиальных россыпей золота.

Основными результатами исследования являются разработанная геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи золота и установленные критерии интерпретации данных ЭТ для выделения как целикомых русловых отложений аллювия в разрезе и плане, так и рекультивированных полигонов на участках отработанных россыпей.

Проведённое исследование и его результаты должны стать основой для методических рекомендаций по применению метода ЭТ при поисках и разведке аллювиальных россыпей золота.

Для дальнейших исследований выделяются следующие направления. Первое заключается в усовершенствовании методики съёмки ЭТ (выбор оптимальной установки и шага для конкретного разреза), позволяющей провести литологическое расчленение отложений, что особенно важно при разведке аллювиальных россыпей сложного строения (например, с ложным плотиком или глубокозалегающих). Второе направление – это внедрение в практику исследований метода ЭТ-ВП для получения дополнительной информации об источниках россыпной золотоносности. Третье направление связано с комплексированием метода ЭТ с ГРЛ для получения более точных результатов при установлении границы между аллювием и плотиком. Необходимо оценить повышение информативности при их комплексировании и определить условия, для каких россыпных объектов будет экономически рентабельно использование обоих методов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Оленченко В. В. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото / В. В. Оленченко, П. С. Осипова // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 1. – С. 117.
2. **Осипова П. С.** Геоэлектрические признаки рекультивированных отработанных россыпных месторождений золота / П. С. Осипова, В. В. Оленченко, А. С. Калганов, А. В. Чекрыжов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 158-167.
3. **Осипова П. С.** Определение параметров оптимальной сети наблюдения для картирования палеорусла методом электротомографии на основе численного и физического моделирования / П. С. Осипова, В. В. Оленченко, А. В. Чекрыжов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 10. – С. 232-242.

Публикации в сборниках материалов конференций

4. **Осипова П. С.** Электротомография с измерением вызванной поляризации при поисках аллювиальной россыпи золота / П. С. Осипова, В. В. Оленченко // EAGE. Инженерная и рудная геофизика 2020: Тезисы докладов 16-й научно-практической конференции и выставки. (Пермь, 14-18 сентября, 2020 г.). – 2020. – С. 6.
5. **Осипова П. С.** Геофизические признаки источников россыпной золотоносности Кельбес-Золотокидатского рудно-россыпного узла / П. С. Осипова, В. В. Оленченко, В. И. Саморуков // EAGE. Инженерная и рудная геофизика 2021: Тезисы докладов 17-й научно-практической конференции и выставки. (Геленджик, 26-30 апреля, 2021 г.). – 2021. – С. 13.
6. **Осипова П. С.** Электротомография на отработанных россыпных месторождениях / П. С. Осипова, В. В. Оленченко, А. С. Калганов, А. В. Чекрыжов // EAGE. Инженерная и рудная геофизика 2022: Тезисы докладов 18-й научно-практической конференции и выставки. (Геленджик, 5-8 сентября, 2022 г.). – 2022. – С. 406-410.
7. **Осипова П. С.** Электрические зондирования отложений конуса выноса при поисках россыпного золота / П. С. Осипова, В. В. Оленченко, В. В. Кравцов // EAGE. Инженерная и рудная геофизика 2022: Тезисы докладов 19-й научно-практической конференции и выставки. (Санкт-Петербург, 15-19 мая, 2023 г.). – 2023. – С. 204-208.
8. **Осипова П. С.** Картирование меандрирующих палеорусел при поисках россыпного золота / П. С. Осипова, В. В. Оленченко // Электроразведка 2022. – 2023. – С. 14-18.

Технический редактор Т. С. Курганова

Подписано в печать 29.07.2025

Формат 60х84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,5. Тираж 90. Зак. № 242

ИНГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3