

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ ИМ. А. А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ОСИПОВА Полина Сергеевна

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

1.6.9 – Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата геолого–минералогических наук

Научный руководитель:
Оленченко Владимир Владимирович,
канд. геол.–мин. наук, доцент

НОВОСИБИРСК

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Геологическая модель аллювиальной россыпи золота	9
2. Современное состояние поисков и разведки россыпей золота геофизическими методами .	15
2.1. Выводы и постановка научных задач.....	25
3. Геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи золота.....	28
3.1. Двумерное численное моделирование данных электротомографии на модели аллювиальной россыпи	31
3.2. Трёхмерное численное моделирование данных электротомографии на объёмной модели аллювиальной россыпи.....	35
3.3. Физический эксперимент	39
3.3.1. Модель и методика зондирований.....	39
3.3.2. Оценка влияния глубины заземления электродов	44
3.3.3. Результаты физического эксперимента	46
3.4. Полевые эксперименты	49
3.4.1. Опытные-методические работы на эксплуатируемом месторождении	49
3.4.2. Аллювиальная россыпь в условиях низкоомного плотика	54
3.4.3. Аллювиальная россыпь в условиях высокоомных пород плотика	58
3.4.4. Электротомография в условиях льдистых пород.....	59
4. Определение параметров оптимальной сети наблюдения для картирования палеорусла	63
4.1. Физический эксперимент	64
4.2. Численный эксперимент.....	66
4.3. Полевой эксперимент.....	69
4.3.1. Россыпное месторождение золота Кичаваям в Пенжинском районе Камчатского края	69
4.3.2. Прибайкалье.....	73
4.4. Расчёт прогнозных ресурсов аллювиальной россыпи золота по результатам площадной съёмки электротомографии	77
5. Критерии выделения рекультивированных полигонов в пределах отработанных россыпей и оконтуривание целиковых участков	81
5.1. Определение критериев на основе численного моделирования.....	82
5.2. Верификация численной модели полевым экспериментом.....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	95
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	105

ВВЕДЕНИЕ

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

Актуальность темы исследования

В настоящее время геолого-разведочные работы 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, главная из которых определение рельефа кровли коренных пород (плотика). Основными методами для их 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 полевых данных.

Ещё одной актуальной задачей является разведка частично или полностью отработанных россыпей, которые служат объектами для повторной добычи, поскольку по ряду причин содержание в них неучтённого золота достигает промышленных масштабов. Существующие нормативные документы не позволяют переводить их в разряд техногенных месторождений из-за отсутствия научно обоснованной методологии разведки (Чернявский, 2020). В то же время для техногенных россыпей отсутствует необходимость в проведении работ поисковой стадии, а для оценочных и разведочных стадий также не существует узаконенных методик. Поскольку металл на уже отработанных участках распределён крайне закономерно, при повторной разведке на участке возникает 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).

Методы исследования и фактический материал

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

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

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 107 погонных километров.

Зондирования в рамках полевых и лабораторных исследований выполнены электроразведочной аппаратурой «Скала-48К12» и «Скала-64К15», предназначенной для работ методом сопротивлений и вызванной поляризации (ООО «КБ Электротриии»).

Первичная обработка полевых данных производилась в программе Xeris (ООО «КБ Электротриии»), поставляемой вместе с аппаратурой. Одномерная инверсия данных выполнялась в программе IPI2Win (автор Бобачёв А. А.). Для двумерной и трёхмерной инверсии 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. 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. 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 палеорула.

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 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.

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 . Справки об использовании результатов диссертационной работы представлены в Приложении А.

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 .

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.

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 (Пермь, 12–16 мая, 2020); 17-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2021 (Геленджик, 26–30 апреля, 2021); 18-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2020 (Геленджик, 5–8 сентября, 2022); 19-я научно-практическая конференция и выставка EAGE Инженерная и рудная геофизика 2023 (Санкт–Петербург, 15–19 мая, 2023); научно-практическая конференция Электроразведка–2022; научный семинар «Современные проблемы геофизики» (онлайн, Москва, 2022), научно-практическая конференция и выставка геофизического

оборудования и программного обеспечения конференция «Электроразведка–2022».

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

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

За внимание к работе, поддержку и советы благодарю канд. геол.-мин. наук Н. В. Юркевич, коллег из лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем ИНГГ СО РАН и д-ра геол.-мин. наук С.Б. Бортникову.

1. Геологическая модель аллювиальной россыпи золота

Россыпь представляет собой продукт выветривания коренного источника (рудопроявления). На месте разрушения горных пород возникают элювиальные россыпи (Рисунок 1.1). При смещении выветрелого материала коренных источников по склону формируются россыпи делювиальные; накопление обломков горных пород у подножия склонов способствует образованию пролювиальных россыпей. Далее обломочный материал и зерна полезного ископаемого попадают в водный поток. Деятельность речного потока заключается в двух геологических процессах: эрозия и аккумуляция. В начале эрозионного цикла река интенсивно врезаются в коренные породы ложа, формируя узкие и глубокие речные долины. На этой стадии транспортировка обломочного материала интенсивна, формирование грубообломочного аллювия временное. Достигая стадии зрелости, основная энергия потока реки расходуется на боковую эрозию и транспортировку материала, так как русло искривляется, а вода подмывает и обрушивает берега. В результате река течёт среди своих же наносов, перемывая и перемещая их. Осадконакопление проявляется вблизи вогнутых берегов и на участках перекатов (Рисунок 1.2). Продольный профиль долины становится более пологим. Как правило, именно на этой стадии развития реки происходит формирование аллювиальных россыпей (Билибин, 1955; Кухаренко, 1961; Баранников, 1984; Шило, 2002). В зависимости от степени разработанности долины аллювиальные россыпи делятся на три основных морфологических типа: террасовые, долинные и русловые.

Из сказанного следует, что аллювиальная россыпь – это речные отложения, образованные при определённых гидродинамических условиях переноса и преобразования водным потоком обломочного материала и содержащие промышленные концентрации рудных минералов.

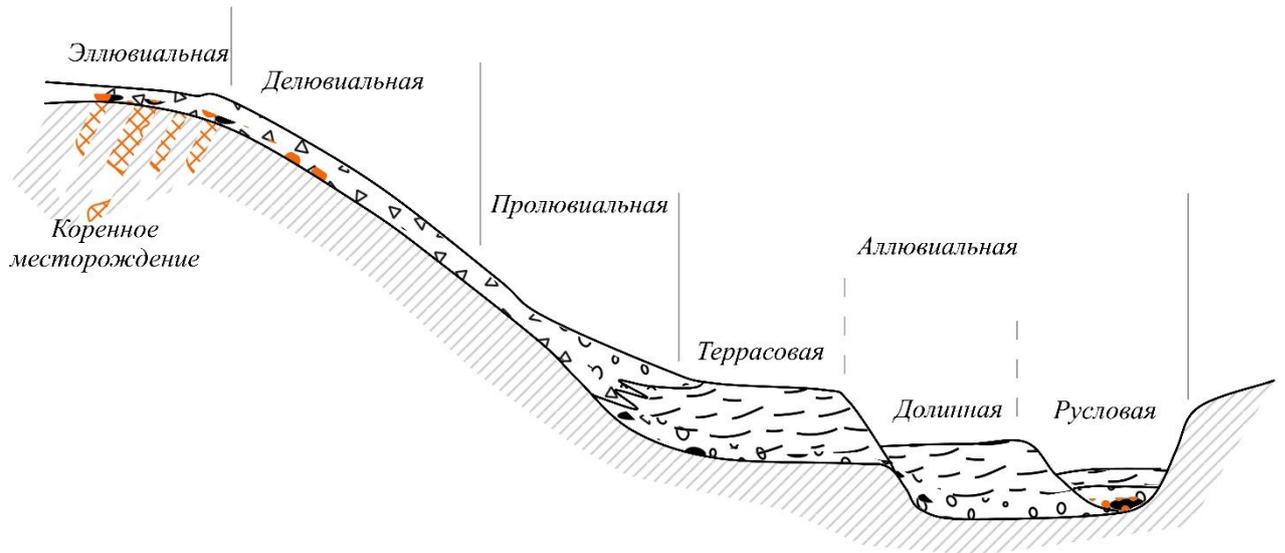
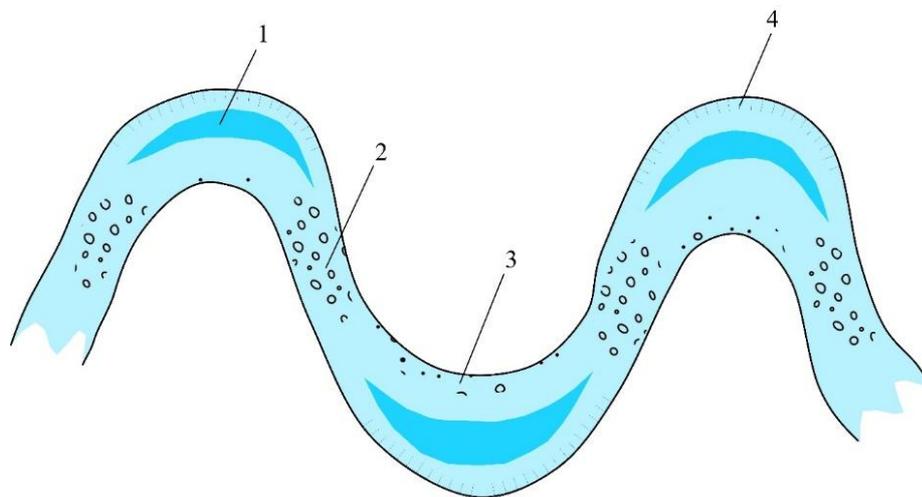


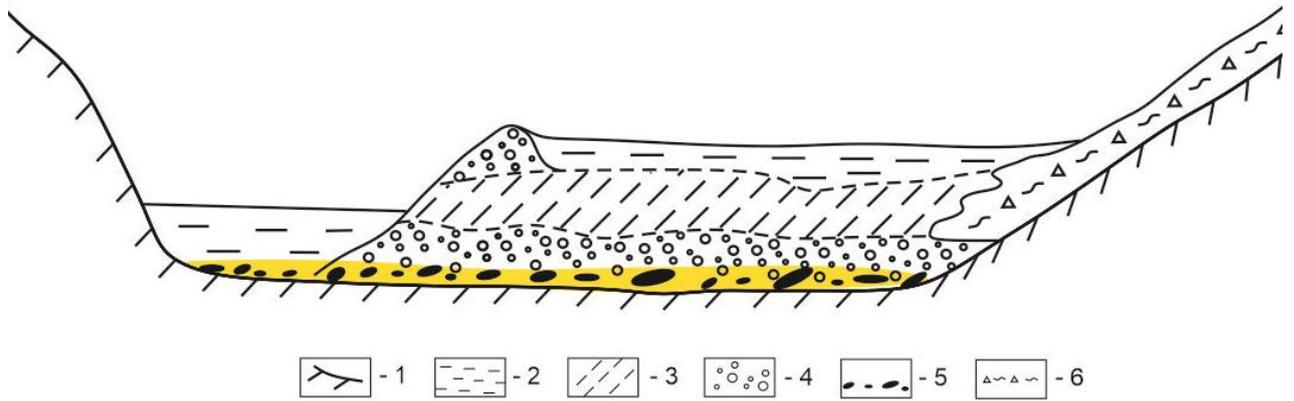
Рисунок 1.1 – Схема размещения морфологических типов россыпей



1 – плёс; 2 – пережат; 3 – прирусловая отмель; 4 – подмываемый берег

Рисунок 1.2 – Схема русла реки на стадии зрелости

Отложения хорошо разработанной речной долины разделяют по группам аллювиальных фаций: русловые – плёсы, пристержневая зона, косы, береговые отмели и пойменные – прируслового вала, приречная, внутренняя, вторичных водоёмов (Рисунок 1.3).



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

Рисунок 1.3. Распределение фаций аллювиальных отложений на продольном профиле долины реки

Типовое распределение речных аллювиальных отложений, согласно (Кухаренко, 1961; Негил, 1989) (Рисунок 1.4), указывает на то, что основная масса металла сосредоточена в отложениях плёсовой фации, состоящих из валунов и галечника (Рисунок 1.5). Виноградова и Хмелёва (2009) отмечают закономерность переноса и аккумуляции речных наносов, при которой тяжёлые фракции аллювия – валуны и галечник, а также частицы золота, откладываются на участках вихревых потоков у дна реки. Песчаный и глинистый материал служит связующим звеном, формируя аллювиальные россыпи. Осадки фации перекатов, расположенные выше, характеризуются различной степенью сортировки аллювия и представлены отложениями более мелкого валунно-галечника с неравномерным распределением металла. Выше следуют фации кос и береговых отмелей («речники»), содержащие преимущественно тонкое золото. Граница между ними и «песками» условна и определяется только результатами опробования. Русловые отложения перекрываются песчано-глинистыми образованиями пойменных фаций без значительных концентраций металла. «Пласт» залегает на коренных породах плотика, где иногда встречаются неровности («карманы», борозды, западины), представляющие интерес для поиска, так как в них происходит концентрация полезного ископаемого (Ильёнок, 1970; Шило, 2002).

Аллювиальные россыпи могут быть перекрыты, как только торфами, так и молодыми отложениями, формирование которых не связано с образованием данной россыпи (Нестеренко, 1977). Это либо породы не аллювиального генезиса, либо аллювий, принадлежащий к другим эрозионным циклам. В таком случае россыпи будут погребёнными. К ним относят террасовые россыпи, которые стали таковыми в процессе развития эрозионно-аккумулятивных процессов долины. Как правило, они находятся в отложениях погребённых речных долин или современных долин со смещённым руслом. Но даже в таких случаях, типовой разрез аллювиальной россыпи сохраняется, т.е. максимальная концентрация металла будет определяться в погребённых отложениях русловой фации – палеоруслах (Чалов, 2016).

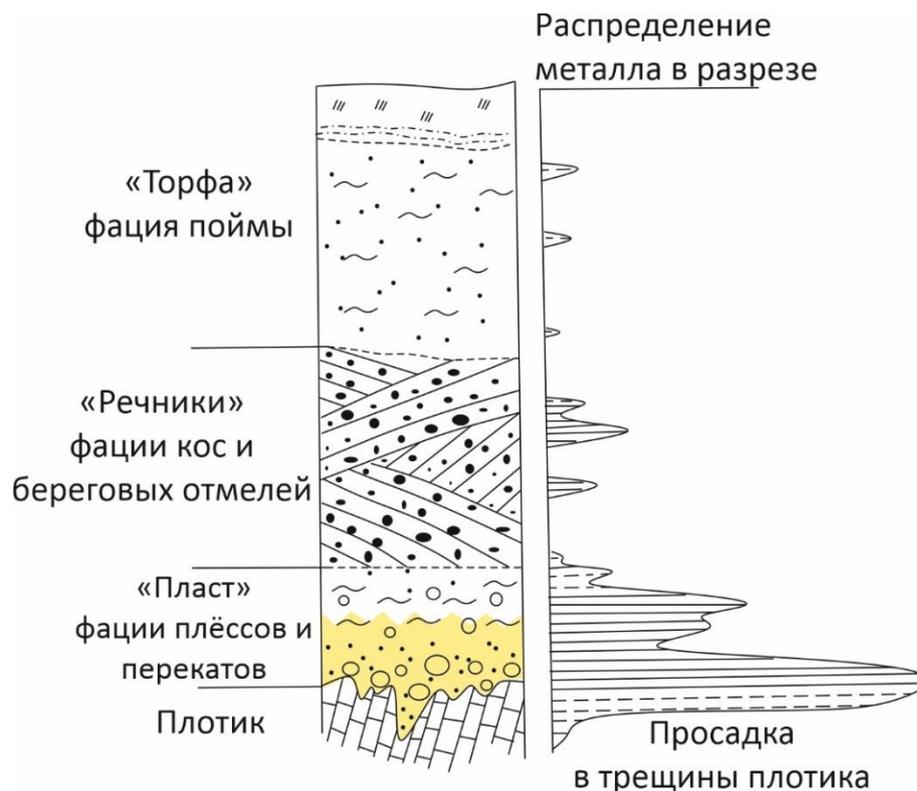


Рисунок 1.4 – Типовой разрез аллювиальной россыпи по Кухаренко, 1961

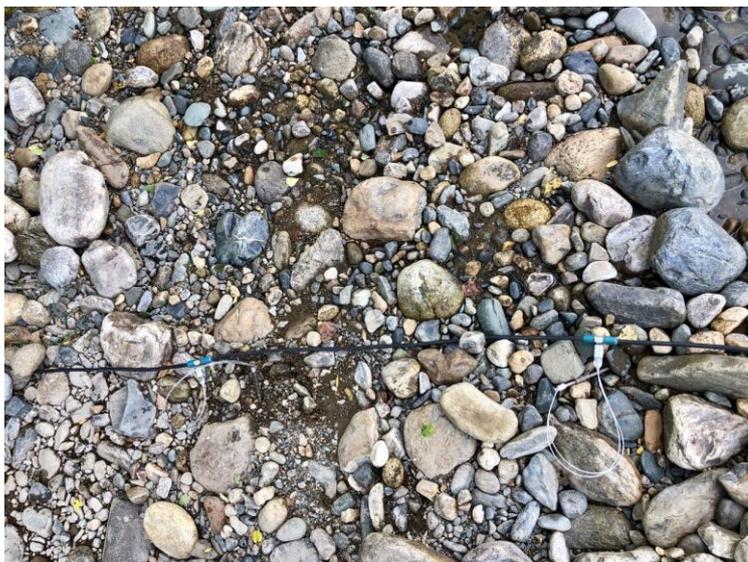


Рисунок 1.5 – Отложения фаций плёсов и перекатов в современном русле реки Иня (Алтайский край). Фото Осиповой П.С.

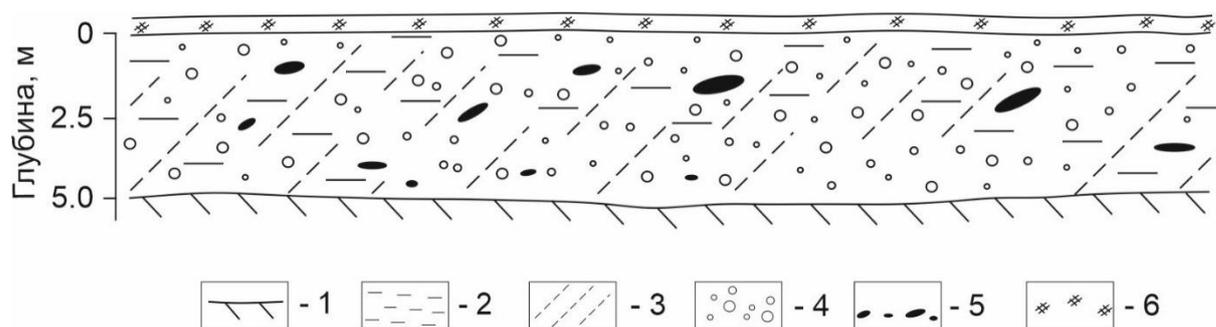
Аллювиальный процесс и связанное с ним россыпеобразование основаны на физическом взаимодействии отдельных компонентов твёрдого вещества с водой как главным членом системы. Главнейшими факторами формирования ореолов рассеивания рудного вещества в ходе аллювиального процесса являются физические, гидродинамические и литогенетические явления. Это существенно отличает аллювиальное россыпеобразование от делювиального и особенно от элювиального, где ведущими являются геохимические процессы и именно их характер определяет скорость и особенности концентрации рудных компонентов. Таким образом, все сказанное о строении аллювиальных россыпей золота верно для платины, алмазов и других минералов, близких к золоту по величине константы гипергенной устойчивости (Нестеренко, 1977; Шило, 2002).

Аллювиальные россыпи – наиболее распространённый промышленный тип месторождений золота. Для них характерно наличие чётко выраженного продуктивного пласта, находящегося чаще всего в нижней части разреза отложений русловых фаций. Главные признаки аллювия, отличающие его от других типов отложений водных потоков, это геоморфологические условия и форма залегания в виде протяжённых сравнительно узких лент в днищах

эрозионных долин, на террасах, а также в погребённых долинах (Методика..., 1992).

Таким образом, объектом геофизических исследований при поисках и разведке золотоносных аллювиальных россыпей являются структуры, сложенные отложениями русловой фации аллювия – песками, галькой, валунами.

В результате массовой отработки россыпных месторождений образуются техногенные россыпи. Среди них различают остаточные целиковые и отвальные россыпи [74]. Остаточные целиковые россыпи представляют собой бортовые, внутриконтурные и охранные целики, а также недоработанные участки. Отвальные россыпи делятся на две категории: россыпи отвалов вскрышных работ (торфовые отвалы) и россыпи гале-эфельных отвалов (Шило, 2002). В случае целиковых россыпей типичный геологический разрез сохраняется полностью или частично. Но для рекультивированных (разровнённых бульдозерами) отвальных россыпей, мной предлагается элементарная геологическая модель (Рисунок 1.6), представленная слоем техногенных отложений смешанного фациального состава, перекрытым восстановленным почвенно-растительным покровом (Осипова и др., 2023).



1 – коренные породы; 2 – пойменная фация; 3 – фация кос и береговых отмелей; 4 – фация перекатов; 5 – фация плёсов; 6 – восстановленный почвенно–растительный покров

Рисунок 1.6 – Геологическая модель рекультивированного полигона (Осипова и др., 2023)

2. Современное состояние поисков и разведки россыпей золота геофизическими методами

Методика разведки месторождений золота и платиноидов (Методика..., 1992) предусматривает использование геофизических методов для рационального бурения и оптимального размещения скважин. Поисковые площади располагаются в границах ранее выделенных при региональном геологическом изучении перспективных зонах. Геофизические методы на этапе поиска используются для изучения геологического строения золотоносных территорий, покрытых чехлом осадочных отложений, и локализации перспективных участков для постановки детальных геофизических и буровых работ. На площадях, где уже ведутся геологические поисковые и разведочные работы, геофизические исследования выполняются для решения следующих задач:

1. Определение мощности рыхлых отложений для расчёта объёмов горных работ и выбора способа и технологии проходки выработок;
2. Изучение характера рельефа коренных пород;
3. Выявление островной мерзлоты, таликовых зон для более рационального размещения и проходки горных выработок.

Основным методом для решения поставленных задач предлагается электроразведка на постоянном токе методом ВЭЗ и ЭП, также возможно применение сейсморазведки на преломлённых волнах и высокочастотной гравиразведки.

Важно отметить, что геофизические методы не являются прямыми методами поисков золотоносных россыпей, а только позволяют установить структуру речной долины и литологию отложений. То есть определение наличие или отсутствие, а тем более содержания металла в россыпях геофизическими методами невозможно. Оно устанавливается только по данным опробования.

В мировой практике существует успешный опыт применения электрических и электромагнитных методов для расчленения разреза аллювиальных отложений как с целью выявления золотоносного пласта и определения границ палеорусел в плане, так и для изучения литологии отложений долины реки.

Исследование погребённой золотоносной россыпи в долине реки Вача в Ленском районе методом ВЭЗ в комплексе с зондированиями методом переходных процессов (ЗМПП) показано в работе (Кожевников, Никифоров, 1997). Использование ЗМПП потребовалось для уточнения геологического разреза, в котором присутствовали электрические экраны, вызванные наличием многолетнемерзлых пород (ММП) и талого экрана под ними. Действительно, анализ данных метода ВЭЗ и бурения показал, что на распределение постоянного тока существенно влияют многолетнемерзлые неконсолидированные породы в бортах долины. На этих участках граница кровли коренного основания определяется глубже в среднем в 1,3–1,5 раза, чем по данным бурения (т. е. эффективный коэффициент анизотропии равен 1,3–1,5). В результате исследования мощность рыхлых отложений и кровля коренных пород была определена только при совместной интерпретации данных ВЭЗ, ЗМПП и бурения.

Хотя применение метода ВЭЗ регламентировано, однако существующие ограничения метода не позволяют считать его универсальным. В идеальном случае геологический разрез долины реки является двумерным, а наличие «карманов» и других трёхмерных геологических структур делает его изменяющимся по трём направлениям. Кривые ВЭЗ трудно или совсем не поддаются уверенной количественной интерпретации вследствие искажений как от приповерхностных неоднородностей, так и от влияния трёхмерных неоднородностей (зон ММП, вертикальных и наклонных границ раздела) (Хмелевской, Шевнин, 1992; Электроразведка, 2013). В то же время метод ЭТ даёт возможность получать информацию на качественно новом уровне – не в виде кривых кажущегося сопротивления и разрезов изоом, а в виде двумерных и трёхмерных геоэлектрических моделей среды (Loke, Barker, 1996a, b; Loke, 2001, Бобачев, 2013).

Один из ранних примеров выделения аллювиальных отложений на геоэлектрическом разрезе по данным ЭТ показан ещё в 1996 г. (Ekström et al., 1996), хотя в более проработанном виде результаты представлены в работе (Owen, Dahlin, 2005). В этих исследованиях аллювиальные отложения являлись

поисковым объектом как коллектор грунтовых вод. Метод ЭТ оценён положительно для выделения структур, сложенных высокоомными аллювиальными отложениями русловой фации. Выявлена сложность с проведением нижней границы аллювия в случае, когда коренные породы и аллювий имеют близкое УЭС.

Опыт использования ЭТ на россыпных месторождениях представлен в ряде публикаций российских авторов. В исследованиях (Давыдов, Бакаев, 2012; Белохвостик и др., 2018) изучались россыпи ложкового, террасового и техногенного типов с использованием методов ВЭЗ, дистанционного индукционного зондирования, дипольного электромагнитного профилирования, радиокомпарации и пеленгации, естественного поля, переменного естественного электрического поля, магниторазведкой, сейсморазведкой и радиометрией. Авторы пришли к выводу, что «для изучения россыпей геофизическими методами наиболее оптимальным будет сочетание электроразведки на постоянном и переменном токе с малоглубинной сейсморазведкой. При ассоциации золота с магнетитом в качестве дополнительного метода можно использовать магниторазведку» (Давыдов, Бакаев, 2012). Действительно, например в работе (Foss et al., 2015) применение аэромагнитной съёмки высокого разрешения направлено на картирование распределения магнитных минералов в аллювиальном покрове. Установлено, что магниторазведка может применяться при поисках и разведке аллювиальных россыпей для выявления крупных особенностей геологического строения исследуемого участка, а также как метод прямых поисков, когда золото ассоциировано с заметным количеством магнетита. Но в публикации (Eberle et al., 2017) аэромагниторазведка оказалась недостаточно чувствительна для выделения аллювиального слоя во вмещающих породах, который удалось зафиксировать по результатам ЭТ в долине реки с выявленным золотоносным аллювием.

«Электротомография в профильном варианте по нерегулярной сети применена для изучения геологического строения россыпи участка ручья Болотистого на золоторудном месторождении в Хабаровском крае

(Rasskazov et al., 2017). По данным ЭТ определены мощность и литологический состав отложений аллювия, глубина залегания коренных пород. В результате исследований выявлен слой, представленный глинисто–цементированными обломками пород, которые в данной геологической ситуации являются перспективным на золотоносность» (Оленченко, Осипова, 2022).

«Возможности метода электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ–ВП) продемонстрированы при поисках россыпей золота в Восточных Саянах (Пустозеров, Тригубович, 2017). Модифицированный метод позволил не только локализовать аллювиальные отложения, но и установить по аномалиям поляризуемости присутствие зон золотосульфидной минерализации, которые в свою очередь являются источниками россыпной золотоносности. Важно, что авторами отмечена необходимость создания физико-геологических моделей россыпей, характерных как для изучаемых территорий, так и для аллювиальных россыпей в целом» (Оленченко, Осипова, 2022).

Электротомография для поисков и разведки палеорусел, заполненных золотоносными отложениями, успешно применяется и за рубежом, в том числе геофизическими компаниями (Kim et al., 2009; Swaim, Kamloops, 2013). В работе (Mohamed-Ali, Ibrahim, 2019) показан пример успешного использования ЭТ на юго–востоке Судана на участках пересохших русел. Авторам удалось описать долинные структуры и определить мощность золотоносных отложений. Исследования включали в себя бурение и отбор проб на содержание металла, что позволило оценить ресурсы россыпи.

Часто встречаются исследования аллювиальных отложений, направленные не на поиск и разведку полезных ископаемых в отложениях долин, а на изучение литологического разреза четвертичных отложений. Поскольку структура аллювиальных отложений как в разрезе, так и в плане, сохраняется независимо от содержания в них золота, рассмотрение этих работ целесообразно.

Работа (Yene Atangana et al., 2023) выполнена с целью дифференциации аллювиальных отложений для дальнейшей добычи песчано-гравийной смеси (ПГС). Авторы использовали методы ВЭЗ и ЭТ, а также бурение для определения

литологии участка. Результаты электрических методов использованы для корреляции данных между скважинами и построения объёмной геологической модели участка. При интерпретации данных ВЭЗ в программе одномерной инверсии мощность слоя фиксировалась в соответствии с известными данными. Полученные колонки УЭС для каждой точки ВЭЗ соединялись в двумерный разрез. Для ЭТ фиксация границ при инверсии не выполнялась, однако при интерпретации полученных разрезов мощности слоёв и их состав определялись, опираясь на имеющиеся на профилях буровые колонки. В этом исследовании и в работе (Tokouet et al., 2022), выполненной на этой же территории, сделан упор на изучение образцов отложений (содержание глинистых и илистых частиц, кварца, размер зёрен, водонасыщенность) и зависимость УЭС от этих факторов. В целом, сделаны выводы, согласующиеся с общепринятыми, о корреляции УЭС с размером зёрен, содержанием воды и минералогией. Наиболее значительные изменения удельного сопротивления были обнаружены для фракций глины и песка, где изменение размера зёрен вызывало уменьшение и увеличение удельного сопротивления соответственно. Определено УЭС 40–100 Ом·м для песчаных и алевроитовых глин, 60–500 Ом·м для глинистых песков и 500–1000 Ом·м для песчано-гравийной смеси. Сделан вывод о хорошей корреляции не только между УЭС, получаемым по данным ВЭЗ и ЭТ, и составом отложений, но и между мощностью, определенной геоэлектрическим методом, и фактической мощностью. Результаты исследований показывают, что сочетание геоэлектрических методов и бурения позволяет оценить объёмы залежей ПГС.

В исследованиях (Gonzales et al., 2016; Ahmad et al., 2020) изучение строения отложений в долинах рек проведено для понимания гидрогеологических характеристик водоносного горизонта подземных вод, представленного аллювием. В обеих работах авторами представлены результаты, полученные методом ЭТ–ВП, которые позволили определить положение слоя галечников по высоким значениям УЭС (200–1000 Ом·м) и слоя глин по повышенным значениям заряжаемости. ЭТ применялась в профильном варианте и при обработке данных использовалась двумерная инверсия. Однако несмотря на предполагаемую двумерность

геологического разреза для отложений долины, авторы полагают, что применение трёхмерного подхода позволяет определять рельеф плотика, особенно на интервалах между профилями, более точно.

Действительно, как в российских, так и зарубежных работах, для объекта предполагается двумерный разрез среды, поэтому инверсия проводится в одномерном варианте для ВЭЗ или двумерном для ЭТ. Это также объясняется отсутствием регулярной сети наблюдений, что необходимо для выполнения 3-D инверсии. Однако вероятное присутствие трёхмерных объектов (карманы, ММП, зоны трещиноватости) на протяжении долины реки, которые являются важными для разработки россыпи, требует выполнения трёхмерной инверсии, особенно на стадии детальной разведки.

В исследовании (Chambers et al., 2012) применялась 3-D инверсия данных ЭТ, полученных на серии параллельных профилей. Для заверки модели, полученной по результатам интерпретации, выполнено детальное бурение. Определено, что в сложной геологической обстановке пространственная информация, предоставляемая ЭТ, важна для определения структуры поверхности коренной породы из-за сильноизменчивой мощности рыхлых отложений. В данной работе глубина залегания плотика, определенная по данным ЭТ и бурения, отличается лишь на несколько сантиметров. Однако для правильной интерпретации и подтверждения геофизических данных всегда будут необходимы бурение и отбор проб, будь то минералогическая оценка и датировка для геологических, геоморфологических или археологических исследований; гидрогеологические испытания для оценки ресурсов подземных вод; или определение гранулометрического состава при разведке полезных ископаемых. Это связано с тем, что хотя ЭТ позволяет определять контрастную границу между аллювием и плотиком, внутреннюю слоистость между речниками и пластом установить затруднительно. Совместное использование ЭТ и скважин сокращает количество необходимых скважин, помогает в их более эффективном расположении, что повышает рентабельность работ в целом.

Применение комплекса геофизических методов позволяет улучшить результаты интерпретации данных. Наиболее часто встречается комплекс, состоящий из метода электротомографии и георадиолокации (ГРЛ). Оба метода позволяют определить литологический состав отложений: ЭТ по значениям УЭС, ГРЛ по виду сигнала (Hickin et al., 2009). Электротомография даёт точные пространственные границы (в плане), но в вертикальном направлении определить границу с точностью до первых сантиметров удаётся редко. ГРЛ же позволяет с высокой достоверностью определять границу между контрастными по электрическим свойствам рыхлыми и коренными породами. Однако, для метода существует такое ограничение, как затухание сигнала в присутствии низкоомных отложений, к которым относятся торфа (пойменная фация) в разрезе аллювия.

В диссертационной работе (Nimnate, 2017) выполнялся анализ геоморфологических изменений древней системы реки Мун (Таиланд) после строительства плотины. Геоморфологические параметры (извилистость, ширина, радиус кривизны русла) реки анализировались по сериям аэрофотоснимков и спутниковых снимков. В работе охарактеризованы осадочные фации по данным геологических и геофизических исследований. Литология русловых отложений и геометрия палеорусел определена по данным ГРЛ и ЭТ, результаты интерпретации которых подтверждены бурением. В этой работе, а также в статьях (Nimnate et al., 2017a; Nimnate et al., 2017b), интерпретация данных георадарных исследований основывается на существующей классификации отражений (классификации «радиолокационных фаций») (Hickin et al., 2009; Veres, Naeni, 1991). По результатам работ определено, что геометрия палеорусла и литологические различия хорошо обнаруживаются по данным ЭТ, однако метод ГРЛ даёт информацию о внутренней структуре различных фаций (например, распределение глинистости и влажности, слоистость внутри горизонта).

При разведке аллювиальных россыпей метод георадиолокации предлагается для оценки мощности рыхлых отложений и определения морфологии рельефа плотика (Francke, 2012). Как и в методе ЭТ, измерения на параллельных профилях позволяют создать трёхмерную модель и проследить палеорусло как в

вертикальном, так и в горизонтальном направлении. В статье оговаривается, что для применения ГРЛ требуется отсутствие мощной глинистой вскрыши и хороший контакт антенны с поверхностью земли.

Георадиолокационные зондирования успешно применялись при поисковых и разведочных работах в зонах распространения многолетнемерзлых пород (Соколов и др., 2017; Федорова, Саввин, 2017; Федорова, Куляндин, 2018;). Данные ГРЛ позволили определить контуры отработки дражного котлована для оценки объёмов техногенных образований. В работе (Ryan et al., 2021) также представлено успешное применение комплекса георадара и ЭТ при картировании палеорусел.

Поскольку метод георадиолокации широко применяется при изучении аллювиальных россыпей, стоит провести некоторое сравнение информации, получаемой по данным ЭТ и ГРЛ. Данные ЭТ о пространственных границах аллювиальных отложений в плане сопоставимы с данными ГРЛ. Преимущество ЭТ в сравнении с ГРЛ заключается в возможности определения литологии разреза на качественном уровне – выделения границ русловой валунно-галечниковой фации по значениям УЭС, что практически невозможно установить, зная лишь границы слоёв, выделенные по данным ГРЛ. Данные георадара дают точную информацию о геометрии слоёв, но не о размере зёрен отложений. В то же время ЭТ может давать некоторую погрешность при определении глубины границ между торфами и песками, аллювием и плотиком. Георадиолокация, напротив, обеспечивает высокую точность в определении вертикальных границ между контрастными по электрическим свойствам породами и позволяет детально изучать внутреннюю структуру различных фаций, включая распределение глинистости, влажности и слоистость внутри горизонтов. Однако существенным ограничением метода ГРЛ является затухание сигнала в присутствии низкоомных отложений, характерных для пойменной фации, что часто встречается в верхней части разреза долины. Этот фактор делает применение метода ГРЛ при поисках и разведке аллювиальных россыпей золота неэффективным.

Сейсмические исследования на россыпных месторождениях действительно решают поставленные задачи (Гайдай, Хасанов, 2019). Однако сейсморазведка является более трудозатратным методом по сравнению с ЭТ, причём как в полевых условиях, так и в дальнейшей обработке и интерпретации данных. Кроме того, более сложное решение обратной задачи может приводить к неверному определению литологии отложений.

Помимо методов электроразведки на постоянном токе при поисках и разведке россыпных месторождений используют электромагнитные поля. Индуктивная импульсная электроразведка методом переходных процессов в площадном варианте по утверждению авторов (Коротков, 2016) позволила детально расчленивать разрез аллювиальных неконсолидированных отложений, выделить древние русловые врезы и локализовать участки отложений, потенциально содержащих драгметаллы. Интересным в данной работе являются проводящие области, выделенные в нижней части высокоомных аллювиальных отложений. Основываясь на данных по скважинам, состав аллювия равномерный и магнитные минералы практически отсутствуют, поэтому авторы считают, что проводящие аномалии связаны с повышенным содержанием металла, что на мой взгляд маловероятно. Согласно интерпретации геоэлектрических разрезов, коренные породы представлены известняками, в которых авторы отмечают наличие проводящих зон трещиноватости. На мой взгляд выявленные низкоомные зоны в нижней части «песков» также представлены сильнотрещиноватыми известняками.

В рассмотренных выше публикациях исследуются целиковые аллювиальные россыпи, т. е. находящиеся в естественном залегании. Однако существуют и техногенные россыпи. К ним относятся как перемытые рыхлые отложения, в которых сохраняются остаточные содержания золота, так и остаточные целиковые части месторождения, частично или полностью погребённые под отвалами предшествующих отработок, состоящие из бортовых, внутриконтурных, недоработанных участков первичной россыпи и охранных целиков (Методические рекомендации..., 2007).

«Проблема обнаружения погребённых отработанных россыпей на лицензионных участках возникает, когда недропользователи, приступая к разработке месторождения, вскрывают уже перемытые рыхлые отложения, оставшиеся после хищнических отработок или неучтённой добычи прошлых лет. На некоторых россыпных месторождениях история золотодобычи насчитывает десятки лет, и часто информация о схемах отработки не сохраняется. Если отвалы вскрышных пород и гале-эфельные отвалы не были рекультивированы, определение границ отработанной россыпи не требуется. В случае же проведённой рекультивации при повторной отработке остро встаёт проблема определения границ перемытых отложений и целиков под выровненными отвалами» (Осипова и др., 2022).

В связи с истощением запасов россыпных месторождений и развитием технологий добычи техногенные россыпи становятся привлекательными для повторного освоения. «В техногенных россыпях золота может быть заключено, по различным оценкам, до 30 % и более от запасов первичной золотоносной россыпи» (Методические рекомендации, 2007.).

В публикации (Чернявский, 2020) сказано, что в (Методика, 1992) опыт разведки частично отработанных россыпей недостаточно обобщён, и рекомендации о параметрах разведочной сети носят предварительный характер. С тех пор никаких новых методологических работ не проводилось, а богатая палитра возможных техногенных россыпей (от «частично отработанных» до «полностью перемытых» гале-эфельных отвалов, перемешанных с торфами вскрыши) свидетельствуют о нереальности разработки единой методики их разведки и оценки.

В научных исследованиях и практических материалах отсутствуют работы, рассматривающие применение геофизических методов для обнаружения отработанных россыпей и рекультивированных полигонов среди целиков. По всей видимости, данная проблема традиционно рассматривалась как труднорешаемая по двум основным причинам: недостаточная проработка методологической базы и отсутствие определённых критериев идентификации подобных объектов.

2.1. Выводы и постановка научных задач

В результате анализа методических рекомендаций по поискам и разведке россыпных месторождений золота установлено, что использование геофизических методов регламентировано для получения информации о геологическом строении участка исследований, определения структур, содержащих металлы и рационального размещения бурения.

Из анализа российских и зарубежных публикаций следует вывод, что геофизические методы в настоящее время применяются для поисков и разведки целиковых аллювиальных россыпей, однако это единичные работы, основанные лишь на общих представлениях о строении россыпей и известных зависимостях физических и литологических свойств аллювиальных отложений. Наиболее распространёнными и эффективными методами являются электротомография и георадиолокационные зондирования, но до сих пор не конкретизирована геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи и не определены критерии интерпретации данных электроразведки 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.**

Несмотря на постепенное внедрение метода электротомографии в практику поисков и разведки россыпей золота, возможности метода остаются не до конца раскрытыми. В соответствии с «Методическими рекомендациями по геофизическому опробованию при подсчёте запасов месторождений металлов и нерудного сырья», утверждёнными распоряжением МПР России №37 от 05.06.2007, результаты геофизических исследований и опробования горных выработок должны быть использованы для оценки ресурсов P_1 и подсчёта запасов категории C_2 . Однако в практике поисков и разведки россыпного золота такой подход не используется, а количество полезного ископаемого определяется только по результатам опробования. Для экономических расчётов необходимо оконтуривание россыпи в плане и на глубину, что требует выполнения площадных зондирований. В большинстве же случаев геофизическая съёмка ограничивается

отдельными профилями, а интерпретация – анализом двумерных моделей. В настоящее время площадные исследования методом ЭТ, по результатам которых возможно построение объёмной геоэлектрической модели отложений долины реки, встречаются лишь в единичных работах, по результатам которых не сделаны выводы о возможностях метода для решения как геологических, так и экономических задач на россыпях. 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.**

Важное значение имеет создание научно обоснованной методики разведки отработанных россыпей геофизическими методами. Поскольку неизвестно, какие отличия существуют между геоэлектрическими моделями целиковой и отработанной россыпи, а также рекультивированного после окончания добычи полигона 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 (Рисунок 2.1). Объем зондирований методом ЭТ составил 107 погонных км.

3. Геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи золота

Научная задача 1 – разработать геоэлектрическую модель аллювиальной россыпи на основе анализа строения речных долин и фациального состава отложений и определить критерии выделения палеорула.

Из анализа геологического строения аллювиальных отложений сделан вывод (см. Глава 1), что поисковым объектом геофизических исследований являются отложения золотоносной фации плёсов и перекатов, представленной песками, галькой и валунами. Для понимания того, как аллювиальные отложения отображаются на данных электротомографии, необходимо разработать геоэлектрическую модель аллювиальной россыпи и решить прямую задачу ЭТ. По результатам её решения, а также рассмотрения материалов физического и полевого экспериментов, определить критерии выделения россыпи в электрических полях. Материалы данной главы частично опубликованы в (Оленченко, Осипова, 2022).

Для разработки геоэлектрической модели аллювиальной россыпи за основу взята геологическая модель по Кухаренко (Кухаренко, 1961).

В продольном профиле долины реки мощность аллювия обычно несколько возрастает вниз по течению и от притоков к более многоводной основной реке. На распределение наносов по длине заметное влияние оказывает твёрдость подстилающих пород. Их мощность будет минимальной в верхнем конце крутого участка, сложенного твёрдыми породами, вниз по течению она постепенно возрастает. На пологих участках, сложенных мягкими породами, мощность больше, чем на крутых (Карташов, 1971). Ю. А. Билибин считал (Билибин, 1955), что нормальная мощность аллювия для золотоносных россыпей колеблется от 4 м до 8 м. И. П. Карташов расширяет диапазон от 3 м до 12 м (Карташов, 1971). В случаях погребённых россыпей мощность долинного аллювия рек горных районов достигает нескольких десятков и даже ста метров. Накопление таких мощных толщ часто связано с относительным тектоническим опусканием данного участка.

Различие дисперсного состава отложений разных фаций отражается на их УЭС. В условиях обводнённых отложений речной долины УЭС пород зависит от их гранулометрического состава, а не от влажности. Поскольку минерализация

подземных вод в пределах долины остаётся стабильной или изменяется минимально, её влияние на УЭС отложений можно не учитывать. Такая зависимость УЭС от гранулометрического состава объясняется законом Арчи, который для полностью водонасыщенных сред имеет вид (Oh et al., 2014):

$$\rho_r = a \cdot \rho_f \cdot n^{-m}, \quad (3.1)$$

где ρ_r – УЭС породы; a – коэффициент извилистости пор (близок к 1); ρ_f – УЭС жидкости; n – пористость; m – коэффициент цементации. Коэффициент извилистости пор a для рыхлых нецементированных пород близок к 1. Коэффициент цементации m связан с количеством и геометрией пор (Abousrafa et al., 2009). Для чистых песков его значения изменяются от 1,3 до 1,6. Так, при постоянном УЭС поровой воды ρ_f УЭС рыхлых пород ρ_r зависит от их пористости, которая определяется гранулометрическим составом.

Основываясь на опыте полевых исследований, определены электрические свойства аллювиальных отложений и коренных пород на участках распространения россыпей Сибири и Дальнего Востока (Таблица 3.1), которые не противоречат известным зависимостям УЭС от состава пород (Вахромеев и др., 1997; Resistivity characteristics, 1987).

«Среди аллювиальных отложений наибольшее удельное электрическое сопротивление (УЭС) характерно для скоплений валунов и гальки. С уменьшением размеров частиц в отложениях происходит снижение их УЭС. В последовательности песок–супесь–суглинок–глина значения УЭС снижаются на порядок, варьируясь от нескольких сотен до 7–10 Ом·м (Ward, 1988; Вахромеев и др., 1997; Field geophysics, 2003). Максимальные значения УЭС (первые тысячи Ом·м) характерны для хорошо промытых валунно-галечниковых отложений. Присутствие песчаного и суглинистого материала снижает УЭС валунно-галечниковых отложений, однако оно сохраняется высоким относительно УЭС пород других фаций. УЭС песков фации кос и береговых отмелей изменяется

в пределах первых сотен Ом·м и зависит от крупности песка и примеси илистых частиц. Минимальные значения УЭС (десятки Ом·м) свойственны пойменной фации из-за высокого содержания глинистых частиц» (Осипова и др., 2023).

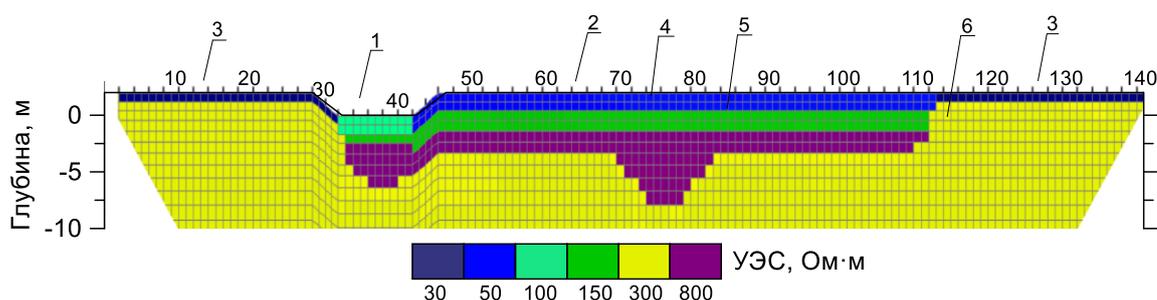
«Электрические характеристики коренных пород (плотика) обусловлены их составом, наличием трещин и степенью выветривания. УЭС пород карбонатного, магматического и метаморфического происхождения варьируется от нескольких сотен до нескольких тысяч Ом·м, иногда достигая десятков тысяч Ом·м. Плотик, представленный аргиллитами и глинистыми сланцами, особенно пиритсодержащими черносланцевыми формациями, характеризуется низким и крайне низким УЭС (единицы – десятки Ом·м). В зоне выветривания коренных пород и области экзогенных трещин УЭС находится в пределах десятков Ом·м» (Осипова и др., 2023).

«В криолитозоне показатели УЭС аллювиальных отложений увеличиваются в десятки-сотни раз. Мёрзлые отложения плёсов и перекаатов демонстрируют УЭС от нескольких тысяч до десятков тысяч Ом·м» (Осипова и др., 2023).

«Разработанная геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи (Рисунок 3.1) 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. В интервале 70–84 м в плотике смоделирован «карман» – локальное углубление, заполненное валунно-галечниковыми отложениями» (Оленченко, Осипова, 2022) мощностью 3 м.

Таблица 3.1 – Электрические свойства талых пород в пределах аллювиальных россыпей золота Сибири и Дальнего Востока по данным проведённых полевых исследований

Состав пород		УЭС, Ом·м
Аллювий		
Пойменная фация	Супеси, суглинки	18–60
Фация кос и береговых отмелей	Песок мелкозернистый	60–100
Фация плёсов и перекатов	Валунно–галечниковые	300–3000
Плотик		
Аргиллиты, глинистые сланцы		1–30
Эффузивы выветрелые		70–150
Алевриты, песчаники		300–500
Карбонатные породы (известняк, мергель)		300–3000
Гранитоиды трещиноватые		500–5000
Элювий, зона экзогенной трещиноватости		30–100



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 – песчаник трещиноватый

Рисунок 3.1 – Геоэлектрическая модель долины реки с аллювиальной россыпью (Оленченко, Осипова, 2022)

3.1. Двумерное численное моделирование данных электротомографии на модели аллювиальной россыпи

На разработанной геоэлектрической модели аллювиальной россыпи выполнено прямое численное моделирование данных электротомографии.

Прямая задача решена с использованием программного обеспечения ZondRes2D версии 6.0 (Kaminsky, 2010).

При решении прямой задачи выбрана прямая и обратная трехэлектродная установка. Сравнение электроразведочных установок применительно к ЭТ приведено в (Электроразведка, 2013), а также показано в работах (Dahlin, Zhou, 2004; Loke, 2009). Считается, что трехэлектродная установка оптимальна, поскольку обеспечивает максимальную глубину исследования при достаточно высоком разрешении и даёт более информативные результаты по краям расстановки. Для получения максимального разрешения на малых глубинах рекомендуется комбинирование трехэлектродной установки с дипольной осевой установкой.

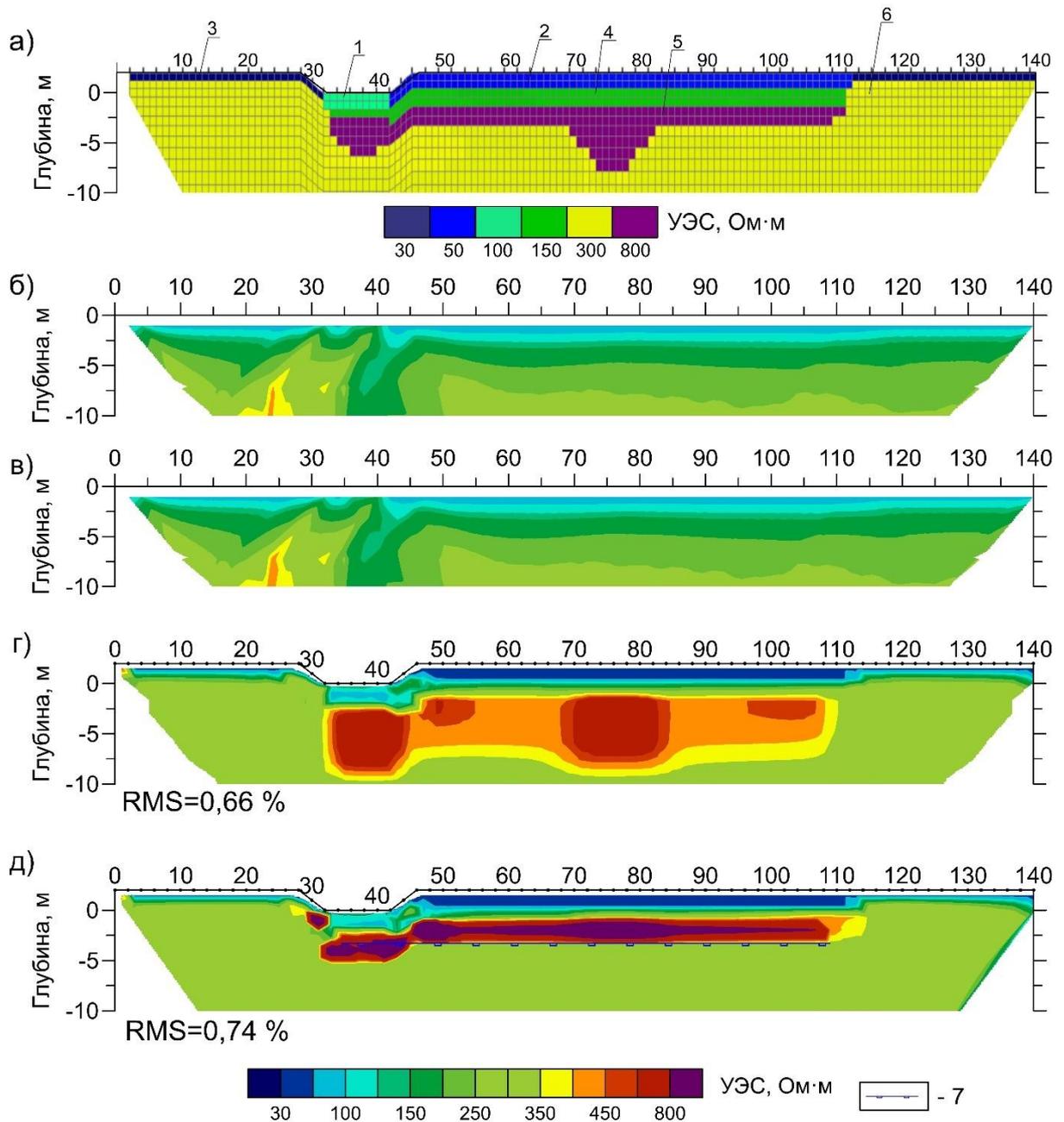
Расстояние между электродами выбрано 2 м, поскольку мощности слоёв в модели не превышают 2 м.

В результате расчёта прямой задачи получен разрез кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k) (Рисунок 3.2, б). Эти значения ρ_k с добавлением 5 % случайно распределённого шума экспортированы в программу Res2DINV (Loke, 2006) для инверсии. Использование различных программ для решения прямой и обратной задачи вносит дополнительную неоднозначность, поскольку используются разные алгоритмы расчётов электрических полей. Для решения обратной задачи в Res2DINV применялся «надёжный метод инверсии с ограничением гладкости» («robust model constrained inversion method»). Метод показывает хороший результат в контрастных по УЭС средах, поскольку накладываемое ограничение позволяет создавать модели с резкими границами раздела между областями с разными значениями УЭС, но в пределах каждой области значение УЭС остаётся почти постоянно (Loke, 2009). В дальнейших решениях обратных задач (в численных, физическом и полевых экспериментах) также использовался выбранный метод инверсии.

В результате инверсии получены разрез расчётного кажущегося УЭС (Рисунок 3.2, в) и разрез истинного (т. е. заданного в начальной геоэлектрической модели) УЭС (Рисунок 3.2, г). Ошибка подбора модели (RMS) составила 0,66 % на пятой итерации. Значения сопротивлений на разрезе изменяются от 45 до 650 Ом·м, т. е. сопротивление суглинков, определённое в модели 30 Ом·м,

завышается и равно 45 Ом·м. Стоит отметить, что восстановление истинных УЭС отложений не является принципиально важным элементом. Более значимо верное установление структурных особенностей – кровли плотика, границ палеоруслу в плане и по глубине. «Верхний слой, представленный пойменной фацией, чётко выделяется на разрезе, но имеет завышенное сопротивление 55–60 Ом·м. Фация кос и береговых отмелей не имеет чётких границ и выражена переходным слоем с УЭС 100–200 Ом·м. Слой валунно-галечниковых отложений определяется однозначно, хотя и с заниженным УЭС 380–650 Ом·м. Аномалией высокого УЭС выделяется область палеоруслу и «карман» в плотике» (Оленченко, Осипова, 2022).

«Результаты численного моделирования демонстрируют, что пласт высокого сопротивления, ассоциируемый с валунно-галечниковыми отложениями, контрастирует с вмещающими породами. Из-за принципа эквивалентности моделей (Бобачев и др., 2013) его параметры восстанавливаются с погрешностью, проявляющейся в заниженном УЭС и завышенной мощности. При наличии достоверных данных о глубине залегания кровли коренных пород, полученных, посредством других геофизических методов или разведочных шурфов и буровых скважин, появляется возможность фиксировать положение этой границы в процессе инверсии. В таком случае поверхность плотика будет определяться с большей точностью (Рисунок 3.2, д). При этом участки углублений будут проявляться как локализованные зоны экстремально высокого УЭС при сохранении толщины продуктивного горизонта» (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 – песчаник трещиноватый; 7 – закреплённая граница

Рисунок 3.2 – Результаты двумерного численного моделирования: а – геоэлектрическая модель долины реки, б – разрез наблюдаемых кажущихся УЭС, в – разрез расчётного кажущегося УЭС, г – результат 2-D инверсии модельных данных; д – результат 2-D инверсии данных с учётом закреплённой границы

«Двумерное численное моделирование показало, что метод ЭТ позволяет выделить в разрезе высокоомные слои фации плёсов и перекатов, что обосновывает

целесообразность его применения при поисках россыпных аллювиальных месторождений золота» (Оленченко, Осипова, 2022).

3.2. Трёхмерное численное моделирование данных электротомографии на объёмной модели аллювиальной россыпи

В упрощённом виде геологическая и геоэлектрическая модели аллювиальных отложений долины представляют собой двумерную среду. Однако наличие углублений в плотике добавляет трёхмерности этой среде. Кроме того, в реальных природных геологических условиях на исследуемом участке присутствуют и другие трёхмерные геологические объекты, например области многолетнемерзлых пород, талики, минерализованные жилы, разломные зоны. Для понимания вида аномалий от руслового аллювия в плане разработанная двумерная геоэлектрическая модель россыпи была модифицирована в трёхмерный вид (Рисунок 3.3), и выполнено прямое трёхмерное численное моделирование данных электротомографии.

Топография долины определена на основе реального объекта – реки Средняя Иликта (Прибайкалье), результаты исследований на которой представлены в Разделе 4.3.2 Главы 4.

Трёхмерное численное моделирование выполнено в программе ZondRes3D (Kaminsky, 2010). Система наблюдений состоит из 6 параллельных профилей длиной 355 м (72 электрода с шагом 5 м), расположенных на расстоянии 50 м друг от друга. При решении прямой задачи выбрана прямая и обратная трехэлектродная установка.

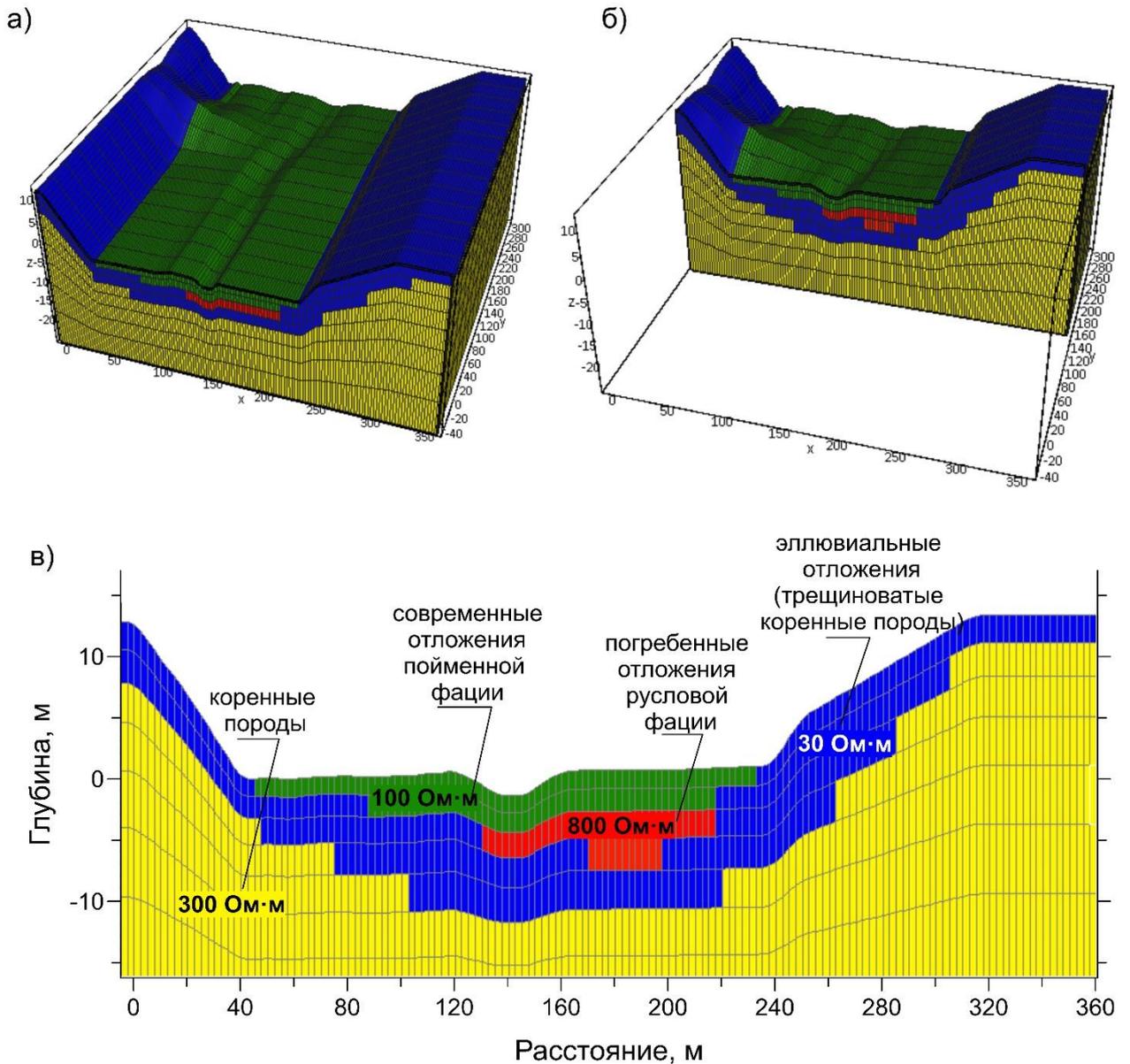


Рисунок 3.3. – Трёхмерная модель долины реки с аллювиальной россыпью, построенная в программе ZondRes3D: а – общий вид, б – общий вид в срезе по профилю № 4 ($Y=150$ м), в – разрез по профилю № 4 ($Y=150$ м)

Для трёхмерной инверсии в программе Res3DINV (Loke, 2005) полученные значения ρ_k экспортированы с добавлением шума 5%. В результате получена объёмная модель распределения УЭС. На карте по глубине 6,5 м (Рисунок 3.4, а) в интервале 125-215 м по оси X отчётливо выделяется область повышенного УЭС (100-300 Ом·м), протянувшаяся через все профили, которая соответствует русловой фации аллювия. Локальный участок высокого УЭС (300-450 Ом·м) в интервале 125-175 м по оси Y соответствует смоделированному карману. На карте

по глубине 9,5 м (Рисунок 3.4, б) аномалия высокого УЭС от палеорусла отсутствует, поскольку отложения залегают только до глубины 4,5 м. Однако на карте сохраняется аномалия от кармана в интервале 125-150 м, причём по оси Y аномалия имеет большие размеры, чем в модели. Это связано с тем, что шаг сетки модели равен расстоянию между профилями.

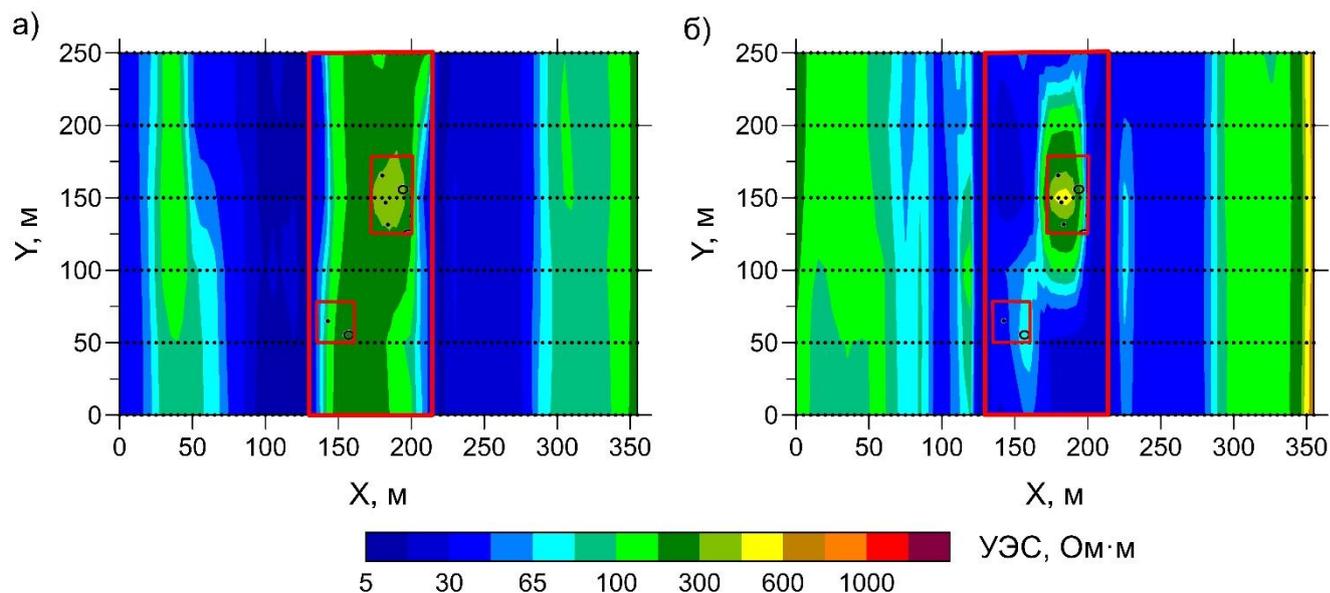
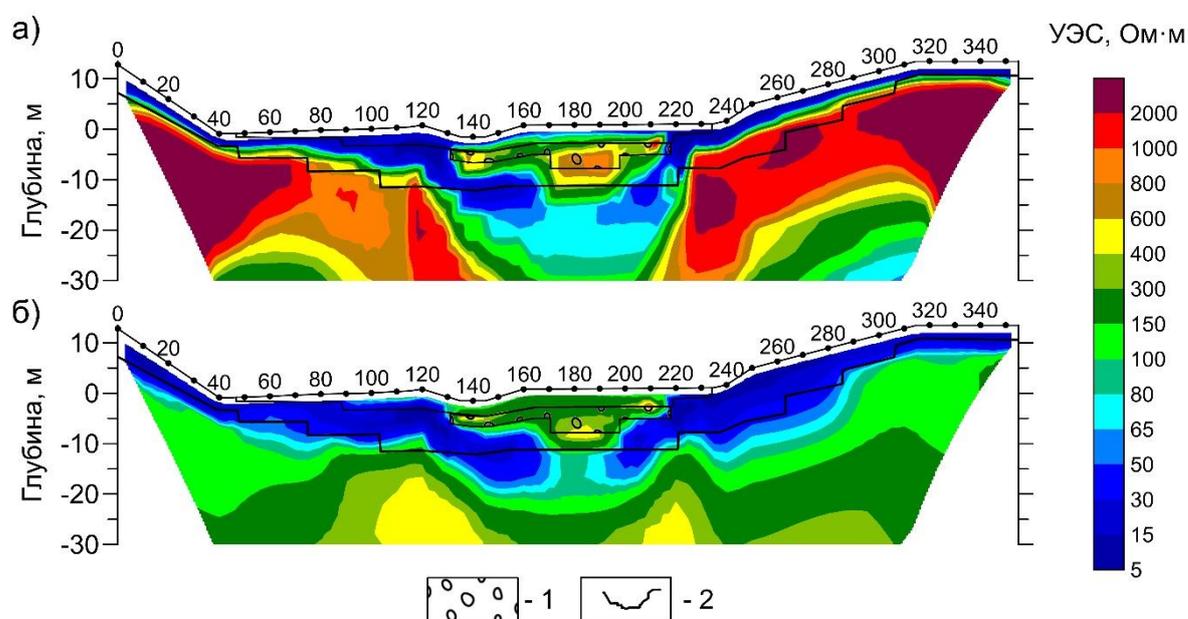


Рисунок 3.4. Карты распределения УЭС на глубине 6,5 м (а) и 9,5 м (б) по результатам трёхмерной инверсии модельных данных. Красными прямоугольниками показаны контур палеорусла и карманов

2-D инверсия данных, полученных по результатам трёхмерного моделирования, позволяет оценить ошибки, возникающие при аппроксимации трёхмерной среды двумерной моделью (Павлова, 2014). Для данных с линии $Y=150$ м проведена двумерная инверсия данных. Граница кровли коренных пород восстанавливается точно (Рисунок 3.5, а). Сильное завышение УЭС плотика объясняется влиянием рельефа (Казначеев и др., 2019). Расположение высокоомного палеорусла в плане восстановлено точно, однако на разрезе видно, что мощность высокоомной аномалии увеличена в 2,5 раза в сравнении с заданной в модели. Неточно определяется как верхняя, так и нижняя границы палеорусла. При рассмотрении среза по линии $Y=150$ м из данных трёхмерной инверсии (Рисунок 3.5, б) проблема сохраняется, но аномалия «раздувается» меньше (в 2

раза). На глубине более 10 м в интервале 130-220 м проявляется проводящая аномалия типа «разлом», что объясняется либо компенсацией высокоомной аномалии от палеоруслу сопряжённым минимумом (Павлова, 2014) либо влиянием рельефа (Казначеев и др., 2019).



1 – аллювиальные отложения в модели; 2 – кровля коренных пород в модели

Рисунок 3.5 – Геоэлектрические разрезы по линии $Y=150$ м по результатам двумерной (а) и трёхмерной (б) инверсии модельных данных

Завышение мощности высокоомных объектов, а также неверное определение верхней и нижней границ локального высокоомного объекта в проводящей среде, особенно при численном моделировании, является известным фактом и подробно рассмотрено в работе (Павлова, 2014). Однако это не снижает эффективности результатов, получаемых по данным ЭТ при поисках русловых фаций аллювия в долине рек, поскольку наиболее важным здесь является определение границ русловой фации в плане, что, как видно из моделирования, успешно выполняется.

3.3. Физический эксперимент

Физический эксперимент обеспечивает возможность создания модели, приближенной к реальной геологической среде. Поэтому для верификации результатов численного моделирования электротомография проведена на физической модели долины реки с палеоруслом.

В соответствии с основами теории физического моделирования (Kuneš, 2012; Гатапова и др., 2014), ключевыми требованиями к экспериментальным исследованиям выступают соблюдение геометрического и физического подобия между натурным объектом и моделируемым аналогом. Геометрическое подобие двух объектов достигается, когда все линейные размеры одного объекта могут быть получены из соответствующих размеров другого путём умножения на определённый коэффициент подобия.

Метод ЭТ представляет собой геометрические зондирования на переменном токе низкой частоты (2–5 Гц). Распространение тока в среде зависит от электропроводности материала, а не от размера или формы вещества.

В поставленном эксперименте физическая модель речной долины сохраняет геометрическое подобие с реальным природным объектом. За единицу масштаба съёмки принято межэлектродное расстояние a , которое в эксперименте равно 1 см. Это расстояние эквивалентно 5 м при реальных полевых исследованиях. Коэффициент геометрического подобия электроразведочной установки составил 1:500.

3.3.1. Модель и методика зондирований

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). Они отличаются разбросанными блуждающими руслами, с интенсивными деформациями. Для равнинных и полугорных рек, находящихся на начальном этапе врезания, характерна сегментная пологая стадия формирования излучин, когда отношение

длины излучины (l) по руслу к шагу излучины (L) изменяется в пределах 1,10-1,40, и преобладает продольное смещение с размывом выпуклых берегов в верхних крыльях и вогнутых — в нижних (Рисунок 3.6, б). При переходе к сегментной развитой и сегментной крутой стадиям кривизна излучин увеличивается (Чалов, 2016).

Районы распространения разветвлённых русел на полугорных реках широко распространены в Сибири (к востоку от р. Енисей), на Дальнем Востоке и северо-востоке России, в предгорьях Алтая, Саян, горных массивов Забайкалья, Приморья, Урала и Северного Кавказа (Чалов, Чалова, 2019).

В соответствии с геологическими представлениями собран стенд с моделью речной долины с врезанным относительно прямолинейным палеоруслом с узкой поймой. Моделируется распространённая ситуация, когда породы плотика вблизи кровли выветрелые. Модель помещалась в контейнер из оргстекла размерами 120×40×15 см. Листы пластика в основании контейнера имитировали высокоомные коренные породы, падающие под углом 30° к тальвегу долины. Вмещающая среда (отложения вокруг палеорусла, подстилающий элювий плотика, верхние "торфяные" слои и материал тальвега с бортами) была смоделирована единообразным материалом – отсортированным мелкозернистым аллювиальным песком. Во вмещающей среде заложен мелкий галечник (3–5 мм), формирующий палеорусло и имитирующий отложения русловой фации аллювия («пески») мощностью 1,5 см (Рисунок 3.6, а). Над «песками» располагался 0,5-сантиметровый слой «речников» (песчано-галечная смесь), перекрытый таким же по толщине слоем песчаных «торфов» (Рисунок 3.6, в). Ширина долины составила 14 см, ширина русла – $4a$ (4 см), глубина палеорусла – $2,5a$ (2,5 см) (Рисунок 3.6, б). Согласно (Чалов, 2016) степень развитости русла равна отношению длины излучины (l) по руслу к шагу излучины (L). В данном случае $l/L=36/34=1,10$, что характерно для русел сегментной пологой стадии формирования излучины ($1,1 < l/L < 1,4$). Коэффициент формы излучины равен отношению радиуса кривизны излучины к стреле прогиба $r/h_{\text{и}}=30/5=6$, следовательно, излучина в модели является пологой.

Рыхлый материал увлажнялся водопроводной водой перед укладкой. Стабильность влажности обеспечивалась за счёт опрыскивания отложений водой раз в сутки и укрывания плёнкой в нерабочие часы. Измерения на модели выполнялись в рабочие часы в течение трех дней.

Электропроводность водопроводной воды измерена прибором СОМ–300 и в пересчёте на УЭС составляла в среднем 18 Ом·м. УЭС материалов определены прибором Miller-400D и приведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Электрические свойства материалов физической модели

Материал	УЭС, Ом·м
Песок	30–60
Песчано–галечная смесь	160
Галька	650
Пластиковый откос (коренные породы)	∞

Измерения выполнены аппаратурой Скала–64К15 с использованием 32 электродов. Длина профиля составила 31 см. Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродной прямой и обратной установкам. Разнос между приёмными электродами (a) изменялся от 1 см до 5 см, между питающим и приёмным электродом, находящимся на профиле (na) – от 1 см до 31 см (Рисунок 3.7).

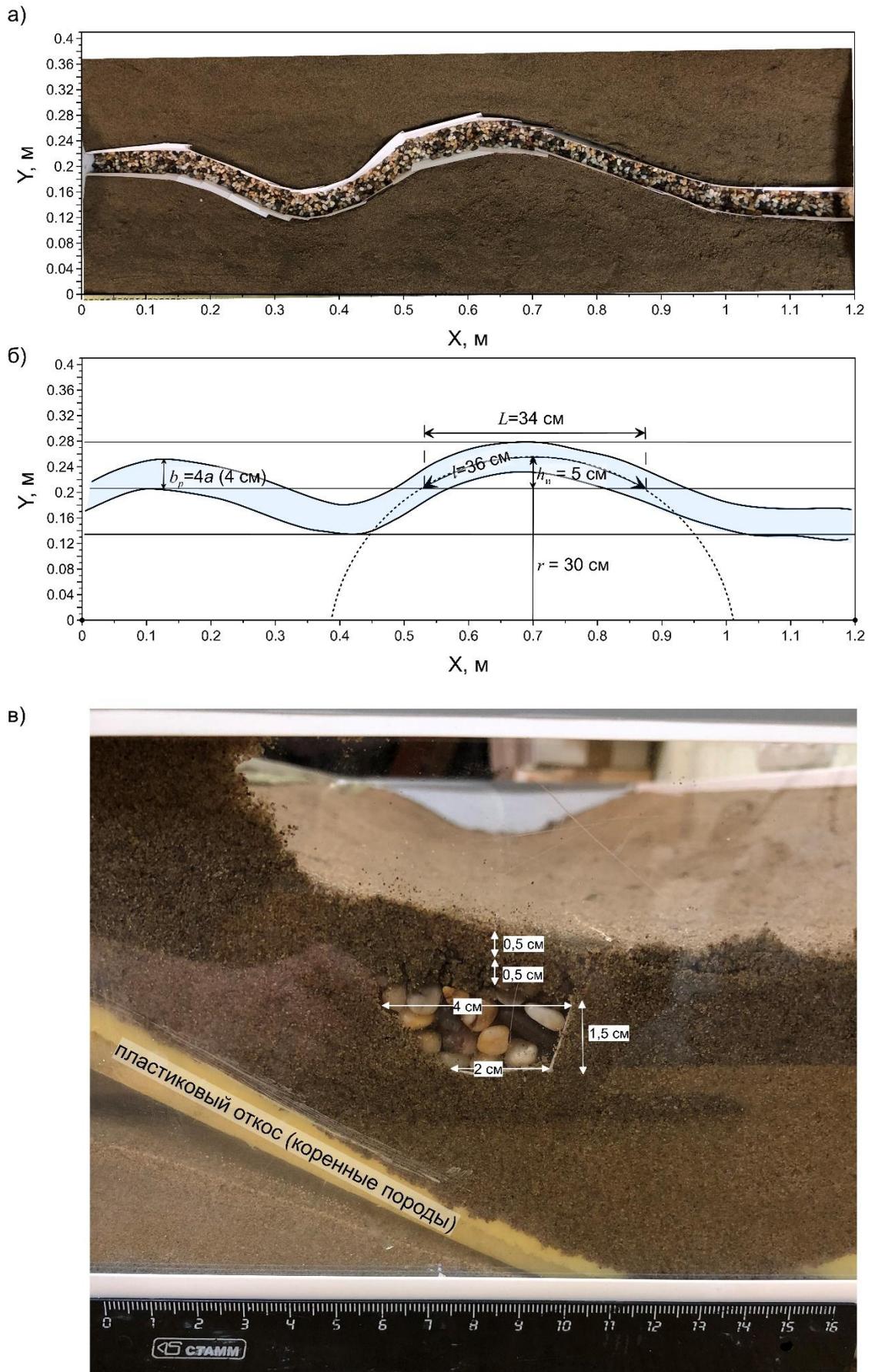


Рисунок 3.6 – Физическая модель и её параметры: а) вид сверху; б) схема морфологических элементов модели палеорусли; в) разрез сбоку

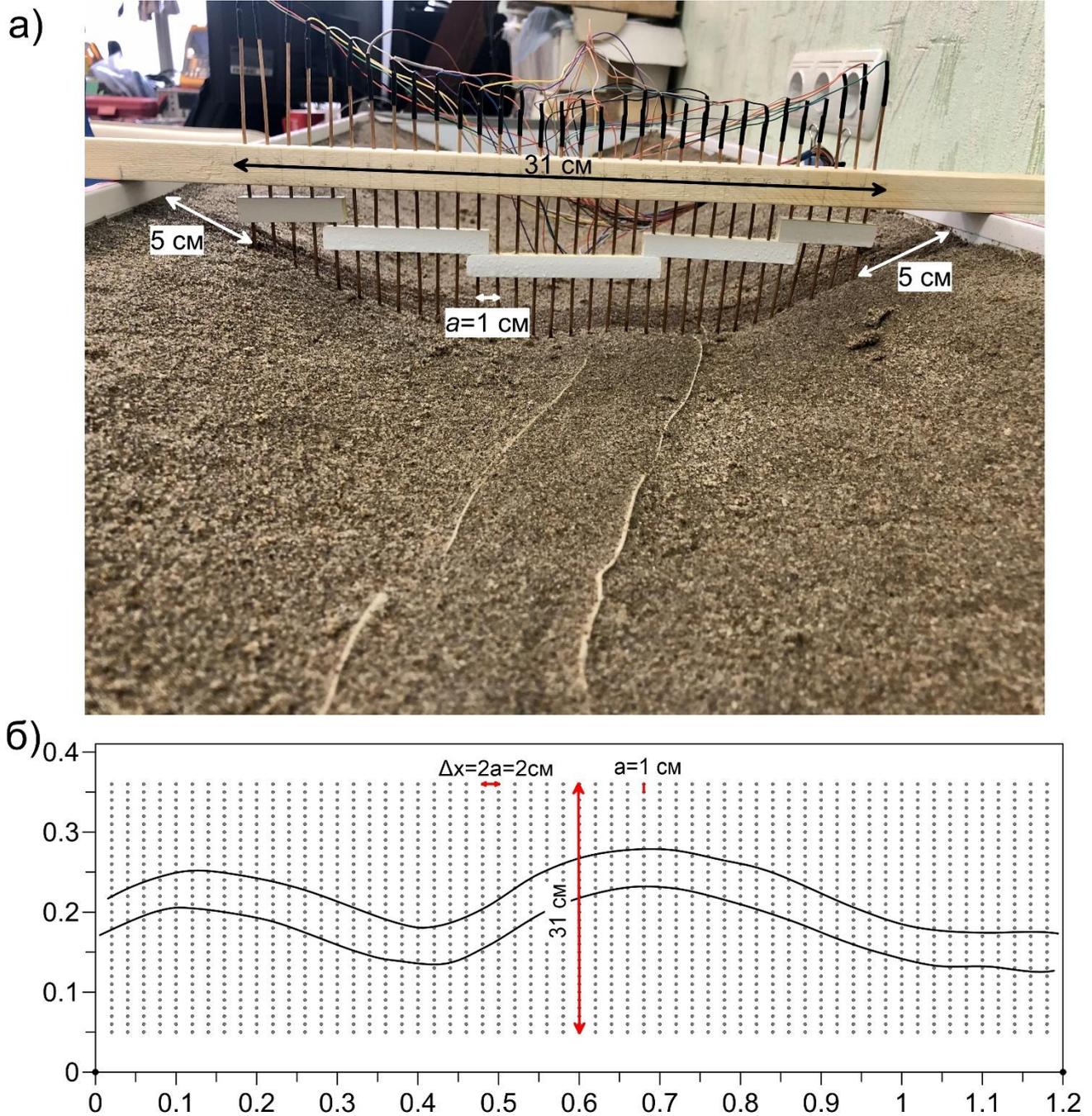


Рисунок 3.7 – Параметры измерительной установки (а) и схема сети зондирований (б)

Обработка экспериментальных данных осуществлялась посредством программных комплексов Res2DINV и Res3DINV (Loke, 2018). В соответствии с инструкцией оптимальные условия для трехэлектродной конфигурации предполагают, что дистанция между профилем измерений и удалённым электродом должна превосходить максимальный разнос na более чем в 5 раз. При невыполнении данного требования для качественной инверсии необходимо

вводить поправку на фактическое местоположение удалённого электрода. Вследствие габаритных ограничений экспериментальной установки, фактическое расстояние от профиля до удалённого электрода варьировалось от двух- до четырёхкратного превышения максимального разноса na в зависимости от расположения профиля, что учитывалось при выполнении инверсионных расчётов. Решение обратной задачи производилось методом робастной инверсии с использованием стандартных параметров программы.

3.3.2. Оценка влияния глубины заземления электродов

«В теории электрод представляет собой точечный источник тока, т. е. его размеры намного меньше расстояния до точки наблюдения. Однако на практике при физическом моделировании добиться точечного заземления чрезвычайно сложно, поскольку уменьшение размера электрода приводит к резкому возрастанию сопротивления заземлений» (Осипова и др., 2023). В ходе экспериментальных измерений электроды погружались на 3-5 мм, что обеспечило сопротивление заземления порядка 2-3 кОм, однако это нарушало принцип точечности источника.

«Для оценки влияния глубины заземления электродов на результаты измерений проведён эксперимент на баке с водой. Измерения проведены установкой Шлюмберже с шагом между электродами 1 см с использованием того же оборудования, что и при измерениях на физической модели долины реки. Линия измерений располагалась по центру бака, расстояние до стенок составило 12 см и 5 см. Электроды погружались в бак с водой на глубину 0,01 мм, 5 мм, 10 мм» (Осипова и др., 2023).

«Анализ результатов двумерной инверсии показал, что «на геоэлектрических разрезах граница между слоем воды и дном определяется неверно вне зависимости от глубины погружения электродов, вероятно, из-за влияния боковых стенок бака (Рисунок 3.8). В случае точечного (0,01 мм) заземления УЭС слоя воды распределено неравномерно, присутствуют локальные

высокоомные и проводящие аномалии. Заглубление электродов на глубину 5 мм слой воды определяется более однородным по УЭС и составляет 15–20 Ом·м. При увеличении глубины погружения электродов в среду до 10 мм электросопротивление слоя воды по результатам инверсии определяется заниженным (10–15 Ом·м)» (Осипова и др., 2023).

На кривых зондирования с пикета 0,15 м (Рисунок 3.9), полученных по результатам 1-D инверсии данных в программе IPI2Win (автор Бобачев А. А.), видно, что при увеличении глубины заземления увеличивается и УЭС первого слоя модели – воды. Согласно графику зависимости восстановленного УЭС слоя воды от глубины заземления электродов минимальная разница 30 % между восстановленным и реальным УЭС воды достигается при глубине заземления электродов на 5-7 мм.

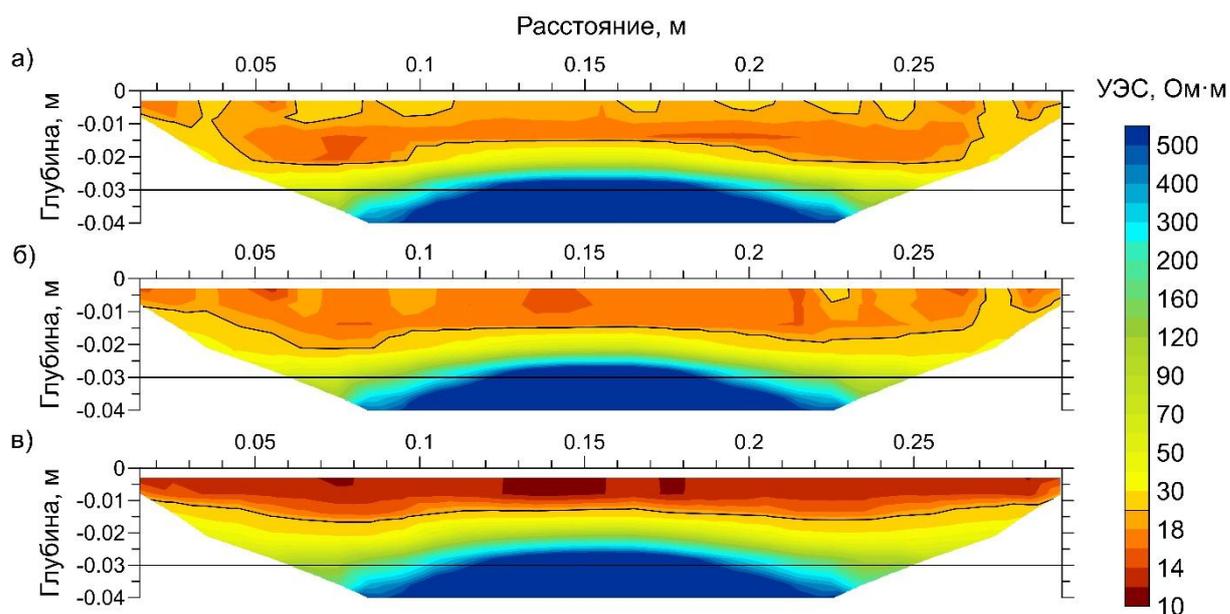


Рисунок 3.8 – Геоэлектрические разрезы, полученные в результате измерений в баке с водой, для установки с погружением электродов на глубину, мм: а) 0,01; б) 5; в) 10

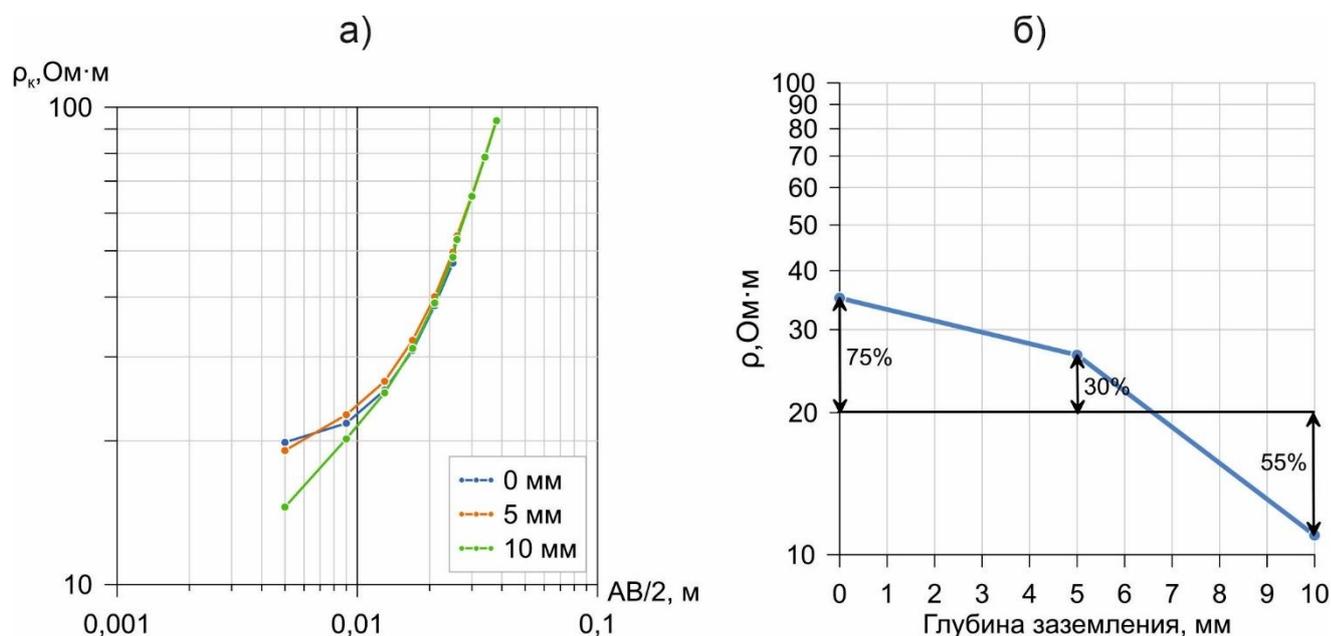


Рисунок 3.9 – Кривые зондирования на пикете 0,15 см для установок с погружением электродов на разную глубину (а) и зависимость УЭС слоя воды от глубины заземления электродов (б)

«В результате эксперимента определено, что для обеспечения хорошего заземления и исключения ложных аномалий электроды должны быть погружены в среду на глубину 5-7 мм. Ни в моём исследовании при поисках и разведке аллювиальных россыпей золота, ни в выполненном эксперименте не стоит задача восстановления истинного УЭС отложений. Главным является выявление высокоомной аномалии от палеоруслу на фоне проводящей вмещающей среды. Поэтому возможные приповерхностные искажения и общее изменение УЭС разреза, не повлияют на результат эксперимента» (Осипова и др., 2023).

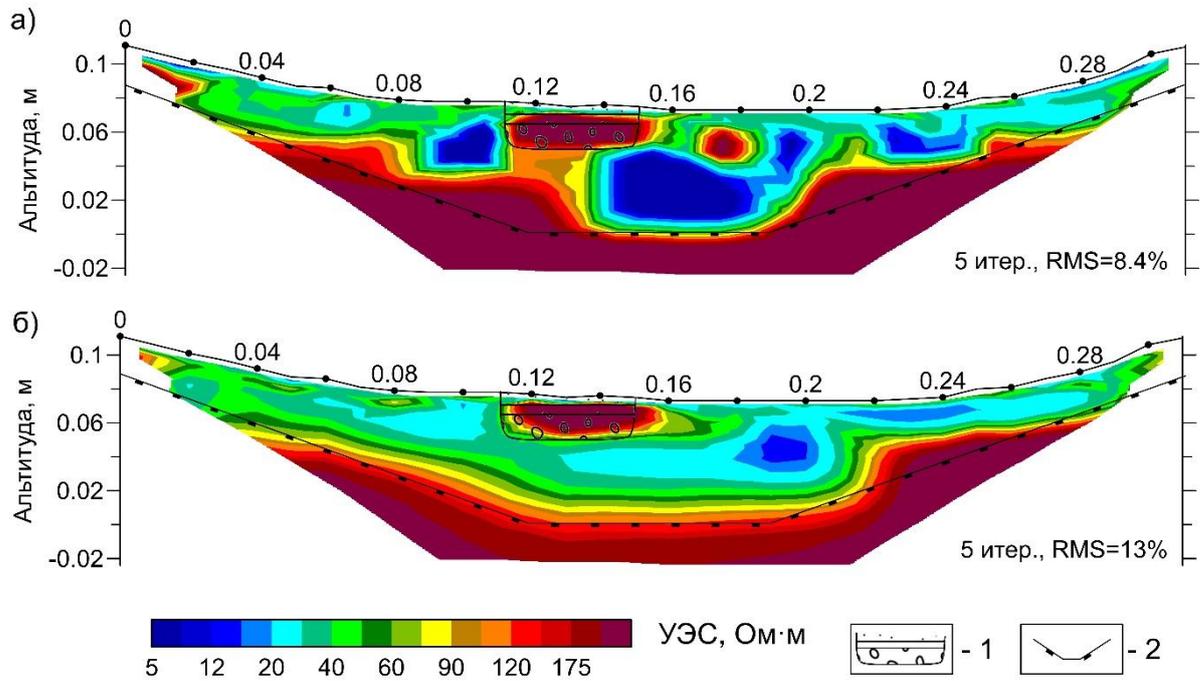
3.3.3. Результаты физического эксперимента

Геоэлектрический разрез по профилю $X=50$ см (Рисунок 3.10, а), полученный по результатам 2-D инверсии, демонстрирует в интервале 0,11-0,155 м на глубине 0,004-0,026 м зону повышенного сопротивления (150-450 $\text{ Ом}\cdot\text{м}$), интерпретируемую как русловая фация аллювия (палеорусло). Структура разреза осложнена присутствием локальных высокоомных (интервал 0,17-0,18 м, глубина 0,013-0,03 м) и низкоомных (интервал 0,09-0,11 м, глубина 0,013-0,04 м и интервал

0,14-0,18 м, глубина 0,025-0,07 м) аномалий. Данные особенности вызваны как неоднородностью вмещающей среды (разная смачиваемость и уплотнённость песка), так и представляют собой артефакты инверсионного процесса, характерные для контрастных сред (Loke, Dahlin, 2010; Loke, 2022). Коренные породы отмечаются высокоомной аномалией в нижней части разреза, при этом глубина их залегания определяется корректно, однако морфология верхней границы искажена вследствие появления ложных аномалий от рельефа.

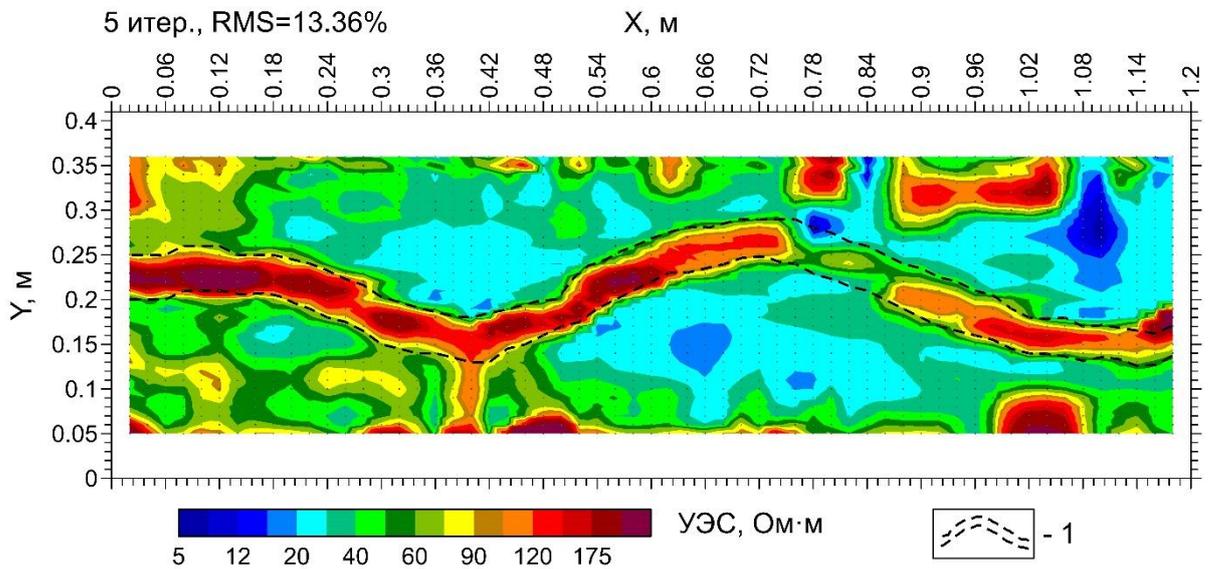
Геоэлектрический разрез, являющийся вертикальным срезом объёмной модели, полученной по результатам трёхмерной инверсии, характеризуется более однородным распределением УЭС песчаных отложений (15-30 Ом·м) (Рисунок 3.10, б). Палеорусло идентифицируется в интервале 0,11-0,16 м на глубинах 0,004-0,025 м. Положение верхней границы коренных пород восстанавливается на истинной глубине.

Карта распределения УЭС на глубине 0,022 м (Рисунок 3.11), соответствующей уровню размещения гальки, имитирующей русловые отложения в физической модели, показывает палеорусло в виде вытянутой лентообразной аномальной зоны с интенсивностью 100-400 Ом·м на фоне значений 10-70 Ом·м. Присутствующие в фоновой области модели (вмещающей среде) локальные аномалии, обусловленные несовершенством моделируемой системы и влиянием ограничивающих стенок, можно интерпретировать как геологические помехи. Несмотря на это, аномальная зона, связанная с палеоруслом, точно отражает его фактическое положение и геометрические характеристики.



1 – палеорусло в модели; 2 – положение кровли коренных пород в модели

Рисунок 3.10 – Геоэлектрические разрезы по результатам 2-D (а) и 3-D (б) инверсии



1 – границы палеорусла

Рисунок 3.11 – Карта УЭС на глубине 0,022 м с интервалом между профилями 2а (2 см)

Физический эксперимент подтверждает результаты численного моделирования – палеорусло определяется в виде корытообразной высокоомной

аномалии в разрезе и лентообразной аномалией в плане. При этом геометрические параметры русла по вертикали и горизонтали восстанавливаются с минимальными отклонениями от истинных значений модели.

3.4. Полевые эксперименты

3.4.1. Опытные-методические работы на эксплуатируемом месторождении

Опытные-методические работы проводились на эксплуатируемом месторождении ручья Кичаваям (Камчатский край). Согласно данным исследований прошлых лет, месторождение включает пойменную и террасовую россыпи. На современном этапе пойменная часть месторождения практически полностью выработана, а террасовая россыпь находится в начальной стадии разработки. Промышленная минерализация локализуется в виде протяжённого лентообразного контура на правобережной надпойменной террасе высотой 5–12 метров.

Источником россыпного золота на территории выступает рудная зона, образованная в результате ороговикования в области контакта интрузии и вмещающего вулканогенно-осадочного комплекса.

Продуктивная минерализация россыпи связана с базальными горизонтами осадочного комплекса. Золотоносный горизонт не имеет явных литологических отличий от вмещающих отложений и был оконтурен исключительно на основании данных опробования разведочных выработок. Отмечается проникновение промышленных концентраций золота по системам трещин в коренные породы на глубину до 0,40 м.

Четвертичный покров месторождения сформирован аллювиальными отложениями, представленными среднеокатанным гравийно-галечниковым материалом с включениями песков, супесей и редких валунов (5–10% от объёма). Террасовый комплекс характеризуется наличием верхнего слоя солифлюкционных образований, состоящих из илисто-глинистого материала с щебнистыми включениями.

Зондирования ЭТ проведены вдоль разведочной траншеи, заложенной поперёк горного отвода в блоке с подсчитанными запасами по категории С₁. Измерения осуществлены с использованием многоэлектродной станции «Скала-48К12». Пространственные ограничения участка не позволили использовать трёхэлектродную конфигурацию, что обусловило применение установки Шлюмберже. Измерения проводились при вариации разносов АВ от 15 до 235 м с интервалом наблюдений 5 м вдоль профиля.

В интервале профиля 200–250 м траншея вскрывает корытообразное погружение коренных пород на глубину 2,5–3,5 м. Морфология границы коренных пород в юго-восточном направлении характеризуется плавным погружением под углом 20–25°. В направлении понижения рельефа наблюдаются отдельные выступы коренного основания. Породы плотика подверглись интенсивному выветриванию с формированием щебнистого материала размером около 1 см (Рисунок 3.12, а). В пределах корытообразного углубления в стенке траншеи обнажается толща валунно-галечниковых отложений с песчаным и супесчаным заполнителем, представляющая собой отложения русловой фации (Рисунок 3.12, б).

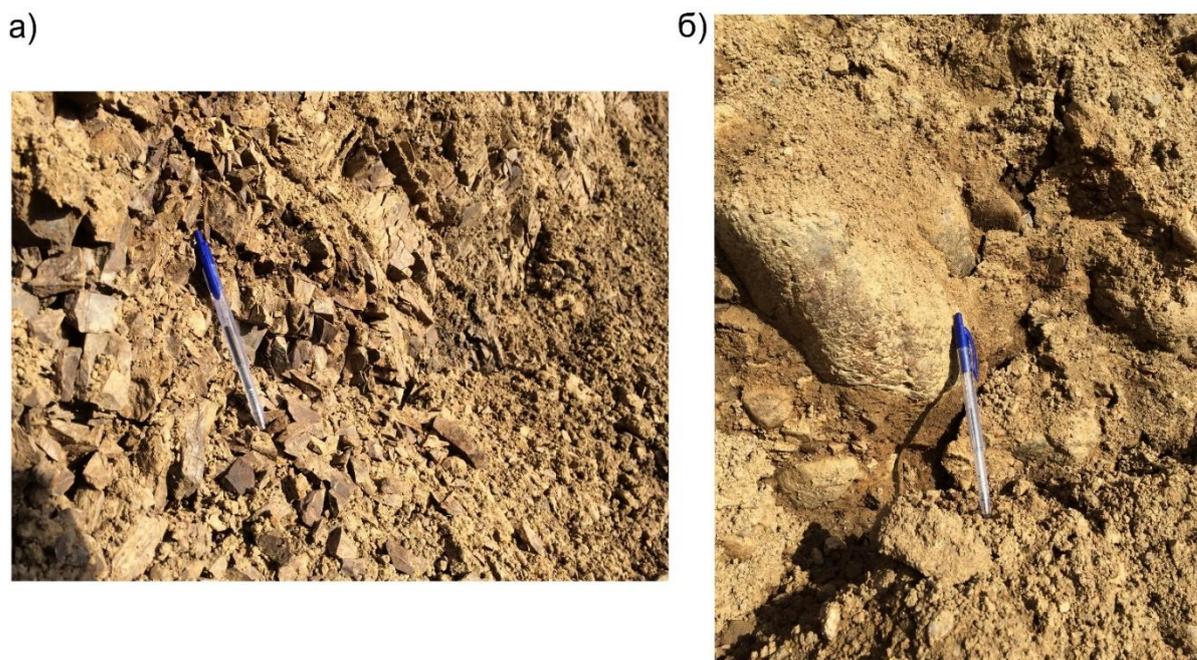
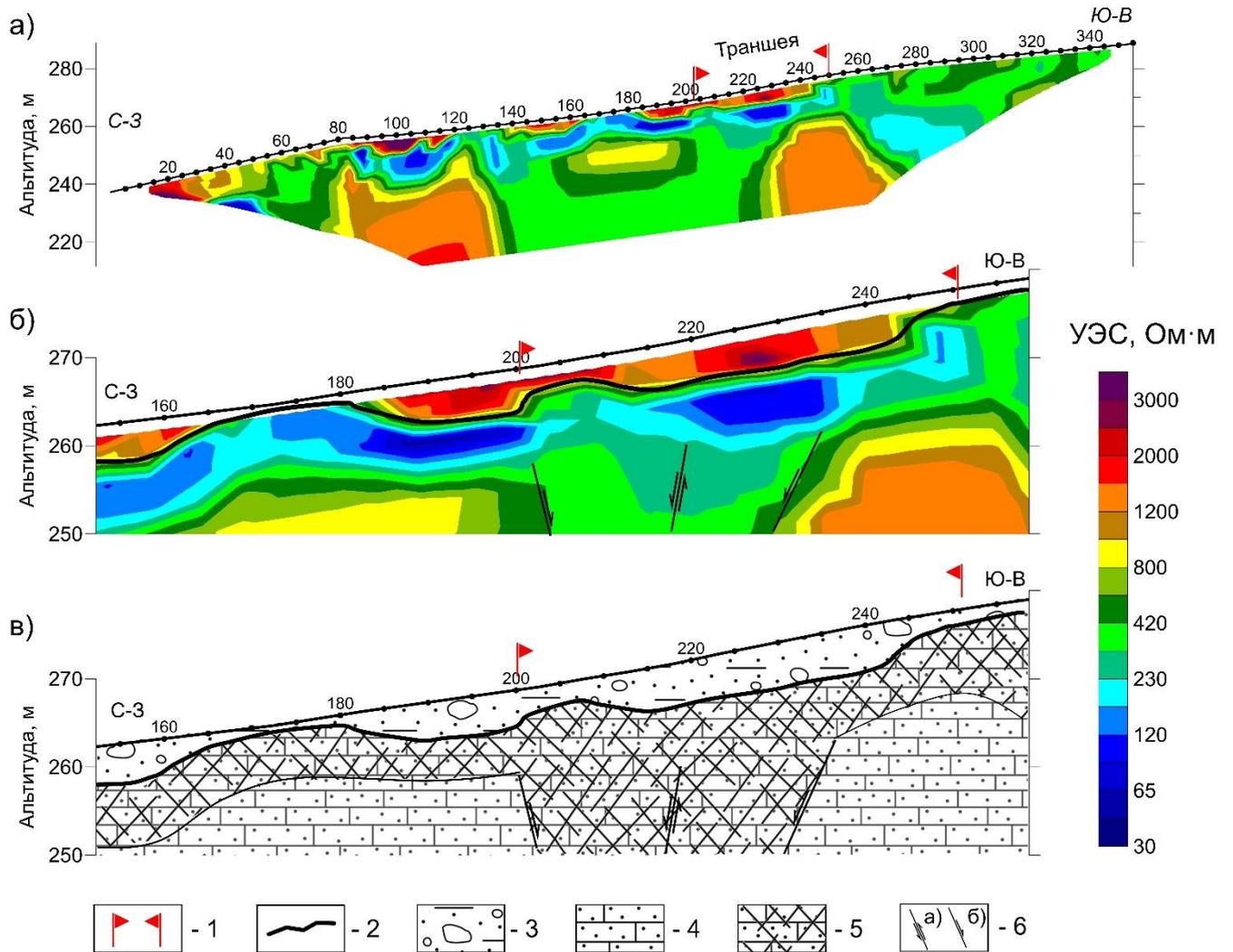


Рисунок 3.12 – Выветрелые породы плотика (а) и валуны русловой фации (б) в разрезе траншеи на участке Кичаваям (Оленченко, Осипова, 2022)

«На геоэлектрическом разрезе диапазон значений УЭС варьирует от нескольких сотен до первых тысяч Ом·м (Рисунок 3.13, а, б). Верхняя часть разреза до глубины 4–5 м в пределах горного отвода характеризуется породами с показателями УЭС 1000-3000 Ом·м, которые представлены золотоносными валунно-галечниковыми отложениями русловой фации (Рисунок 3.13, в). Подстилающие коренные породы, сложенные интенсивно трещиноватыми песчаниками, демонстрируют вариации УЭС от 250 до 2000 Ом·м в зависимости от степени дезинтеграции. В зоне выветривания, где коренные породы разрушены до щебнистого состояния, наблюдается снижение УЭС до 50–200 Ом·м. Для наглядности интерпретации фрагмент геоэлектрического разреза наложен на фотографию стенки траншеи (Рисунок 3.14), в которой видно отложения русловой фации и плотика. Анализ геоэлектрического разреза (Рисунок 3.13, б) показывает, что корытообразное углубление в кровле плотика сформировалось над зоной пониженного УЭС в коренном основании, интерпретируемой как разломная структура (Рисунок 3.13, в). Данное наблюдение согласуется с геологической характеристикой района исследований, где отмечается, что формирование речных

долин происходило преимущественно вдоль малоамплитудных внутриблоковых разрывных нарушений» (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.

Рисунок 3.13 – Геоэлектрический разрез вдоль разведочной траншеи в контурах горного отвода (а), его фрагмент (б) и интерпретация (в)

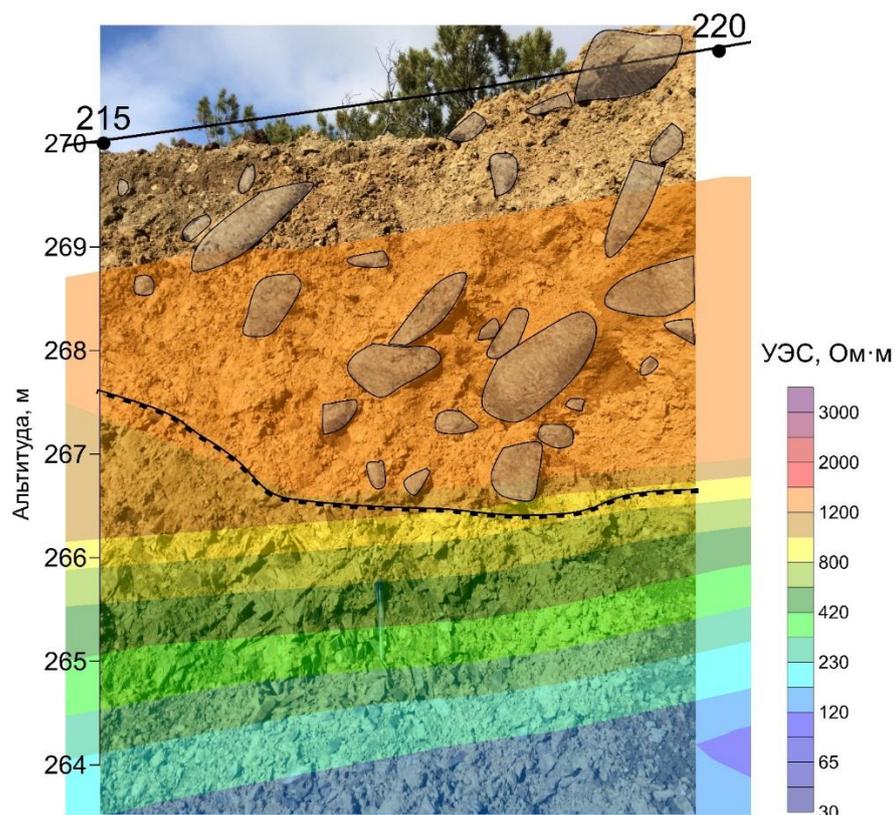


Рисунок 3.14 – Фрагмент геоэлектрического разреза, сопоставленный со стенкой разведочной траншеи

«По данным эксплуатационной разведки и опробования установлено, что значимые промышленные концентрации золота обнаруживаются в корытообразных погружениях поверхности плотика, которые были идентифицированы геофизическими методами. Среднее содержание золота в продуктивном пласте достигало примерно 1 г/м^3 » (Оленченко, Осипова, 2022).

Результаты опытно-методических исследований демонстрируют, что приповерхностные высокоомные аномалии (свыше $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) соответствуют отложениям русловой фации древних речных систем, перспективным для обнаружения золотой минерализации. Коренные породы плотика, изменённые процессами выветривания, характеризуются значениями УЭС в диапазоне $50\text{-}200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. На контакте высокоомных и низкоомных пород фиксируются структурные особенности рельефа коренного основания.

3.4.2. Аллювиальная россыпь в условиях низкоомного плотика

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

Ануйский медно-золоторудно-россыпной узел – самый насыщенный в отношении россыпной золотоносности. Разработка месторождений проводилась в XVIII–XIX вв., а крупными старательскими артелями – с 1930-х годов (Мукаева, 2010). В настоящее время многие россыпи выработаны, однако до сих пор выявляются новые участки с промышленным содержанием металла.

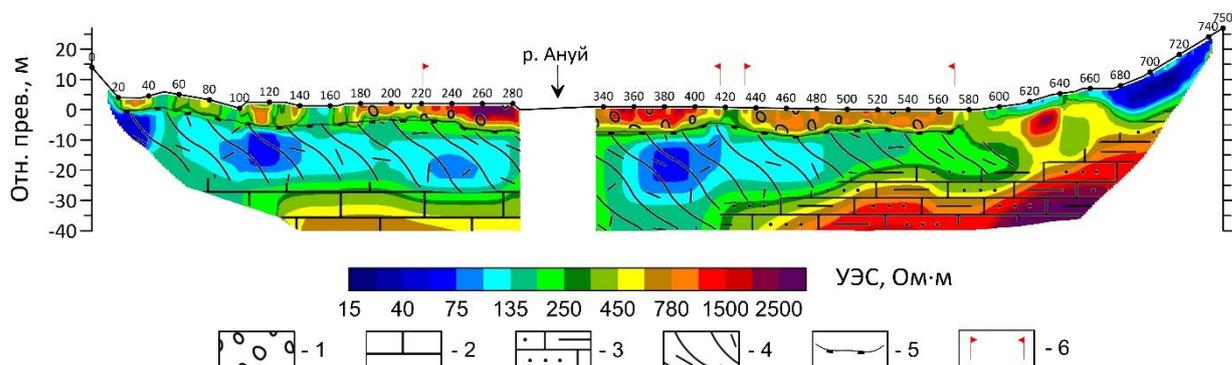
Разведанные россыпи в бассейне Ануя расположены в аллювиальных отложениях речных долин, в русловой части реки, пойме и 1-й надпойменной террасе. Отложения 2-й надпойменной террасы обнаруживают местами слабую золотоносность. Золотоносный пласт повсеместно представлен галечниками, залегающими на трещиноватых коренных породах (Гусев, 2014).

Для зондирований ЭТ использована установка Шлюмберже с расстоянием 5 м между электродами, электроразведочная станция «Скала-48К12».

В приповерхностной части геоэлектрического разреза по профилю, пересекающему р. Ануй (Рисунок 3.15), на глубинах до 5,5–9,0 м чётко прослеживается горизонт с повышенными значениями УЭС (700–2000 Ом·м), который интерпретируется как толща рыхлых аллювиальных накоплений. Этот горизонт подстилается породами с пониженным электрическим сопротивлением (70–200 Ом·м), представленными, согласно геологической картографии, выветрелыми известняками в левобережной части и изменёнными сланцами, алевролитами и песчаниками в правобережной части разреза.

Толща рыхлых отложений в пределах речной долины дифференцируется на два участка по показателям УЭС. Первый участок, характеризующийся значениями УЭС 600–3000 Ом·м, локализуется в интервале 170–420 м и включает современное русло р. Ануй. Второй участок с показателями УЭС 500–1000 Ом·м, расположенный в интервале 430–570 м, интерпретируется как древнее русло (долинная россыпь). Высокие значения УЭС рыхлых отложений в выделенных

зонах свидетельствуют о преобладании валунно-галечникового материала, что указывает на их потенциальную золотоносность.



1 – русловой аллювий; 2 – известняки массивные и слоистые; 3 – глинистые сланцы, песчаники, алевролиты; 4 – кора выветривания коренных пород; 5 – подошва аллювиальных отложений (кровля плотика); 6 – границы перспективного участка отработки россыпи

Рисунок 3.15 – Геоэлектрический разрез через р. Ануй

Другой пример результатов ЭТ приведён для участка на р. Средняя Иликта в Иркутской области. Территория исследований находится в узкой (200 м) речной долине, окружённой крутыми склонами с глыбовыми осыпями. Геологическое строение района определяется развитием сланцев, филлитов, метаморфизованных песчаников и гравелитов. Тектономагматическая активность Приморского комплекса в средне-верхнепротерозойское время обусловила формирование зон пиритовой и сульфидно-кварцевой минерализации с повышенным содержанием золота, которые выступают источниками металла при образовании россыпных месторождений.

Четвертичные отложения в долине характеризуются мощностью от 2 до 5 м, что определяет мелкозалегающий характер россыпей. Продуктивный золотоносный горизонт относится к базальной части валунно-галечно-песчаных аллювиальных отложений и верхней зоне коренных пород. Плотик представлен метаморфизованными песчаниками, известняками, кварц-алевролитовыми сланцами и доломитами. Верхняя часть плотика сложена переотложенной корой выветривания с содержанием глинистой фракции 25–40 %.

Геофизические исследования проводились с использованием электроразведочной станции «Скала-48К12» в конфигурации Шлюмберже с шагом измерений 5 м вдоль профиля.

Верхняя часть геоэлектрического разреза на северо-западном склоне имеет повышенные значения УЭС, обусловленные низкой влажностью крупнообломочных отложений коры выветривания (Рисунок 3.16). В пойменной части р. Средняя Иликта (пикеты 100–180) коренные породы характеризуются УЭС 1000-1300 Ом·м. В приповерхностном интервале на участках 115–140 м и 155–180 м выделяются локальные корытообразные аномалии высокого УЭС (2000–5000 Ом·м), интерпретируемые как русловые аллювиальные отложения мощностью 3–4 м и 4–6 м соответственно. На участке профиля 180-210 м, соответствующем тыловому шву долины, породы характеризуются пониженными значениями УЭС (300–500 Ом·м), что может быть связано с их трещиноватостью в разломной зоне.

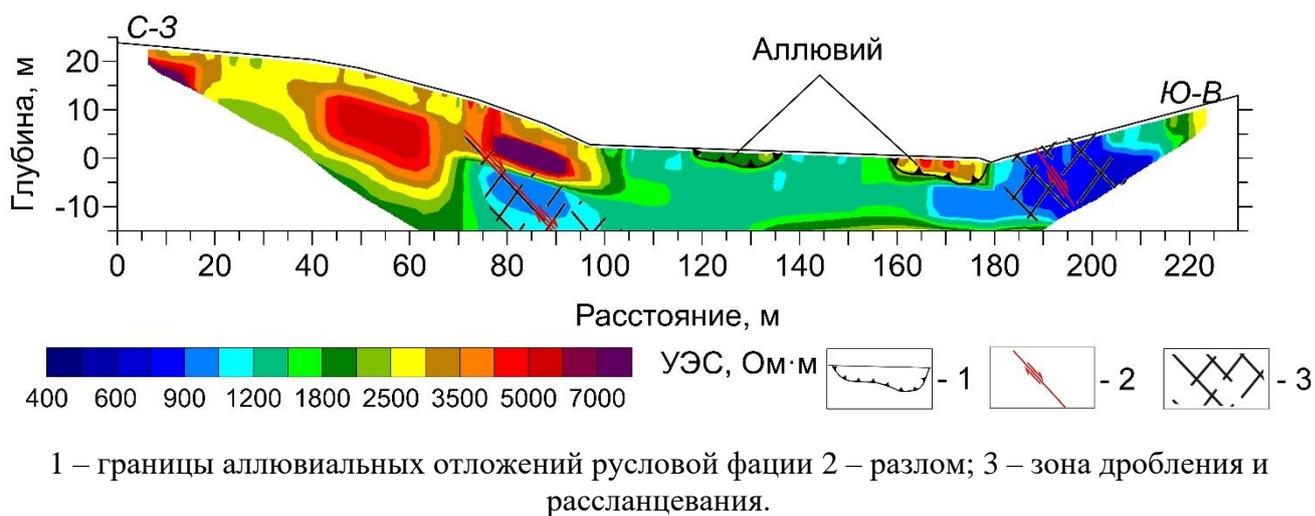
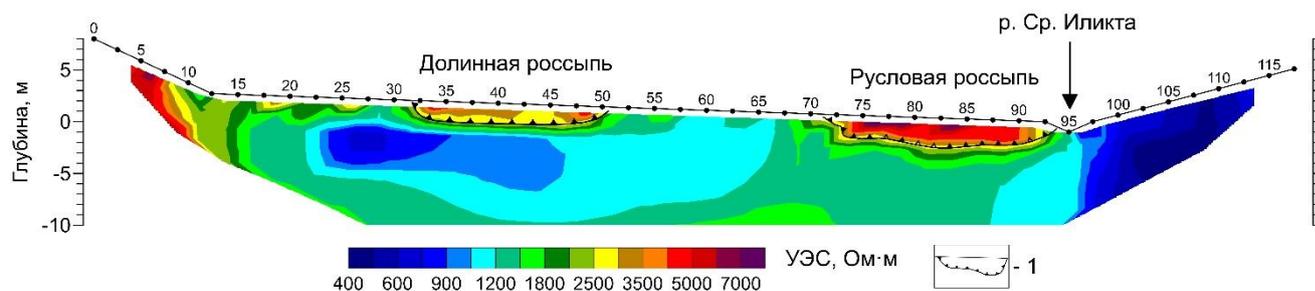


Рисунок 3.16 – Геоэлектрический разрез по результатам двумерной инверсии с элементами интерпретации

Вдоль линии этого же профиля были выполнены зондирования ЭТ с уменьшенным в 2 раза шагом между электродами (2,5 м), что позволило точнее определить границы аллювиальных отложений. 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 (Рисунок 3.17), что согласуется с априорной геологической информацией. Этот эксперимент ещё раз подтверждает факт завышения определяемой по данным метода ЭТ мощности слоя, в данном случае на 40–50 %.



1 – граница русловой фации аллювия

Рисунок 3.17 – Геоэлектрический разрез по профилю 6, полученный с шагом измерений 2,5 м.

Отмечается разница в УЭС аллювия на двух выделенных интервалах. Второй участок 155-180 м примыкает к современному руслу реки. Возможно, речной поток проходил здесь на предыдущей стадии развития реки. Первый же участок на 115-140 м расположен в долине. Анализ показал, что отложения на втором участке, представленные хорошо промытыми валунно-галечниковыми породами, имеют более высокое УЭС, а россыпь относится к русловому типу. Песчаный и суглинистый заполнитель уменьшает УЭС валунно-галечниковых отложений палеоруслу (долинной россыпи), расположенного в долине реки, на расстоянии от современного речного потока. Выявленная закономерность подтверждается и геоэлектрическим разрезом на р. Ануй (см. рис. 3.15).

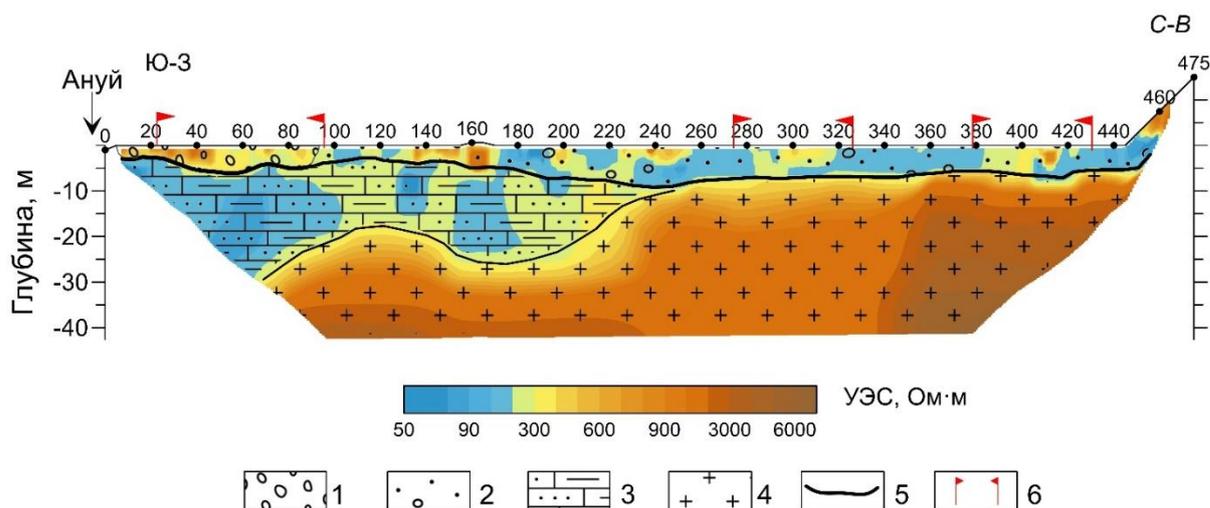
В результате работ на р. Средняя Иликта установлено, что выделяемые приповерхностные аномалии высокого (более 2000 Ом·м) УЭС соответствуют перспективным на золотоносность отложениям русловой фации палеорусел. Данные ЭТ подтверждены шурфовкой, однако низкое содержание золота в пробах не позволило начать разработку россыпи.

На примерах полевых экспериментов в Алтайском крае и Прибайкалье показано, что в условиях низкоомного плотика нижняя граница аллювиальных отложений однозначно определяется из-за контраста высокого УЭС валунно-галечниковых отложений и низкого УЭС выветрелых пород плотика. Такие геологические условия, где плотик представлен выветрелыми или трещиноватыми породами вблизи своей кровли, являются частыми для речных долин.

3.4.3. Аллювиальная россыпь в условиях высокоомных пород плотика

В редких случаях встречаются геологические обстановки, где УЭС плотика равно или выше УЭС аллювия, т. е. отсутствует яркий контраст между электросопротивлением рыхлых и коренных пород.

Как уже было сказано выше, в пределах Ануйского рудно-россыпного узла присутствуют различные геологические комплексы. На профиле в долине р. Ануй, где отложения частично перемыты, геоэлектрический разрез имеет сложное строение, что затрудняет однозначную геологическую интерпретацию и выделение кровли коренных пород (Рисунок 3.18). В интервале профиля 240–440 м, где коренные породы представлены гранодиорит-порфирами, мощность рыхлых отложений определяется достаточно очевидно по слою относительно низкого УЭС на фоне высокоомного плотика. Она оценивается порядка 6 м. Однако в интервале профиля 0–220 м, где породы плотика представлены глинистыми сланцами и алевролитами, кровля коренных пород определяется не так однозначно, а лишь в тех местах, где русловые аллювиальные отложения имеют повышенное УЭС относительно пород плотика, например, в интервале 0–90 м. Эти же участки повышенного УЭС в верхнем слое интерпретируются как перспективные на россыпное золото.



1 – русловой аллювий (галечник); 2 – песчано-галечниковые отложения; 3 – глинистые сланцы и алевролиты; 4 –гранодиорит–порфиры; 5 – подошва аллювиальных отложений (кровля плотика); 6 – границы перспективных участков отработки россыпи.

Рисунок 3.18 – Геоэлектрический разрез в долине р. Ануй

По результатам исследований россыпей, расположенных на высокоомном плотике, сделаны выводы, что границу между ними можно провести при следующих условиях.

При достаточно высоком содержании песчано-глинистого заполнителя, когда аллювий представлен преимущественно пойменными отложениями, УЭС аллювиальных отложений понижается, граница определяется точно. При этом внутри слоя аллювия можно определить высокоомные области отложений фации плёсов и перекатов. Но в этом случае затруднительно определить границу между отложениями пойменной фации и низкоомными выветрелыми коренными породами.

3.4.4. Электротомография в условиях льдистых пород

Россыпные месторождения золота в Забайкалье, в Приамурье, на Дальнем Востоке, в Восточной Сибири (Енисейский кряж, Ленский и Алданский районы) частично или полностью расположены в условиях криолитозоны (ММП сплошного или островного типов распространения).

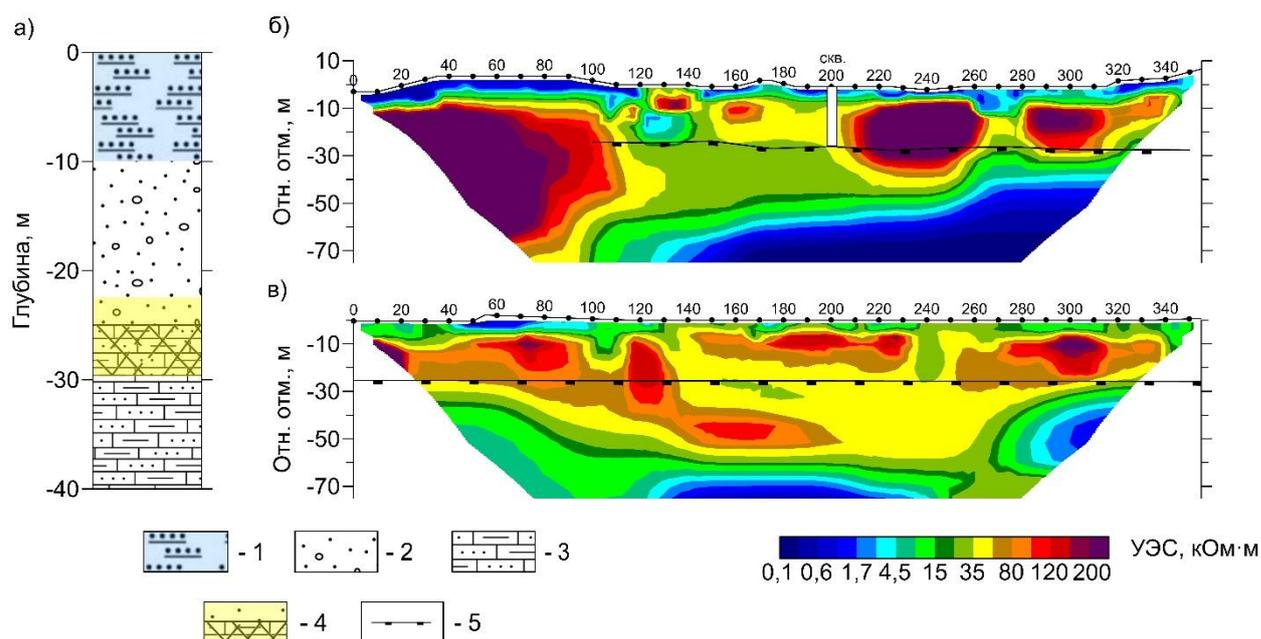
Опытные работы методом ЭТ были проведены в Магаданской области на обрабатываемой россыпи руч. Тырсеях. Согласно карте распространения многолетнемерзлых грунтов на территории Российской Федерации (Геокриологическая карта СССР, 1991) россыпь расположена в зоне распространения сплошной мерзлоты. Коренные породы на ручье представлены алевролитами, выветрелыми вблизи кровли (Рисунок 3.19, а). Выше залегают аллювиальные отложения ручья. Граница между рыхлыми и коренными породами на исследуемом полигоне по данным бурения находится на глубине 27 м. Золотоносный пласт выявлен вблизи нижней границы аллювия и кровли плотика (глубина 25–30 м). Аллювиальные отложения перекрыты льдистыми торфами мощностью до 10 м.

Из-за мёрзлой вскрыши (льдистые торфа) россыпь обрабатывается постепенно: на ограниченном по площади полигоне снимают несколько метров талой вскрыши, ждут растепления нижележащих отложений, затем их убирают и так до момента вскрытия золотоносного пласта, который также обрабатывают постепенно из-за мёрзлого состояния. В момент проведения электрических зондирований на полигоне было снято от 5 до 10 м льдистых торфов.

Профили ЭТ проходили через полигон и за его пределами. Зондирования выполнены с использованием трехэлектродной установки с расстоянием между электродами 5 м. На геоэлектрическом разрезе по профилю через полигон (Рисунок 3.19, б) верхняя часть разреза до глубины около 5 м имеет пониженное УЭС (менее 1 кОм·м), что связано с влиянием сезонноталого слоя. Ниже глубины 5 м в интервалах выделяются локальные аномалии УЭС более 100 кОм·м. Такие аномалии однозначно интерпретированы как льдистые породы. Уменьшение УЭС в нижней части разреза вызвано пиритизированными алевролитами (установлено на вскрытой части полигона). В целом из-за наличия высокоомной льдистой верхней части разреза геоэлектрическую модель сложно интерпретировать.

Значения УЭС на геоэлектрическом разрезе по профилю за пределами вскрытого полигона (Рисунок 3.19, в) превышают 10 кОм·м, что означает высокую

льди́стость ММП. Полученный геоэлектрический разрез не подвергается интерпретации и не соответствует известному геологическому строению участка.



1 – льдистые торфа, 2 – аллювий, 3 – алевролиты, 4 – золотоносный пласт на границе аллювия и трещиноватого плотика, 5 – кровля плотика по данным бурения

Рисунок 3.19 – Геологическая колонка отложений на руч. Тырселях (а) и геоэлектрические разрезы ЭТ через обрабатываемый полигон (б) и за пределами полигона (в).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ геологического строения аллювиальной россыпи показал, что при поисках и разведке на россыпное золото объектом для геофизических исследований являются отложения фации плёсов и перекатов. Они представлены крупнозернистыми отложениями – галечником, щебнем и валунами с песчаным и глинистым заполнителем, залегающими на плотике и перекрытыми более мелкими отложениями пойменной фации (пески, глины). Основываясь на геологической модели аллювиальной россыпи, фациальном составе отложений и на известных зависимостях УЭС от состава пород, разработана геоэлектрическая модель речной долины с палеоруслом для расчёта прямой и обратной задач и выявления критериев интерпретации данных электротомографии.

Численные и физический эксперимент на моделях аллювиальных россыпей подтвердили эффективность метода электротомографии для выделения высокоомных отложений русловой фации и определения морфологии кровли коренных пород.

Исследования, проведённые в различных регионах (Камчатка, Алтайский край и Прибайкалье), выявили характерные признаки русловой фации аллювия – корытообразные аномалии с повышенным УЭС от 300 до нескольких тысяч Ом·м на геоэлектрических разрезах. В плане эти зоны формируют протяжённые лентообразные высокоомные аномалии, соответствующие палеоруслу.

Исследования продемонстрировали, что УЭС современных русловых россыпей значительно превышает показатели УЭС русловой фации долинных и террасовых россыпей, что даёт возможность различать эти виды россыпей на геоэлектрических разрезах.

На примере полевых исследований в зоне распространения высокольдистых ММП показано, что по данным ЭТ невозможно установить глубину залегания поверхности плотика из-за экранирующего влияния высокоомного слоя мёрзлых пород. Лдистые высокоомные отложения в верхней части разреза являются ограничением для применения метода ЭТ для поисков и разведки россыпей.

В итоге сформулирован 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 палеоруслу

Задачей геофизических исследований при поисках и разведке погребённых аллювиальных россыпей является выявление их не только в разрезе, но и в плане, поэтому требуется определить необходимый масштаб и детальность съёмки (Пустозеров, Тригубович, 2017; Давыдов, Бакаев, 2012). Для относительно прямолинейных неразветвленных и врезанных русел контур россыпи – это узкие ленточные залежи с наибольшей концентрацией металла в русловых отложениях (Чалов, 2016). Согласно (Методическое руководство ..., 1982) при поисках аллювиальных россыпей поисковые линии закладывают поперёк долины с расчётом полного её пересечения. Следовательно, рационально располагать геофизические профили ортогонально простиранию долины, как и разведочные и буровые линии. Рассмотренный в Главе 2 опыт предыдущих работ на россыпях показал, что исследования часто выполняются по отдельным профилям при поисковых работах, а если на стадии разведочных работ съёмка проведена в площадном варианте, то вопрос выбора сети наблюдений методом ЭТ в публикациях не рассматривается.

Геологическая задача будет решена в том случае, когда сеть геофизических наблюдений оптимальна, т. е. с заданной вероятностью позволяет определить геометрические параметры объекта исследования при наименьших затратах средств (Никитин, Хмелевской, 2004; Долгаль, 2012). Следовательно, расчёт оптимальной сети сводится к оценке параметра E , являющегося отношением величины индекса стоимости K к вероятности подсечения объектов P . Чем меньше K , тем экономически выгоднее данная сеть. Однако вероятность обнаружения объектов, а следовательно, и надёжность опосредования территории при этом может оказаться слишком низкой. Геофизические исследования при разведке выполняются в пределах лицензионных площадей, включающих полностью или частично месторождение, а профили располагаются поперёк долины реки. Так, при картировании вероятность обнаружения погребённого руслового аллювия равна 1. Тогда расчёт параметра E сводится только к экономическим затратам. Однако для

восстановления формы палеорула в плане требуется выполнение следующих условий. Согласно инструкции к программе трёхмерной инверсии (Loke, 2005) и рекомендациям при площадных исследованиях методом ЭТ (Gharibi, Bentley, 2005) для восстановления формы объекта расстояние между профилями не должно превышать двух–четырёхкратного расстояния между электродами. Однако при такой детальности слишком велики временные и экономические затраты, следовательно требуется разрежение сети наблюдения до допустимого уровня. Отсюда возникает задача **установления оптимальных параметров сети наблюдения методом ЭТ для картирования палеорула при поисковых и разведочных работах на россыпное золото.**

Решение поставленной задачи подробно приведено в публикации (Осипова и др., 2023). Основой для решения задачи являлись данные ЭТ, полученные в ходе физического эксперимента на модели долины реки с палеорулом. Для верификации результатов физического моделирования было выполнено трёхмерное численное моделирование электрических полей. Апробация проводилась в долине реки Иликта в Прибайкалье и на россыпном месторождении золота Кичаваям в Пенжинском районе Камчатского края.

4.1. Физический эксперимент

Параметры физической модели и методика эксперимента изложены в разделе 3.4.

В рамках эксперимента на модели проведены площадные зондирования с расстоянием между профилями (y) равным 2 см, что обеспечивает максимальную плотность наблюдений. При выполнении трёхмерной инверсии расстояние между профилями разряжалось и изменялось от 2 до 12 см (от $2a$ до $12a$), что при полевых исследованиях с шагом 5 м соответствует масштабам съёмки 1:1000, 1:2000, 1:3000, 1:4000, 1:5000 1:6000 соответственно.

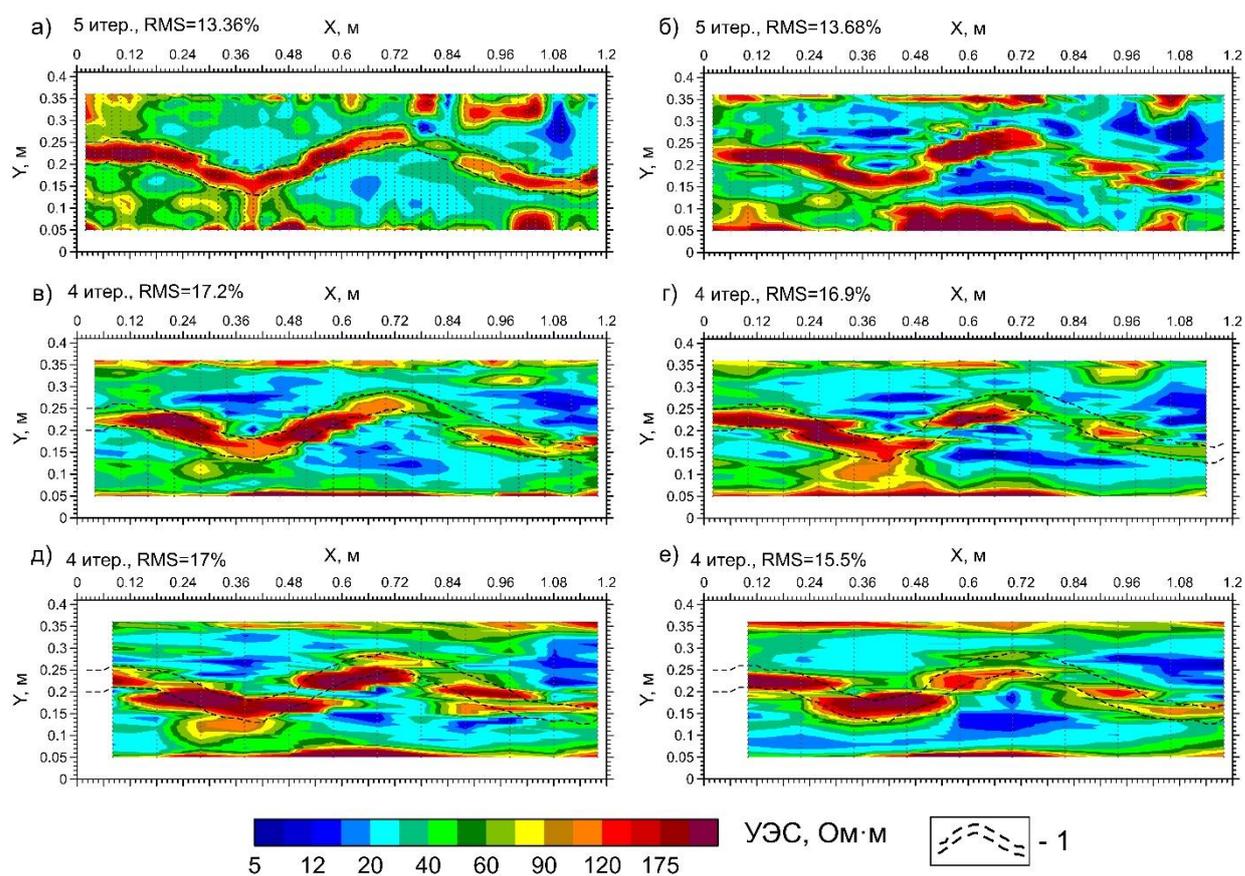
Трёхмерная инверсия в программе Res3DINV (Loke, 2018) проводилась для набора данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения ($y=2a$,

или 2 см). Затем решение обратной задачи выполнялось для разряженных до нужного масштаба данных ($4a$, $6a$ и т.д.). Для корректного решения задачи учитывалось положение удалённого электрода и использовалась робастная инверсия с настройками программы по умолчанию.

«Для анализа использованы карты распределения УЭС на глубине 0,022 м (Рисунок 4.1), на которой в физической модели расположено палеорусло. При максимальной плотности сети наблюдения на карте УЭС палеорусло чётко выделяется лентообразной аномалией интенсивностью 100–400 Ом·м на фоне 10–70 Ом·м. Локальные аномалии за пределами палеорусла во вмещающей среде возникают из-за неидеальности моделируемой системы и бокового влияния стенок бака, но рассматриваются как «реальный» геологический шум» (Осипова и др., 2023).

«При разрежении интервала между профилями от $4a$ до $6a$ аномалия рассыпается на отдельные фрагменты. Поскольку известно, что палеорусло имеет лентообразную форму, отдельные аномалии при интерпретации можно объединить в некую единую структуру. При дальнейшем увеличении параметра y от $8a$ до $12a$ объединить отдельные аномалии затруднительно» (Осипова и др., 2023).

Таким образом, форма палеорусла прослеживается, когда интервал между профилями (y) не превышает $6a$, где a – шаг между электродами, что при шаге 5 м в реальности соответствует масштабу съёмки 1:3000. При поисковых геофизических работах y может быть увеличено до $10a$, что соответствует масштабу 1:5000. В таком случае сокращение экономических затрат на проведение ЭТ составит (масштаб 1:5000 против 1:3000) 60%. При недостаточном восстановлении модели среды при масштабе 1:5000 рекомендуется выполнять детализацию с масштабом 1:2500 на ключевых участках.



1 – границы палеорусла

Рисунок 4.1. Карты УЭС на глубине 0,022м 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)

4.2. Численный эксперимент

Численное моделирование зондирований, проведённое для сравнения с данными физического эксперимента, выполнялось в два этапа: решение прямой задачи и инверсия данных.

Численная геоэлектрическая модель долины реки с изгибом палеорусла была разработана с использованием программного обеспечения ZondRes3D. Модель включает фундамент из коренных пород, двухслойное палеорусло мощностью 5 м и окружающие глинистые отложения. Электрические параметры слоёв соответствуют значениям удельного электрического сопротивления, полученным в ходе физического моделирования. Геометрические параметры долины скорректированы с учётом масштабного коэффициента (1:500), где

межэлектродное расстояние составляет 5 м. Измерительная сеть включает 20 профилей длиной 155 м, проложенных параллельно с интервалом 10 м. Прямое моделирование электротомографии выполнено для прямой и обратной трёхэлектродных конфигураций установки.

Последующий этап включал экспорт расчётных значений кажущегося сопротивления с добавлением стандартного 5% шума для последующей обработки в Res3DINV. Аналогично физическому эксперименту, трёхмерная инверсия проводилась сначала для данных с максимальной плотностью наблюдений, а затем для разреженной сети, соответствующей требуемому масштабу.

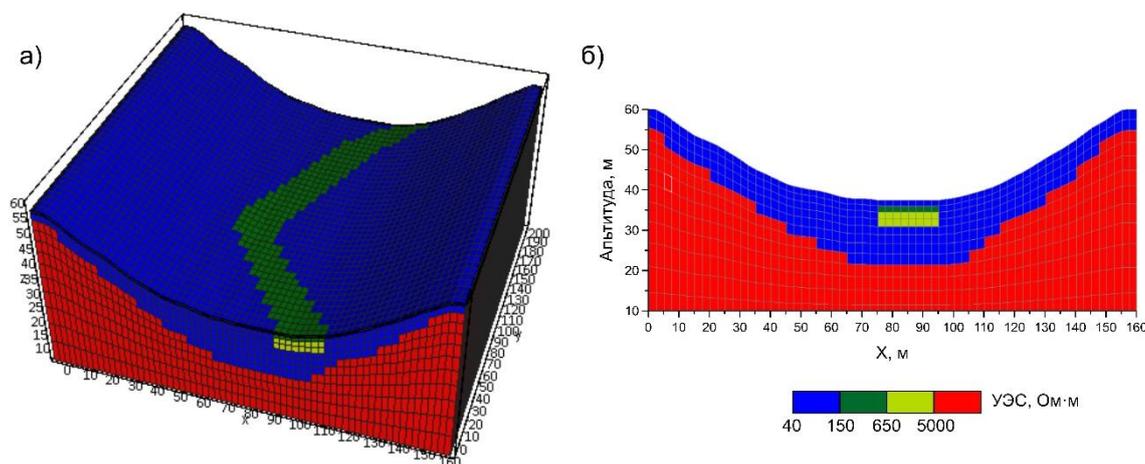
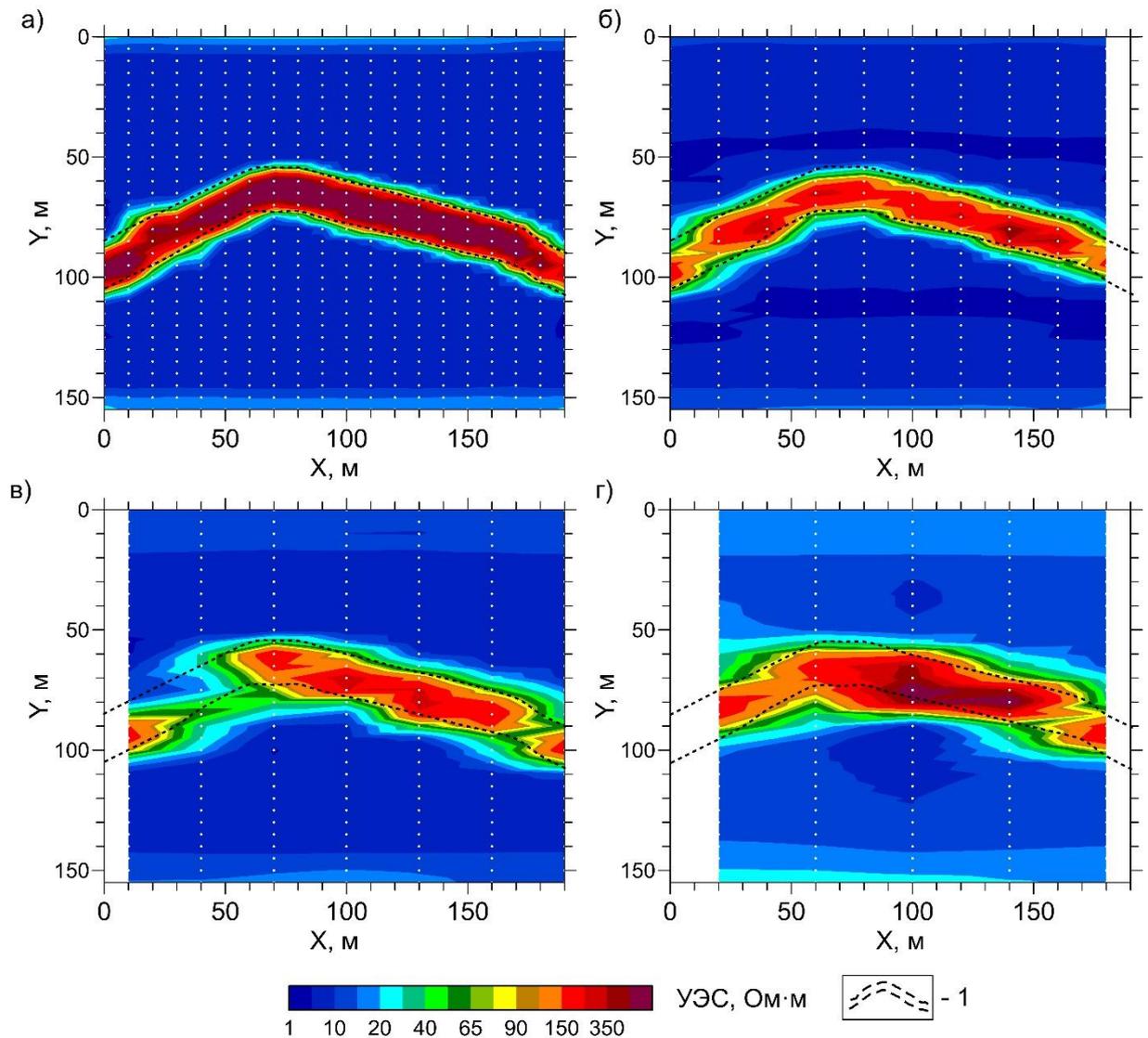


Рисунок 4.2 – Объёмная геоэлектрическая модель (а) и разрез модели вдоль профиля (б) (Осипова и др., 2023)

На карте с максимальной плотностью синтетических данных выделяется отчётливая аномалия УЭС, соответствующая палеоруслу, которая чётко контрастирует с окружающими породами и точно отражает морфологию и размеры структуры. При уменьшении плотности измерительной сети до масштаба 1:2000 (4a), распределение сопротивления в пределах палеорусла становится менее однородным, однако его морфологические особенности сохраняют чёткость. На картах с увеличенным межпрофильным расстоянием до 6a и 8a аномальная зона

фрагментируется, но общая конфигурация изгиба палеоруслу сохраняется различной на удовлетворительном уровне.



1 – границы палеоруслу

Рисунок 4.3 – Карты УЭС на глубине 3,5 м с интервалом между профилями: а – 2а (10 м), б – 4а (20 м), в – 6а (30 м), г – 8а (40 м). (Осипова и др., 2023)

Экспериментальные исследования выявили, что восстановление формы палеоруслу шириной 4а, характеризующегося пологими излучинами и коэффициентом извилистости 1,1-1,4, возможно при межпрофильном интервале до 6а, что соответствует интервалу 30 м при 5-метровом межэлектродном шаге. Натурные эксперименты продемонстрировали возможность увеличения

межпрофильного интервала до $10a$ при поисковых работах, что при 5-метровом межэлектродном расстоянии эквивалентно масштабу 1:5000 с интервалом 50 м.

Для русловых структур шириной более $4a$ допустимо расширение межпрофильного интервала для оптимизации экономической эффективности исследований. При увеличении степени извилистости до значения 2 для детального картирования изгибов требуется уменьшение расстояния между профилями. При исследовании русел с петлеобразными ($l/L > 2$; $l = 2,8hи$; $r = 3,8bp$; $L/hи > 1$) и синусоидальными ($l/L > 2$; $l = 2,5hи$; $r = 2bp$; $L/hи > 1$) изгибами, где протяжённость крыльев превышает шаг меандра, рекомендуется ориентировать измерительную сеть вдоль речной оси.

«Численным моделированием подтверждено, что метод ЭТ позволяет оконтуривать в плане высокоомные отложения извилистого палеорула. Однако на картах, полученных на основе синтетических данных, палеоруло выделяется более отчётливо на фоне вмещающей среды из-за однородного геоэлектрического строения отложений в модели и отсутствия естественных геологических шумов. Без априорной информации о контуре палеорула по данным численного моделирования (Рисунок 4.2, г) возможно восстановить контур русла на карте, по данным физического эксперимента (Рисунок 4.1, г) – затруднительно. Если бы выводы основывались только на результатах численного моделирования, можно было бы сделать ложные выводы о более высокой разрешающей способности метода ЭТ при разряженной сети наблюдений.» (Осипова и др., 2023).

4.3. Полевой эксперимент

4.3.1. Россыпное месторождение золота Кичаваям в Пенжинском районе Камчатского края

Результаты опытно-методических работ, проведённых на террасовых россыпях руч. Кичаваям, приведены в разделе 3.4. Положение линии профиля вдоль разведочной траншеи позволило установить критерии интерпретации данных электротомографии. «В пределах лицензионной площади были выполнены

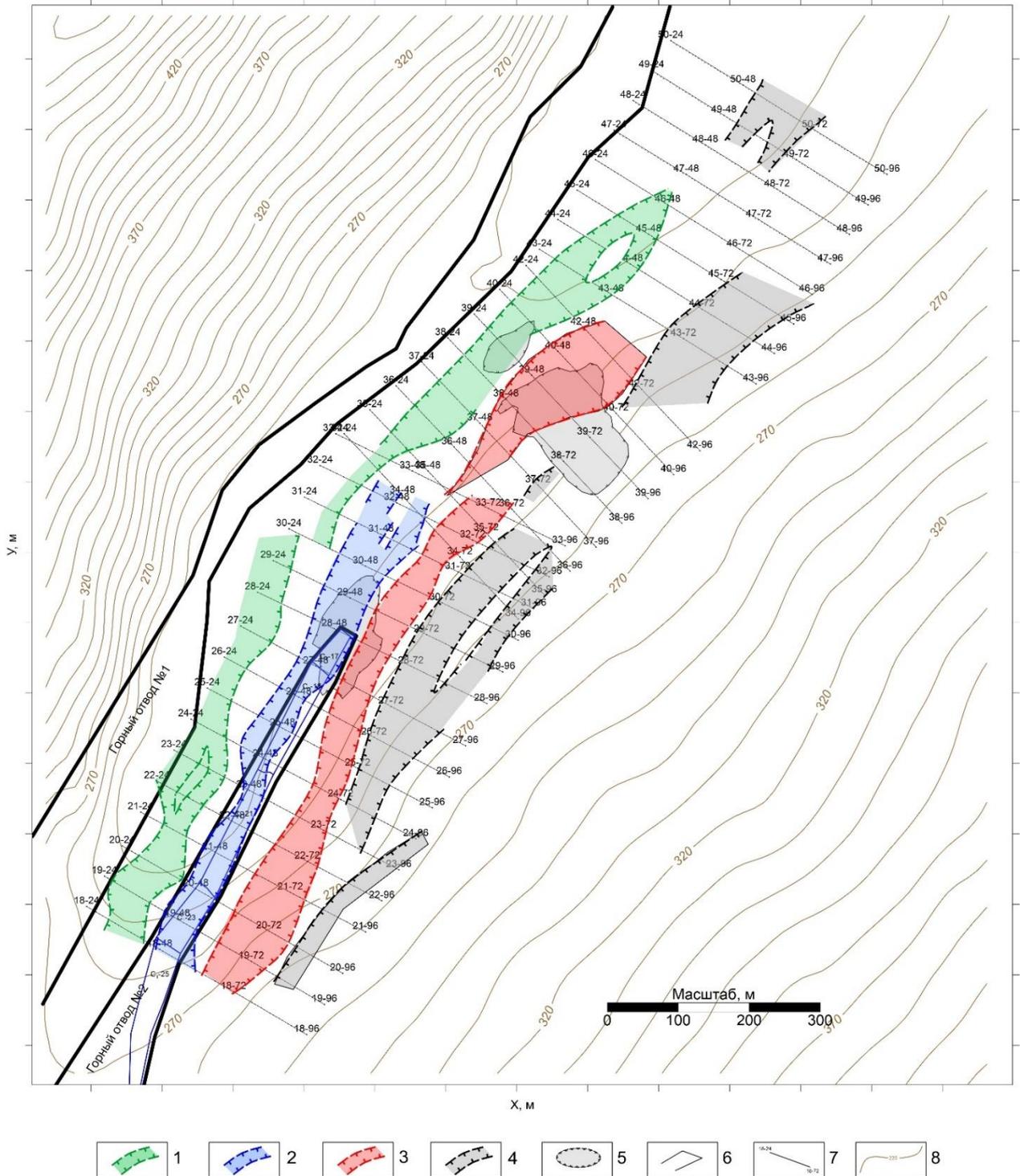
площадные исследования по 32 профилям с интервалом 50 м друг от друга, что соответствует масштабу съёмки 1:5000. Измерения проведены с использованием многоэлектродной станции Скала-48K12. Измерения на профилях длиной 475 м были выполнены по технологии «roll-along» (Dahlin, Bernstone, 1997). При этом часть измерительной линии переносили на 120 м вперёд по линии профиля, что позволяло перекрывать половину предыдущей расстановки. Последовательность подключения электродов соответствовала установке Шлюмберже. Разносы АВ варьировались от 15 до 235 м при шаге наблюдений 5 м, что обеспечило глубину исследований более 25 м» (Оленченко, Осипова, 2022).

На карте распределения УЭС, полученной по результатам 3-D инверсии, на площади исследований не удалось выявить лентообразные высокоомные аномалии, связанные с золотоносными аллювиальными отложениями русловой фации из-за влияния ММП. В связи с этим использован подход межпрофильной корреляции, который представляет собой процесс сопоставления и прослеживания геоэлектрических аномалий между соседними профилями наблюдений для создания целостной картины распределения УЭС на изучаемой площади. Этот процесс позволяет достоверно определить пространственное положение, геометрию и характеристики геологических объектов путём анализа непрерывности и изменчивости геоэлектрических свойств, а также отбраковать случайные или ложные аномалии, не имеющие подтверждения на соседних профилях.

На геоэлектрических разрезах, полученных по результатам 2-D инверсии данных, на каждом профиле выделены и вынесены на план местности контуры палеорусел. «В результате получена схема распространения отложений русловой фации (Рисунок 4.4). Контур горного отвода № 1 был отработан в предыдущие годы, а контур горного отвода № 2 разрабатывался после геофизических исследований, что дало возможность сопоставить результаты электротомографии и реального строения участка. Всего на площади исследований выделяются четыре разновозрастных палеорусла, в то время как по данным бурения 80-х годов установлены одна русловая и одна пойменная россыпи (горные отводы № 1 и № 2).

Сопоставление схемы распространения русловой фации и схемы расположений буровых линий говорит о том, что при поисковых работах практически не была подсечена бурением зона 1, так как она располагается на современном относительно крутом ($20\text{--}25^\circ$) склоне, а её протяжённость порядка 1300 м. Буровые линии пересекают зону 1 только между профилями 18 и 24. В скважинах отмечено золото, содержание которого на пласт изменяется до $0,21\text{ г/м}^3$, что говорит о перспективности этой зоны. Выделенная по геофизическим данным зона 2 чётко укладывается в контур горного отвода № 2 с блоками подсчитанных запасов. Зона 3 расположена выше зон 1 и 2 по гипсометрическому уровню, она прослежена по простиранию на протяжении 780 м от профиля 18 до профиля 33. Ширина зоны 35–85 м, в среднем около 45 м. В верхней части профилей выделяется зона 4 протяжённостью около 1200 м. Она подсечена выносной буровой линии, а в скважинах отмечено содержание золота на пласт от $0,05$ до $1,43\text{ г/м}^3$, что говорит о целесообразности её детальных исследований» (Оленченко, Осипова, 2022).

На площади исследований между профилями 27–30 и 38–42 были выделены локальные высокоомные аномалии, связанные с многолетнемерзлыми породами (ММП) островного типа. Наличие таких островов мерзлоты следует учитывать при планировании горных работ, так как вскрыша ММП требует существенных технических и временных затрат.



1 — границы зоны № 1 отложений русловой фации; 2 — границы зоны № 2 отложений русловой фации; 3 — границы зоны № 3 отложений русловой фации; 4 — границы зоны № 4 отложений русловой фации; 5 — границы многолетнемерзлых пород; 6 — контур горного отвода; 7 — геофизический профиль (номер профиля-номер электрода); 8 — изогипсы рельефа (м).

Рисунок 4.4 – Схема распределения аллювиальных отложений русловой фации по геофизическим данным (Оленченко, Осипова, 2022)

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

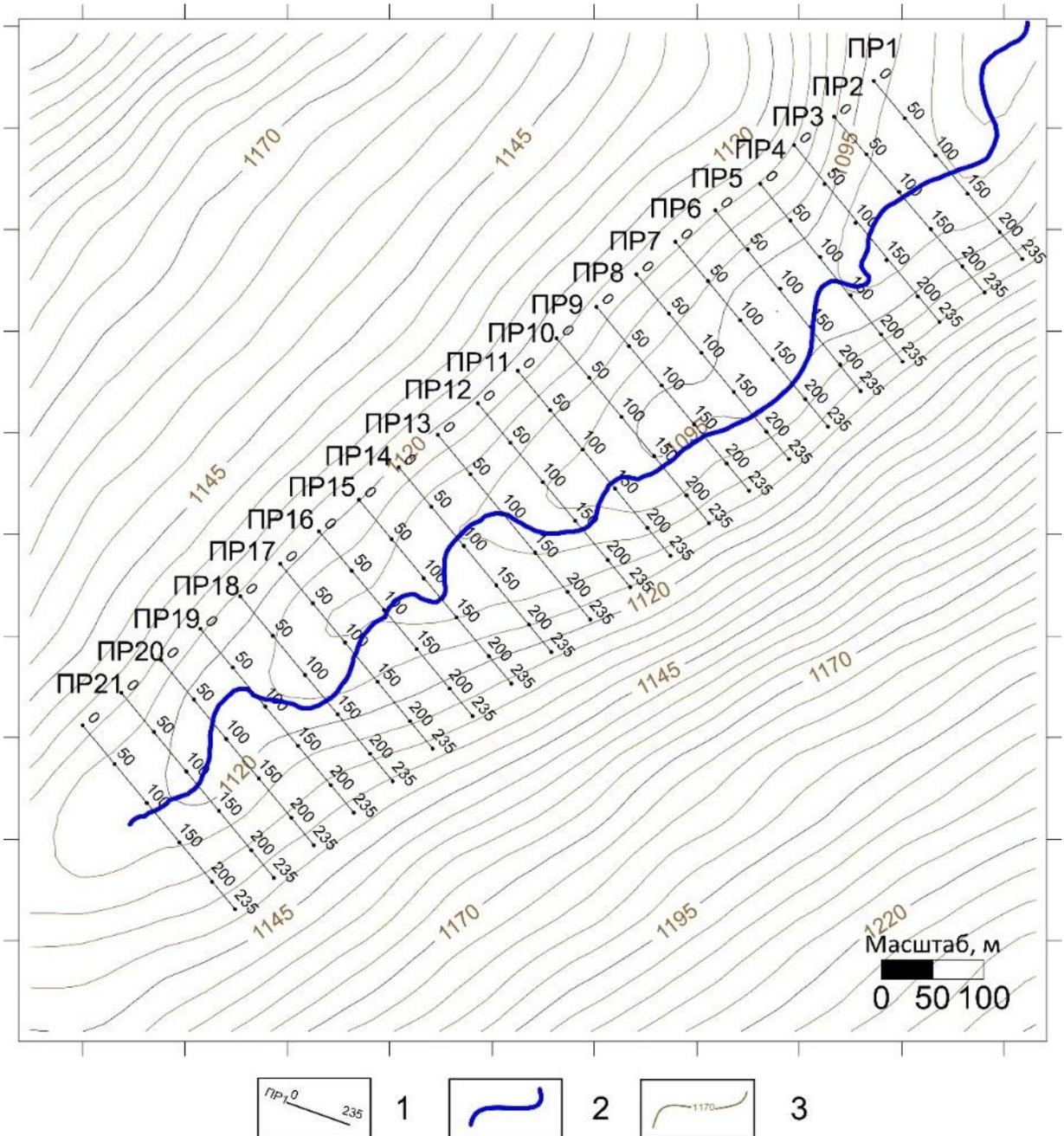
На основе проведённых работ имеются основания рекомендовать использование подхода межпрофильной корреляции, которые могут послужить основой для построения карт распределения УЭС, а следовательно, и геологических структур.

4.3.2. Прибайкалье

В разделе 3.4.1 приведена геологическая характеристика участка исследований на р. Иликта в Прибайкалье и показан пример геоэлектрического разреза, полученного во время полевых работ. Здесь также проводилась площадная съёмка по серии параллельных профилей, расположенных ортогонально речной долине на расстоянии 50 м друг от друга (Рисунок 4.5).

На карте изом, полученной по результатам 3-D инверсии данных, по глубине 0–2,5 м выделяются вытянутые аномалии высокого УЭС в виде прерывающихся следов потоков (Рисунок 4.6). В плане эти зоны отражают участки отложения русловой фации (валунно-галечниковые отложения), перспективные на золотоносность.

Помимо выделения контура палеорусла, задачей геофизических исследований является определение мощности рыхлых отложений и глубины залегания кровли плотика. В процессе интерпретации геоэлектрических разрезов была определена глубина залегания кровли коренных пород плотика в долине р. Средняя Иликта и построена карта мощности рыхлых отложений (Рисунок 4.7) с поправкой на завышение мощности аллювия в 1,5 раза при шаге между электродами 5 м. В результате по данным ЭТ локализуются несколько участков с повышенной до 3–4 м мощностью (карманы). Наиболее протяжённый карман размером около 30×120 м выделяется между профилями 14–17. В его контурах на местности обнаружены старые, добычные или разведочные, шурфы (Рисунок 4.8).



1 – профиль ЭТ; 2 – современное русло р. Средняя Иликта; 3 – изогипса рельефа

Рисунок 4.5 – Схема расположения профилей электротомографии

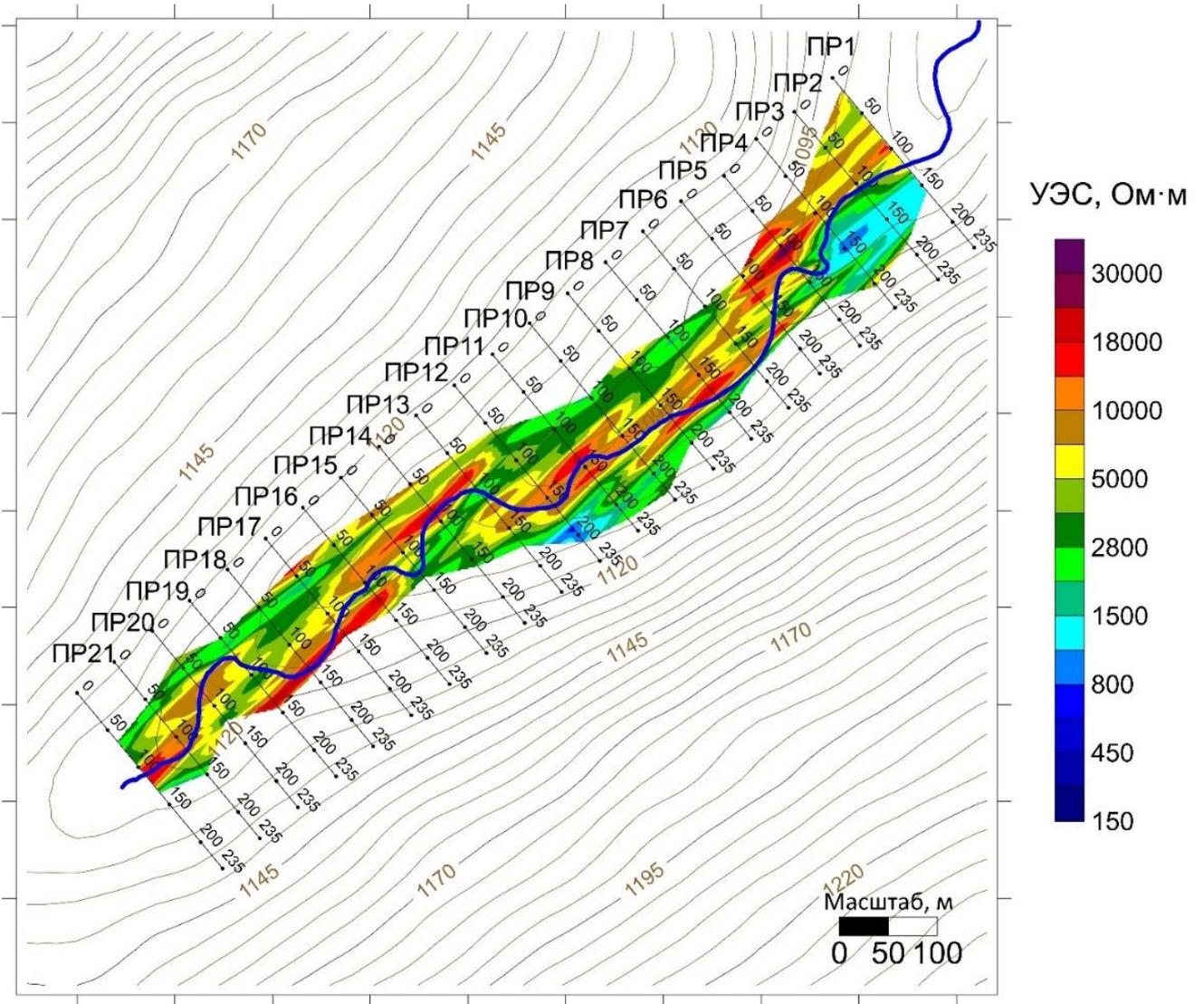


Рисунок 4.6 – Карта распределения УЭС на глубине 0–2,5 м по данным 3-D инверсии на р. Средняя Иликта

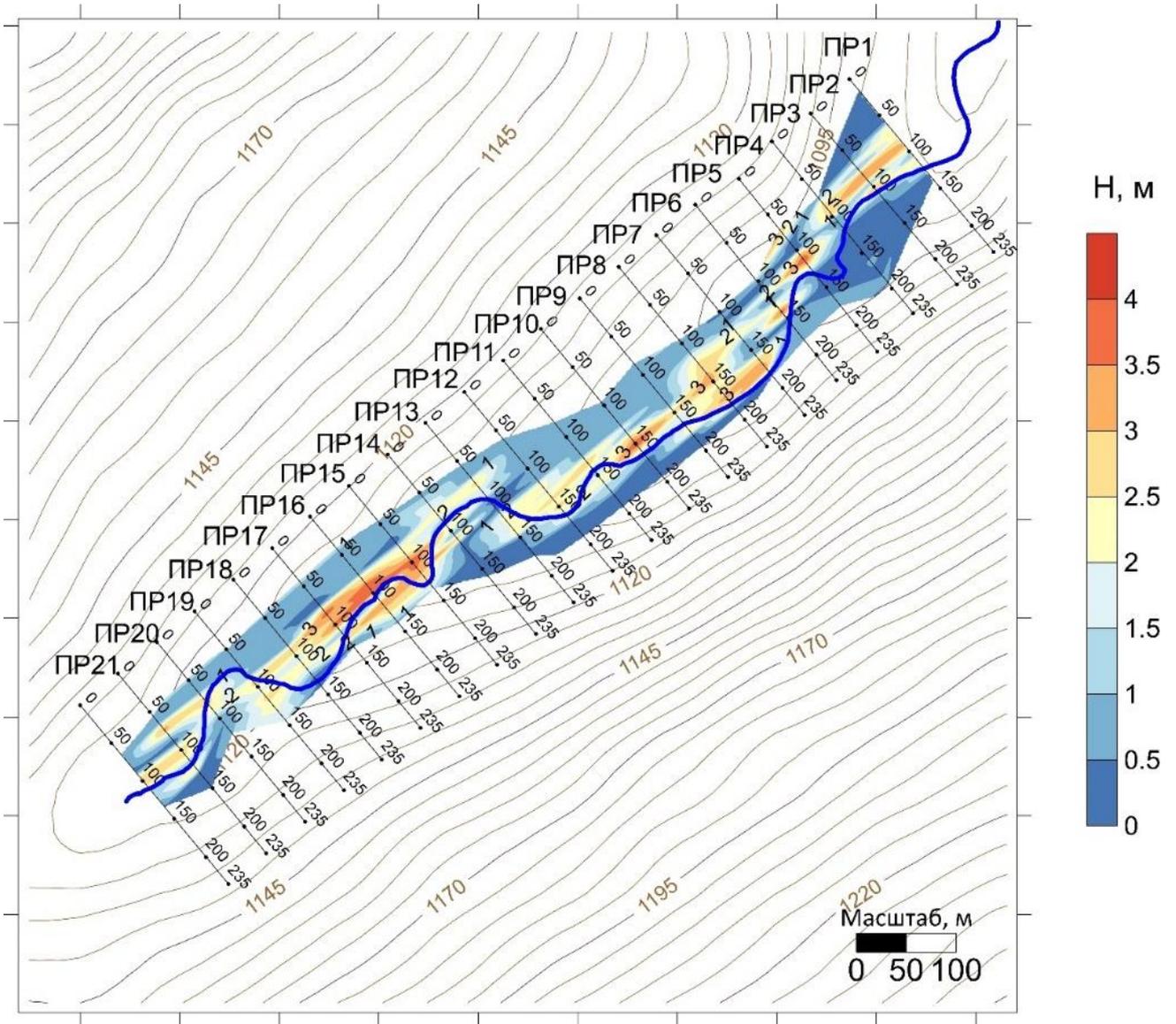
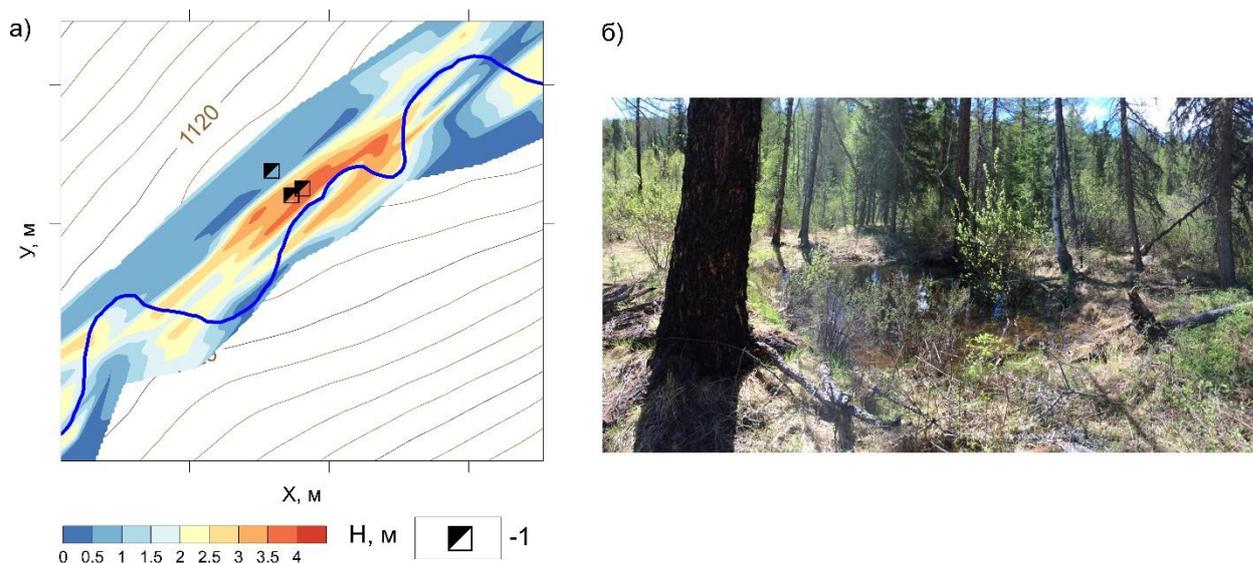


Рисунок 4.7 – Карта мощности рыхлых отложений по данным электротомографии на р. Средняя Иликта



1 – старые шурфы

Рисунок 4.8 – Фрагмент карты мощности рыхлых отложений по данным электротомографии на р. Средняя Иликта (а) и фотография местности со старым шурфом (б)

4.4. Расчёт прогнозных ресурсов аллювиальной россыпи золота по результатам площадной съёмки электротомографии

Согласно Классификации запасов и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых (утв. Приказом МПР РФ от 11 декабря 2006 г № 278), основываясь на положительной оценке выявления проявлений полезного ископаемого комплексом геологической съёмки, геофизических и геохимических аномалий, возможна оценка прогнозных ресурсов категории P_2 , а после заверочных работ – для оценки запасов категории C_2 .

По результатам зондирований в районе Приморского хребта установлены границы отложений русловой фации перспективной на золотоносность. Выявленные аномалии оконтурены в подсчётные блоки для оценки прогнозных ресурсов категории P_2 (Рисунок 4.9).

По результатам геологоразведки в выделенных аномалиях встречаются единичные знаки золота в галечниковых отложениях. Вне геофизических аномалий золото не обнаружено вовсе. По результатам опробования участок признан неперспективным. Тем не менее, если бы опробование показало более высокие

содержания и участок оказался бы перспективным, ресурсы были бы оценены по результатам ЭТ следующим образом.

Оценка прогнозных ресурсов в пределах выделенных блоков производилась по формуле:

$$P_2 = S \cdot h_n \cdot C, \quad (4.1)$$

где S – площадь блока; h_n – средняя мощность пласта, 0,5 м; C – среднее содержание золота на пласт, равное 0,55 г/м³.

Площадь блока I равна 27300 м², при этом его прогнозные ресурсы оцениваются в 7,51 кг золота.

Площадь блока II равна 31400 м², а его прогнозные ресурсы составляют 8,64 кг.

Таким образом, потенциал участка долины Средняя Иликта, протяжённостью 1 км, оценивается в 16,15 кг золота.

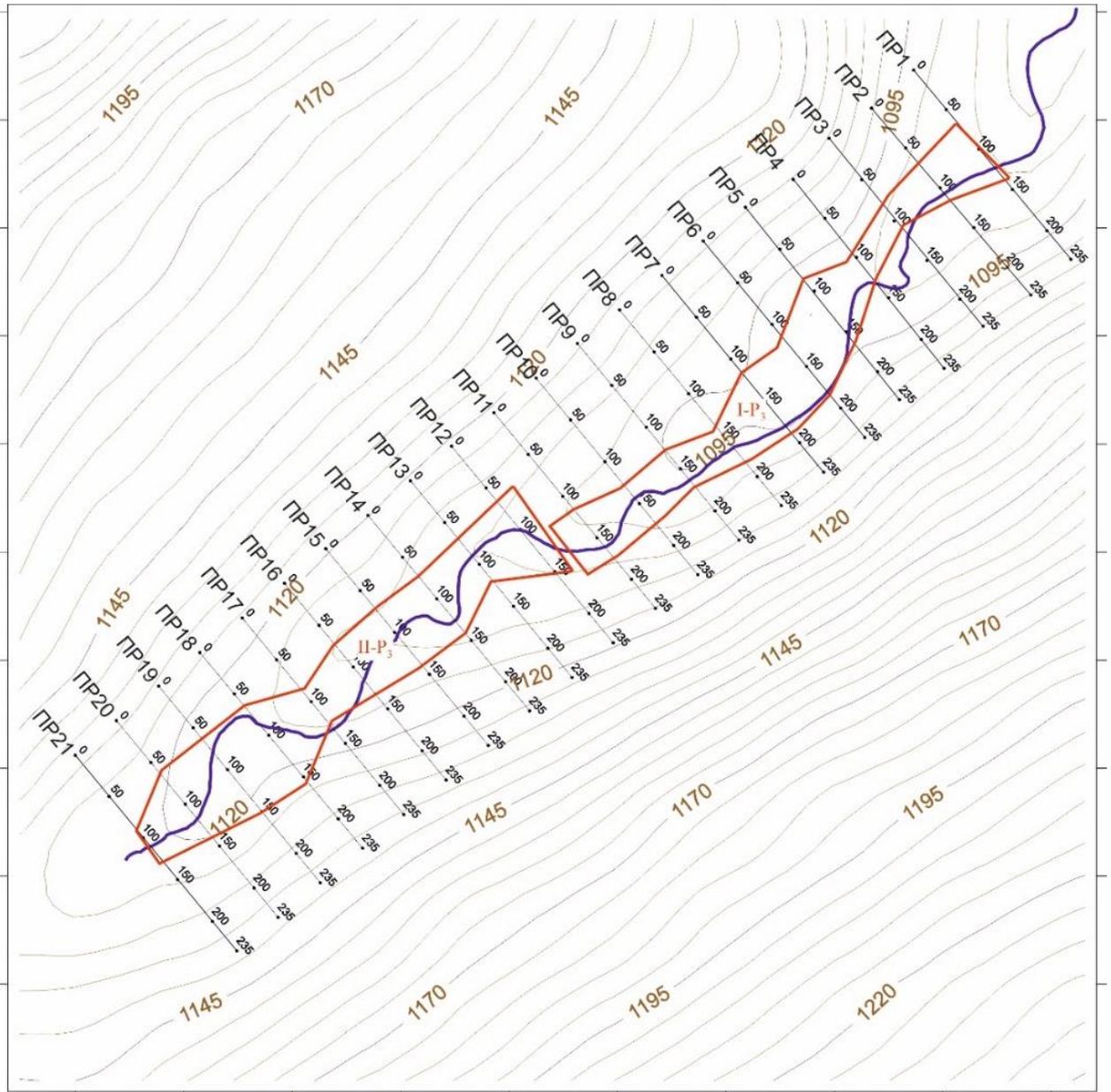


Рисунок 4.9 – Подсчётные блоки, оконтуренные по геофизическим аномалиям, для оценки прогнозных ресурсов по категории P_2

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования, представленные в данной главе, существенно дополняют методические рекомендации по выбору оптимального масштаба полевых исследований методом ЭТ при поисках и разведке аллювиальных россыпных месторождений золота.

Традиционные методики электротомографии предполагают, что для формирования достоверной трёхмерной геоэлектрической модели интервал между

профилями не должен превышать четырёхкратную величину межэлектродного расстояния, что при стандартном шаге 5 м требует межпрофильного расстояния 20 м. Реализация столь детальной съёмки сопряжена со значительными финансовыми затратами. Оптимизация экономической эффективности возможна путём снижения разрежения сети наблюдения до допустимого уровня.

«Комплексное применение физического и численного моделирования позволило установить оптимальные параметры измерительной сети для картирования палеорусла. Анализ карт распределения УЭС показал, что для достоверного определения морфологии палеорусла шириной 20 м целесообразно использование масштаба съёмки не мельче 1:3000, что соответствует интервалу 30 м между профилями. При этом допускается применение масштаба 1:5000 с локальной детализацией до 1:2500 на ключевых участках для повышения экономической эффективности исследований» (Осипова и др., 2023).

Таким образом, 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.**

Рядовые измерения методом ЭТ с шагом 5 м позволяют выявить высокоомные аномалии от аллювиальных отложений, однако мощность этих отложений определяется завышенной в 1,5 раза. Для более точного определения морфометрических параметров россыпи необходимы измерения с шагом 2–2,5 м.

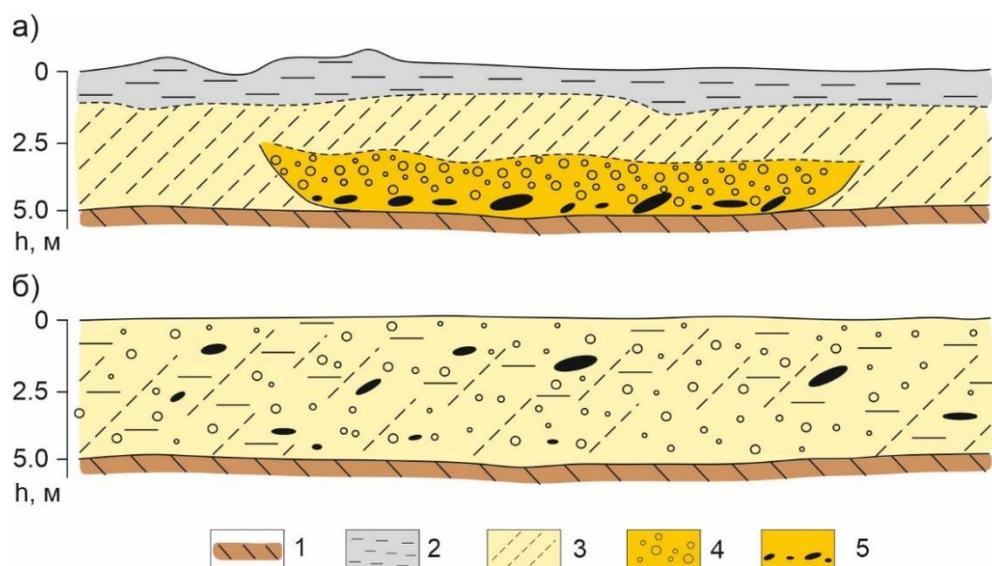
Кроме того, важной рекомендацией при съёмке масштаба 1:5000 является использование межпрофильной корреляции – корреляции от профиля к профилю границ палеорусел, выделенных на двумерных геоэлектрических разрезах.

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

В данной главе будут определены специфические геоэлектрические признаки погребённых перемытых «песков» и «торфов», которые позволяют отличать их от аллювиальных отложений в естественном залегании (целиков). Основой для главы является публикация (Осипова и др., 2022).

Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании составлена (Рисунок 5.1, а) на основе литературных данных (Кухаренко, 1961; Баранников, 1984; Билибин, 1955).

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



1 – коренные породы; 2 – пойменная фация; 3 – фация кос и береговых отмелей; 4 – фация перекатов; 5 – фация плёсов; 6 – восстановленный почвенно-растительный покров

Рисунок 5.1 – Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании (а) и рекультивированного полигона (б) (Осипова и др., 2022)

5.1. Определение критериев на основе численного моделирования

Двумерное геоэлектрическое строение россыпи в естественном залегании характеризуется горизонтальной слоистой средой с включением высокоомной зоны, имитирующей палеорусло (см. Рисунок 5.2, а). Верхний горизонт модели, представленный пойменной фацией, имеет УЭС 100 Ом·м. Нижележащий слой, сформированный фациями кос и береговых отмелей с УЭС 300 Ом·м, содержит высокоомную зону (2500 Ом·м), представляющую собой палеорусло с характерными отложениями фаций плёсов и перекатов. Нижний слой модели – плотик – характеризуется УЭС 30 Ом·м, что соответствует элювиальным выветрелым породам.

В геоэлектрической модели для рекультивированного участка полигона (см. Рисунок 5.2, б) аналогична описанной выше трёхслойной горизонтальной модели. Однако здесь верхний слой техногенного происхождения, имеющий полифациальный состав, демонстрирует однородное значение УЭС, равное 300 Ом·м. Наличие разрозненно распределённых валунов русловой фации в пределах техногенного слоя не оказывает значимого влияния на общую величину УЭС этого слоя. Принципиальное отличие данной модели от целиковой россыпи заключается в отсутствии локального высокоомного включения (палеорусла), что является основой для выявления отработанных россыпей методами электротомографии.

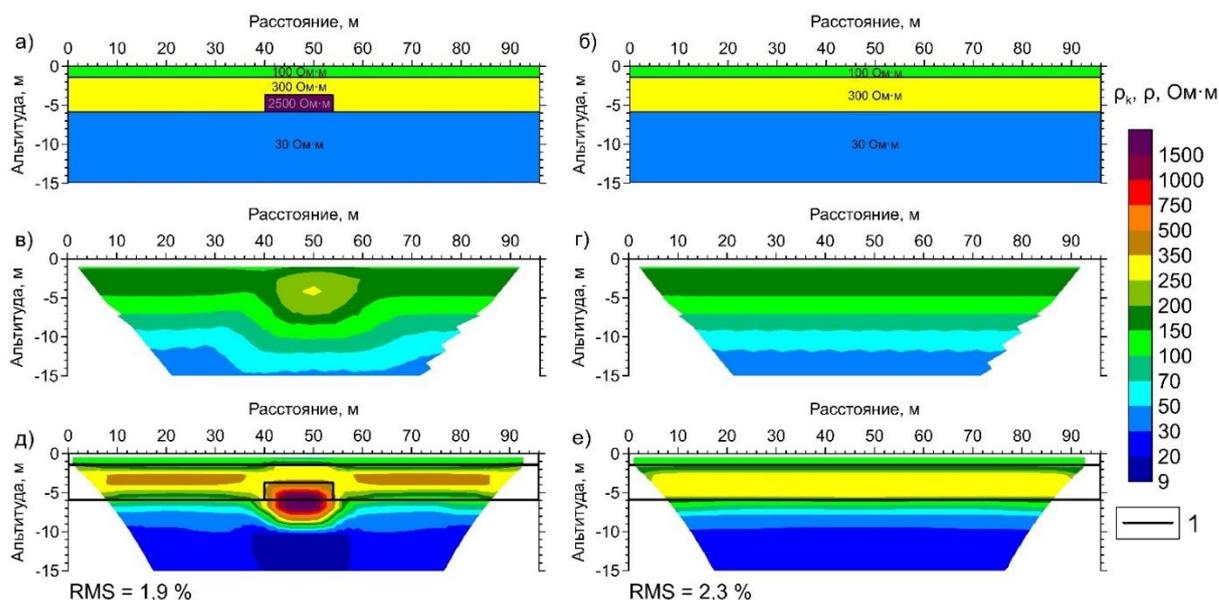
Численное моделирование данных электротомографии выполнялось с помощью программы ZondRes2D. Используются следующие параметры системы наблюдений: трехэлектродная прямая и обратная установки, количество электродов – 48, шаг между электродами – 2 м. Для инверсии модельных данных использована программа Res2DINV.

На разрезе кажущегося сопротивления (ρ_k), рассчитанного в ходе решения прямой задачи, для целиковой россыпи была выявлена аномальная зона повышенного ρ_k , соответствующая палеоруслу (Рисунок 5.2, в). Решение обратной задачи позволило определить пространственное расположение палеорусла, хотя

толщина отложений фаций плёсов и перекаатов на геоэлектрическом разрезе УЭС оказалась завышенной (Рисунок 5.2, д).

Для модели рекультивированного полигона на разрезе ρ_k отсутствует локальная высокоомная аномалия (Рисунок 5.2, г), а результаты инверсии позволяют достоверно восстановить горизонтально слоистое строение разреза (Рисунок 5.2, е) с однородным по УЭС слоем техногенных отложений.

Результаты численного моделирования показали критерии для дифференциации целиковой россыпи и рекультивированного участка полигона отработанной россыпи на основе данных электротомографии. На разрезах УЭС по результатам 2–D инверсии для целиковой россыпи ключевым критерием является наличие локальной аномалии с высокими значениями УЭС, связанной с палеоруслом, тогда как для рекультивированного полигона характерен однородный слой с равномерным значением УЭС.



1 – граница слоя в модели

Рисунок 5.2 – Геоэлектрическая модель целиковой россыпи (а) и рекультивированного полигона (б), разрез наблюдаемого кажущегося УЭС для модели целиковой россыпи (в) и рекультивированного полигона (г), результат инверсии для модели целиковой россыпи (д) и рекультивированной россыпи (е) (Осипова и др., 2023)

5.2. Верификация численной модели полевым экспериментом

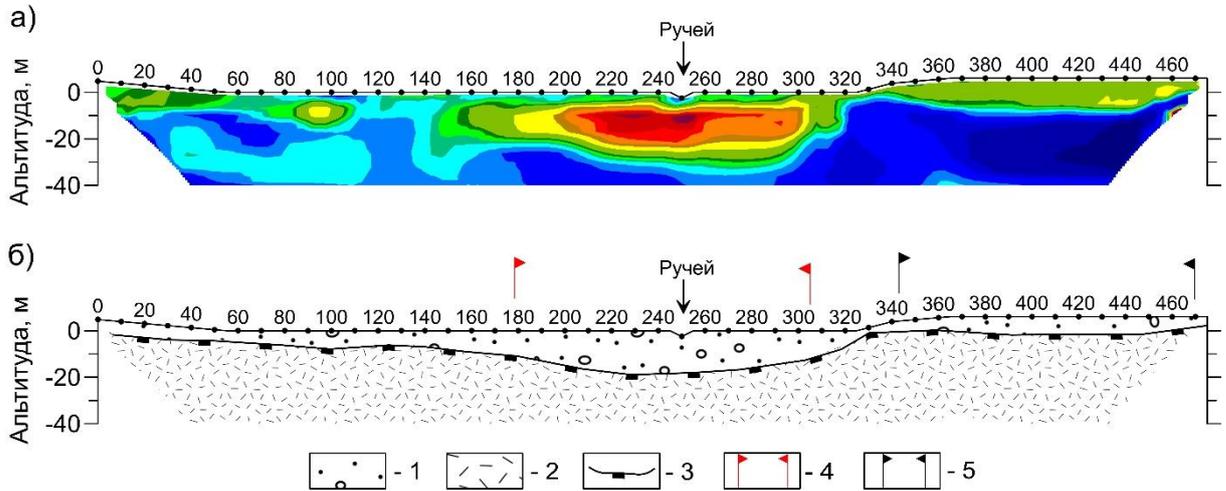
Полевые исследования методом электротомографии проводились на аллювиальных россыпях регионов Сибири и Дальнего Востока. Измерения ЭТ осуществлялись с использованием аппаратуры Скала-48К12. Конфигурация подключения электродов соответствовала одной из установок – Шлюмберже, дипольно-осевой, трёхэлектродной или их комбинации. Расстояние между электродами составляло 5 м.

На участке в долине реки Горхон (Забайкалье) съёмка ЭТ была выполнена в пределах известных границ рекультивированного полигона. В период с 1982 по 1990 годы здесь проводились детальные разведочные работы с последующим утверждением и подсчётом балансовых и забалансовых запасов. Россыпь отработана дражным способом и частично рекультивирована. Рыхлые отложения на участке достигают общей мощности около 5 м, где золотиносный слой занимает нижние 1,5 м. Подстилающие породы представлены преимущественно сланцами, гнейсами и гранитами.

Геоэлектрический разрез, полученный по профилю через нетронутый отработкой участок (Рисунок 5.3), выявляет наличие в верхней части высокоомного слоя аллювиальных отложений с диапазоном УЭС от 1000 до 15000 Ом·м, что контрастирует с низкоомными подстилающими сланцами. На участке между 180 и 300 м разреза выделяются перспективные для дальнейшей разработки отложения русловой фации, соответствующие целику. Высокие значения УЭС аллювия (свыше 5000 Ом·м) обусловлены как литологическим составом отложений (преимущественной валунно-галечниковым), так и их мёрзлым состоянием. Результаты численного моделирования указывают на возможное завышение мощности палеорусловых отложений при установлении её по аномалии.

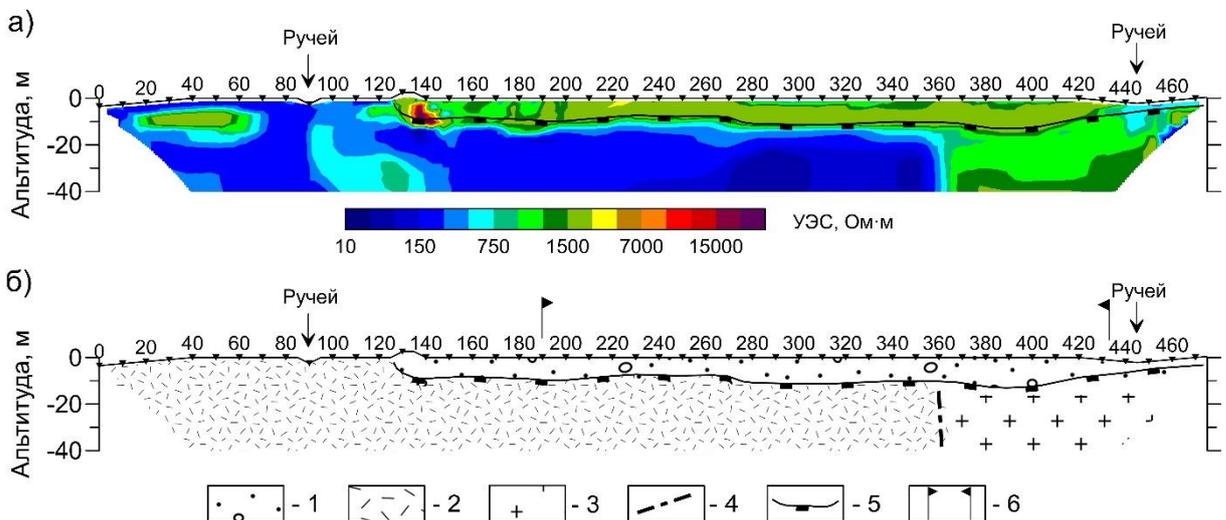
На разрезе, полученном по профилю через рекультивированный полигон (Рисунок 5.4), в интервале 190–430 м рыхлые отложения выделяются как однородный слой с постоянной мощностью. УЭС этого слоя находится в пределах узкого диапазона от 1900 до 2300 Ом·м, что указывает на его однородность.

Установленный однородный геоэлектрический слой служит критерием распознавания отработанной россыпи.



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

Рисунок 5.3 – Геоэлектрический разрез долины р. Горхон через целиковую россыпь (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

Рисунок 5.4 – Геоэлектрические разрезы долины р. Горхон через рекультивированный полигон (а) и его интерпретация (б) (Осипова и др., 2023)

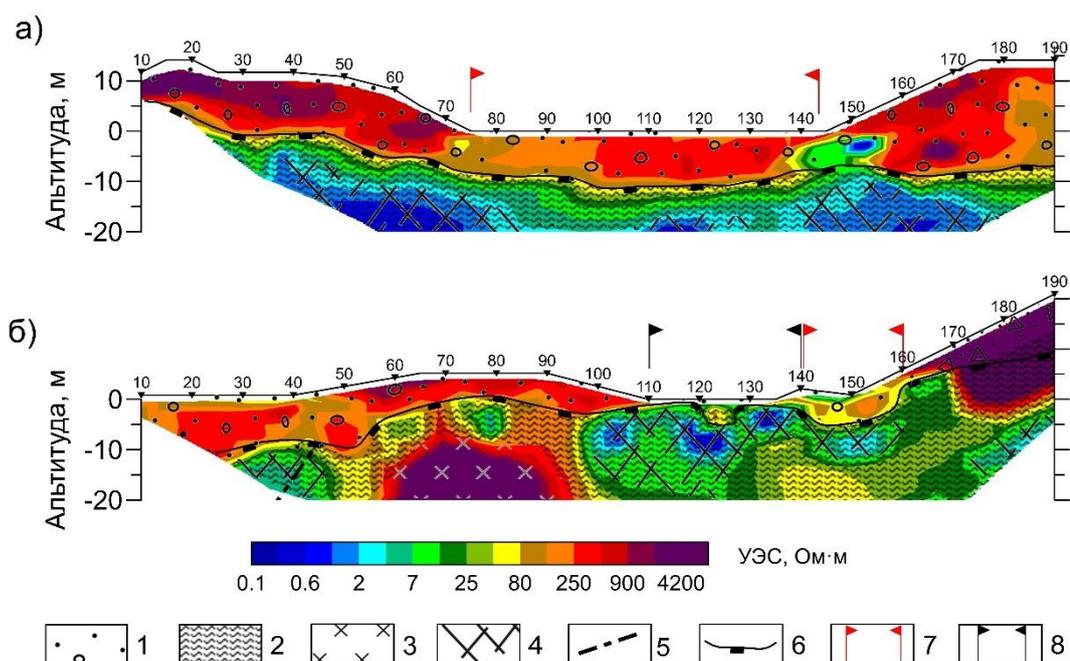
Эксплуатация россыпей ручья Дегдекан в Магаданской области ведётся с 1941 года. Раннее добыча проводилась преимущественно на наиболее богатых золотом участках, что привело к образованию лакунов с сохранившимися участками целиков с более низкими содержаниями металла, местоположение которых в настоящее время неизвестно из-за отсутствия соответствующей документации. На момент настоящих исследований особый промышленный интерес для разработки представляла крупная россыпь палеоканьона. В прошлом данный объект представлял собой узкую пойму с крутыми склонами. Сейчас ширина каньонной россыпи варьируется от 10 до 30 м, а общая мощность отложений торфов и песков колеблется от 1,2 м до 19 м. Плотик характеризуется сильнотрещиноватыми углистыми сланцами с пиритизацией.

Территории ранее отработанных россыпей характеризуются отсутствием рекультивации и наличием отвалов перемытых пород, частично перекрывающих неотработанные участки. Опытные исследования методом ЭТ были проведены для выявления геоэлектрических признаков целиковых участков, не подвергшихся отработке.

Геоэлектрический разрез, полученный через неотработанный участок (Рисунок 5.5, а), демонстрирует, что отвальные отложения в интервалах 10–75 м и 145–190 м характеризуются сопротивлением 500–2000 Ом·м. В промежутке 75–145 м до глубины 10 м выделяются русловые отложения аллювия с УЭС 200–2000 Ом·м, расположенные на низкоомном плотике.

На разрезе, выполненном через отработанный участок (Рисунок 5.5, б), отвалы распознаются по высокому сопротивлению в интервале 50–110 м. В промежутке 110–140 м близко к поверхности выявлены низкоомные породы плотика. Целиковые отложения (неотработанный аллювий) выделены в интервале 140–160 м профиля.

Анализ и сопоставление разрезов показали, что целиковая россыпь характеризуется высокими значениями УЭС. В случае полной отработки россыпи до плотика высокоомный слой в верхней части разреза отсутствует, так как аллювиальные отложения естественного залегания на таких участках извлечены.



1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – порфириты; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы отработанного полигона.

Рисунок 5.5 – Геоэлектрические разрезы долины руч. Дегдекан через целиковую россыпь (а) и отработанный участок (б) (Осипова и др., 2023)

На территории Ануйского золотороссыпного узла в Алтайском крае добыча золотоносных россыпей велась старателями ещё в XVIII–XIX веках, а с 1930-х годов до настоящего времени активно осуществлялась крупными старательскими артелями. В результате значительная часть россыпей была полностью выработана и подвергнута рекультивации, однако сохранились и нетронутые участки. Метод электротомографии применялся для изучения геологического строения речных долин с целью планирования поисковых работ на россыпное золото.

Мощность золотоносного слоя в исследуемых районах достигает 2 м, а мощность торфяных отложений составляет до 3 м. Коренные породы представлены гранодиорит-порфирами, алевrolитами и сланцами. Один из исследуемых профилей был размещён на правом берегу реки Ануй. В интервале 100–220 м он пересекал участок техногенного ландшафта, который не выделяется отчётливо в масштабе геоэлектрического разреза (Рисунок 5.6). В верхних слоях до глубины 5 м русловые аллювиальные отложения выделяются повышенными значениями

УЭС, достигающими 900 Ом·м, на фоне окружающих пород с УЭС около 400 Ом·м. В интервале профиля 10–100 м значения УЭС варьируются от 450 Ом·м до 900 Ом·м, формируя локальные аномалии. На участке между 100 и 220 м значения УЭС рыхлых отложений изменяются незначительно, находясь в диапазоне от 350 до 500 Ом·м. Таким образом, перспективные для добычи золотоносные отложения в естественном залегании были идентифицированы в интервале профиля 10–100 м, тогда как участок в интервале профиля 100–220 м представляет собой рекультивированный полигон.

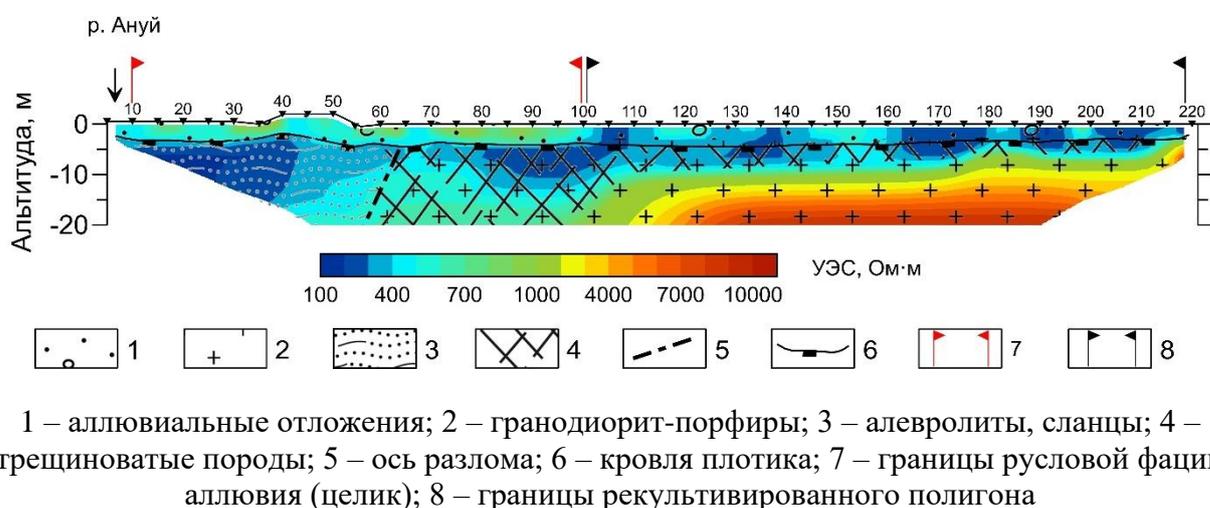
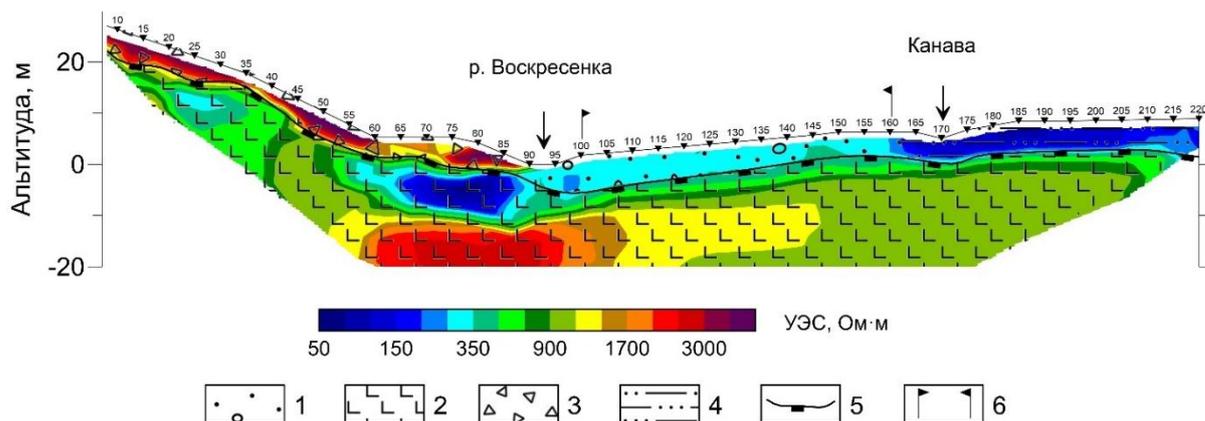


Рисунок 5.6 – Геоэлектрический разрез долины р. Ануй (Осипова и др., 2023)

В долине реки Воскресенка в Кемеровской области проведены исследования, направленные на картирование рельефа плотика. Один из профилей ЭТ пересекал лесистый участок с вековыми деревьями. Единственным признаком, указывающим на прошлую добычу золота в этой части долины, была заросшая водоотводная канава. Согласно историческим данным, добыча россыпного золота на Воскресенском прииске осуществлялась с середины XIX века.

Золотоносный пласт здесь залегает на глубине от 1,5 до 6 м, а плотик представлен эффузивными породами. На геоэлектрическом разрезе (Рисунок 5.7) участок в интервале профиля 100–160 м демонстрирует в верхней части однородный слой с УЭС в диапазоне 270–340 Ом·м. Данный однородный

геоэлектрический слой интерпретируется как признак отработанной россыпи. Это подтверждается тем, что в пределах современного русла реки Воскресенка, а также в остальной части долины отсутствуют высокоомные скопления валунно-галечниковых отложений, характерные для нетронутых россыпей в естественном залегании.



1 – аллювиальные отложения; 2 – эффузивные породы; 3 – делювиальные отложения; 4 – пойменные отложения; 5 – кровля плотика; 6 – границы рекультивированного полигона

Рисунок 5.7 – Геоэлектрический разрез долины р. Воскресенка (Осипова и др., 2023)

Анализ данных электротомографии, полученных как в численном эксперименте, так и в полевых условиях показал, что рыхлые отложения рекультивированных полигонов отличаются однородностью распределения УЭС. Целиковые (неотработанные) участки россыпей распознаются по аномалиям высокого УЭС в верхней части геоэлектрического разреза. Если россыпь полностью отработана до плотика, то высокоомная аномалия в верхней части разреза отсутствует.

Независимо от района исследований и геологической ситуации геоэлектрические критерии выделения целикового руслового аллювия и рекультивированных полигонов сохраняются.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании численного моделирования и полевых исследований методом электротомографии, проведённых на целиковых и отработанных аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока, были 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 локальная высокоомная аномалия, связанная с палеоруслом. В свою очередь, рекультивированный полигон отработанной россыпи отличается наличием слоя с однородным значением УЭС, который характеризуется выдержанной мощностью в верхней части разреза. Эти отличия лежат в основе методики выявления отработанных россыпей по данным электротомографии.

Полевые исследования подтвердили результаты моделирования. Выявленные критерии сохраняются для различных геологических условий и различных геокриологических обстановок.

Метод электротомографии эффективно решает задачу определения отработанных россыпей среди целиков и нетронутых участков в пределах рекультивированных территорий. Это делает его перспективным для внедрения в практику поисковых и разведочных мероприятий на россыпное золото. Подобный подход рекомендуется также использовать при изучении техногенных россыпей.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 г. № 1838-р, приоритетным направлением ГРП поисковой и последующих стадий является актуализация методического обеспечения геолого-разведочных работ с учётом современного уровня развития науки и технологий. Реализация этого плана невозможна без развития внедрения современных геофизических методов в практику ГРП. Этим определена цель диссертационной работы, а именно обоснование применения метода ЭТ для поиска и разведки аллювиальных россыпей золота.

Аллювиальные россыпи являются самым распространённым промышленном типом россыпей. С каждым годом россыпная золотодобыча сокращается, а оставшиеся на известных территориях россыпи имеют сложное строение, многие частично отработаны, иногда даже несколько раз. В силу сложности строения подобных объектов традиционные методики не подходят для их поиска и разведки, и для решения геологических задач необходимо применять современные методы электроразведки с разработанным математическим аппаратом двумерной и трёхмерной инверсии. Это позволит сократить расходы недропользователей и увеличить эффективность поисков и разведки россыпей. Отсюда определяется цель диссертационной работы – обоснование применения метода электротомографии 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 целиковых русловых отложений аллювия, так и рекультивированных полигонов на участках отработанных россыпей.

Из анализа геологического строения отложений долины реки в золото-россыпном районе определено, что задача геофизических исследований на поисковой стадии заключается в выделении в разрезе и картировании в плане фаций плёсов и перекаатов, в которых наблюдаются максимальные концентрации

золота. Они представлены крупнозернистыми песками, галечниками, щебнем, валунами, залегающими на плотике и перекрытыми более мелкими отложениями пойменной фации. С учётом фациального состава отложений разработана геоэлектрическая модель аллювиальной россыпи. По результатам численного и физического моделирования установлено, что критериями геологической интерпретации для выделения русловой фации аллювия на геоэлектрических разрезах служат локальные корытообразные аномалии с УЭС от 300 Ом·м до нескольких тысяч Ом·м. При площадных зондированиях палеоруслу маркируются на картах УЭС лентообразными высокоомными аномалиями. Результаты моделирования подтверждены полевыми экспериментами на территории Алтайского и Камчатского края, Иркутской области.

На примере полевых исследований в зоне распространения ММП в Магаданской области показано ограничение метода электротомографии – невозможность установления положения кровли плотика и выделения отложения золотоносной русловой фации в условиях высокольдистых торфов.

В результате полевого эксперимента показано, что электросопротивление аллювиальных отложений современных русловых россыпей существенно выше, чем УЭС русловой фации долинных и террасовых россыпей, что даёт возможность различать эти виды россыпей на геоэлектрических разрезах.

Физический эксперимент позволил определить оптимальный масштаб съёмки ЭТ для оконтуривания палеорусла. На стадии поисков рекомендуется выбор 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.

На основе литературных данных и опыта исследований определены отличия в геологической и геоэлектрической моделях россыпей в естественном залегании и отработанной. Модель рекультивированного полигона отличается отсутствием валунно-галечниковых отложений палеорусла. Аллювий представлен слоем техногенных отложений смешанного фациального состава. Установленные признаки выявлены при полевых исследованиях на аллювиальных россыпях

Сибири и Дальнего Востока. Критерием распознавания рекультивированного полигона отработанной россыпи является выдержанный по мощности и удельному электрическому сопротивлению слой в верхней части разреза.

Представленные в диссертации геоэлектрические модели целиковой аллювиальной россыпи, рекультивированного полигона и установленные критерии интерпретации данных ЭТ для их выделения позволяют получать информацию о геологическом строении рыхлых отложений долины реки при поисках и разведке россыпей.

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

Для дальнейших исследований выделяются следующие направления. Первое заключается в усовершенствовании методики съёмки ЭТ (выбор установки и шага для конкретного разреза), на котором возможно литологическое расчленение отложений, что важно при разведке аллювиальных россыпей сложного строения (например, с ложным плотиком или глубокозалегающих). Кроме того, требуется внедрение в практику исследований метода ЭТ-ВП для получения дополнительной информации об источниках россыпной золотоносности. И третье направление связано с комплексированием метода ЭТ с ГРЛ для получения более точных результатов при установлении границы между аллювием и плотиком. Необходимо определить условия, для каких россыпных объектов будет рентабельно использование двух методов и оценить повышение информативности при комплексировании.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

УЭС	удельное электрическое сопротивление
ВЭС	вертикальное электрическое зондирование
ЭП	электропрофилирование
ЭТ	электротомография
ЭТ–ВП	электротомография с измерением вызванной поляризации
ММП	многолетнемерзлые породы
ЗМПП	зондирование методом переходных процессов
ГРР	геолого-разведочные работы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранников А.Г. Геология и разведка россыпных месторождений / А.Г. Баранников. – Свердловск, 1984. – 75 с.
2. Белохвостик Д.М. Проблемы современной геофизики при поисках россыпных месторождений золота и металлов платиновой группы / Д.М. Белохвостик, Ю.В. Воробьев, А.Д. Кузовенков, А.В. Самсонкин // Материалы XXIX молодежной научной школы–конференции, посвященной памяти члена–корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова (г. Петрозаводск, 1–5 октября 2018 г.). – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – С. 209–212.
3. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей / Ю. А. Билибин – М.: АН СССР, 1955. – 471 с.
4. Бобачев А.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – Т. 2. – С. 14–17.
5. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике / Г.С. Вахромеев, А. Ю. Давыденко – М.: Недра, 1987. – 192 с.
6. Виноградова О.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота / О.В. Виноградова, Н.В. Хмелева. – М: Изд–во Моск. ун–та, 2009. – 171 с.
7. Геокриологическая карта СССР / Гл. ред. Э.Д. Ершов. М.: МГУ, 1991 г., 1 л.
8. Гайдай Н.К., Хасанов И.М. Перспективы использования сейсморазведки при поиске и разведке аллювиальных месторождений золота / Н.К. Гайдай, И.М. Хасанов // XIV Международная сейсмологическая школа Республики Молдова «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». – Обнинск, 2019. – С. 33–33.
9. Гусев А.И. Геоморфологические факторы формирования россыпей Алтая / А.И. Гусев // Геология и полезные ископаемые четвертичных отложений:

материалы VIII Университетских геол. чтений, 3–4 апр. 2014 г., Минск, Беларусь. – Минск: «Цифровая печать», 2014. – 82 с.

10. Давыдов В. А., Бакаев В.П. Геофизика на россыпных месторождениях золота / В.А. Давыдов, В.П. Бакаев // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 4. – С. 41–47.

11. Долгаль А. С. Комплексование геофизических методов / А. С. Долгаль. – Пермь, 2012. – 167 с.

12. Дурасов В.А. Проект на геологическое изучение, включающее поиски и оценку россыпного золота в верховьях р. Средняя Иликта с притоками на 2018–2023 г.г. (лицензия ИРК 03451 БП) / В.А. Дурасов. – ООО «Ресурсы–Сибирь», г. Иркутск, 2018. – 69 с.

13. Ильенок С.С. Влияние неотектоники на формирование россыпей участка Восточного склона Кузнецкого Алатау / С.С. Ильенок // Известия ТПУ. – 1970. – Т. 239. – С. 379–381.

14. Карташов И. П. Автохтонные и аллохтонные аллювиальные россыпи / И.П. Карташов // Литология и полезные ископаемые. – 1971. – № 4. – С. 79–87.

15. Кожевников Н.О., Никифоров С.П. Изучение современных и погребенных речных долин Ленского района электроразведочными методами / Н.О. Кожевников, С.П. Никифоров // Геоэкология. – 1997 – № 2. – С. 100–110.

16. Козлова В.М., Левченко С.Ю. Информационный отчет о результатах незавершенных поисковых и оценочных работ на Сыпчугурской рудоносной площади за 2014–2018 гг. (Забайкальский край, М–49–ХП). – Росгеолфонд; Забайкальский филиал ФБУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу»; ООО «ТаланГолд»). – 102 с.

17. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов / Ю.В. Коротков // Геофизика. – 2016. – № 2. – С. 54–60.

18. Куликов В.А. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м / В.А. Куликов, А.А. Бобачев, А.Г. Яковлев // Геофизика. – 2014. – № 2. – С. 39–46.

19. Кухаренко А.А. Минералогия россыпей / А.А. Кухаренко. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 320 с.
20. Левченко С.Ю. Минерагения Сыпчугурского рудного узла: Восточное Забайкалье: автореф. дисс. ... канд. геол.–мин. наук: 25.00.11 / Левченко Сергей Юрьевич. – Чита, 2012. – 23 с.
21. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю.С. Будилин, Н.А. Вашко, В.А. Джобадзе [и др.]. – М.: ЦНИГРИ, 1992. – 307 с.
22. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов ТПИ. Россыпные месторождения / ГКЗ РФ. — М., 2007.
23. Методическое руководство по разведке россыпей золота и олова: Практическое пособие / А.С. Агейкин, И.Ю. Байрон, А.Г. Беккер, Ю. И. Гольдфарб, [и др.]; под ред. О.Х. Цапанова. – Магадан: Магаданское книжное из-во, 1982. – 178 с.
24. Мукаева Л.Н. Из истории поисков золота в Горном Алтае в первой половине XIX в. / Л.Н. Мукаева // Известия Алтайского государственного университета. – 2010. – № 4–3. – С. 161-164.
25. Нестеренко Г.В. Происхождение россыпных месторождений / Г.В. Нестеренко. – Новосибирск: Наука, 1977. – 288 с.
26. Нестеренко Г.В. Прогноз золотого оруденения по россыпям: на примере районов Юга Сибири / Г.В. Нестеренко. – Новосибирск: Наука, 1991. – 191 с.
27. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ВНИИгеосистем, 2012. – 346 с.
28. Осипова П.С., Оленченко В.В. Электротомография с вызванной поляризацией при поисках аллювиальной россыпи золота / П.С. Осипова, В.В. Оленченко // 16-я научно–практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020». – Россия, Пермь: EAGE, 2020. – С. 1–7.

29. Основы теории инженерно–физического эксперимента: учебное пособие / В.А. Архипов, А.П. Березиков. – Томск: Изд–во Томского политехнического ун–та, 2008. – 205 с.
30. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента: учебное пособие / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов: Изд–во ТГТУ. – 2014. – 77 с.
31. Оленченко В.В., Осипова П.С. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото / В.В. Оленченко, П.С. Осипова // Геология и геофизика. – 2022. – Т.63, № 1. – С. 117–129.
32. Оленченко В.В. Электротомография флангов кварц–золото–сульфидного месторождения: опыт применения в Восточных Саянах (Россия) / В.В. Оленченко, А.Н. Шеин, А.С. Калганов // Инженерная и рудная геофизика 2018: материалы Международн. науч.–практ. конф. и выст. – Россия, Геленджик: EAGE, 2018. – С. 1–8.
33. Осипова П. С. Определение параметров оптимальной сети наблюдения для картирования палеоруслу 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.
34. Павлова А.М. Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.10 / Павлова Александра Михайловна. – Москва, 2014. – 129 с.
35. Петрофизика / Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев, В.С. Канайкин; под ред. Г.С. Вахромеева. – Томск: Изд–во Том. ун–та, 1997. – 462 с.
36. Попов С.Д., Тимофеев А.А. О полезных ископаемых верхнего течения реки Урюмкана (Восточное Забайкалье) / С.Д. Попов, А.А. Тимофеев // Труды института геологических наук. Академия наук СССР. – 1940. – вып. 38, № 7. – 53 с.
37. Прудников С.Г. Оценка ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота Кара–Чем, Проездной (Тува) / С.Г. Прудников, Ч.М. Хертек // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 2. – С. 67–72.

38. Пустозеров М.Г., Тригубович Г.М. Возможности электротомографии ВП при поисках и оценке россыпей золота в Восточных Саянах / М.Г. Пустозеров, Г.М. Тригубович // Вопросы естествознания. – 2017. – № 1. – С. 70–81.
39. Федорова Л. Л., Саввин Д. В. Современное состояние геофизических технологий изучения строения и состояния массивов горных пород при разработке россыпных месторождений золота и алмазов Якутии / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин // Вторая Якутская комплексная экспедиция: начало пути: сборник материалов республиканской научно–практической конференции. – Якутск: Издательский центр СВФУ, 2017. – С. 261–267
40. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии / Л.Л. Федорова, Г.А. Куляндин // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 11. – С. 160–165.
41. Хасанов И.М., Муравьев Л.А. Перспективы применения георадиолокации в комплексе геофизических методов при поисках и разведке аллювиальных месторождений золота / И.М. Хасанов, Л.А. Муравьев // Инженерная и рудная геофизика 2019: тезисы докладов 15–й научно–практической конференции и выставки. – Геленджик, Россия: EAGE, 2020. – С. 1–10.
42. Хмелевской В.К. Электрическое зондирование геологической среды. Часть 2. Интерпретация и практическое применение / В.К. Хмелевской, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.Г. Яковлев. – М: Изд-во МГУ, 1992. – 200 с.
43. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение): учебное пособие / Р.С. Чалов. – М.: ИНФРА. – Москва, 2016. – 565 с.
44. Чалов Р. С., Чалова Е. Р. География русел рек, разветвленных на рукава, на территории России / Р. С. Чалов, Е. Р. Чалова // Известия Русского географического общества. – 2019. – Т. 151. – №. 6. – С. 20-34.
45. Чернявский А.Г. О проблеме освоения техногенных ресурсов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – №. 3. – С. 58–64.
46. Шило Н.А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей / Н.А. Шило. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 576 с.

47. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. II. Малоглубинная электроразведка / А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, И.Н. Модин, В.А. Шевнин; под ред. проф. В.А. Шевнина, доц. А.А. Бобачева. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.
48. Abousrafa E.M. Pore geometrical model for the resistivity of brine saturated rocks / E.M. Abousrafa, J.M. Somerville, S.A. Hamilton, P.W.H. Olden [et.al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2009. – Vol. 65, № 3–4. – P. 113–122.
49. Ahmad M.H. Electrical resistivity tomography and induced polarization method applied for tubewell development in Alluvial deposit: A case study in MARDI Seberang Perai / M.H. Ahmad, C.C. Sheng, T.C. Chuang, E.H. Sharu [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 476, № 1. – P. 012117.
50. Chambers J. E. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography / J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, D. Wardrop, A. Hameed [et al.] // *Geomorphology*. – 2012. – Vol. 177. – P. 17–25.
51. Dahlin T., Owen R. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe / T. Dahlin, R. Owen // *4th EEGS Meeting*. – Spain, Barcelona, 1998. – P. 43–47.
52. Dahlin T., Zhou B. A. Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays / T. Dahlin, B. A. Zhou // *Geophysical Prospecting*. – 2004. – № 52. – P. 379–398.
53. Dahlin T., Bernstone C. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays / T. Dahlin, C. Bernstone // *10th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. – EAGE Publications BV, 1997. – P. cp-204-00095.
54. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3–D resistivity inversion / M.H. Loke, T. Dahlin // *Near Surface 2010: 16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – EAGE Publications BV, 2010. – P. 164–00016.
- 55.

56. Eberle D. Locating hidden channels for placer gold exploration in the Cariboo District, British Columbia, Canada: A case study / D. Eberle, D. Bastian, N. Ebel, R. Schwarz // *Journal of Applied Geophysics*. – 2017. – Vol. 136. – P. 61–79.
57. Ekström K. Geophysical Investigation of Alluvial Aquifers in Zimbabwe: M.Sc thesis / K. Ekström, C. Prenning, Z. Dladla. – Dept of Geotechnology, Lund University, Sweden, 1996 – 79 p.
58. Foss C. Magnetic mapping of river channel and paleochannel deposits—an example from Teetulpa, South Australia / C. Foss, G. Reed, T. Keeping, M. Davies // *24th International Geophysical Conference and Exhibition*. – Perth, Western Australia, 2015. – P. 1–4.
59. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations / J. Francke // *Journal of Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 81. – P. 29–37.
60. Gharibi M., Bentley L.R. Resolution of 3–D electrical resistivity images from inversions of 2–D orthogonal lines / M. Gharibi, L.R. Bentley // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2005. – Vol. 10, № 4. – P. 339–349.
61. Gonzales Amaya A. Electrical resistivity tomography and induced polarization for mapping the subsurface of alluvial fans: A case study in Punata (Bolivia) / A. Gonzales Amaya, T. Dahlin, G. Barmen, J.E. Rosberg // *Geosciences*. – 2016. – Vol. 6, № 4. – P. 51–61.
62. Haeni F.P. Application of ground–penetrating–radar methods in hydrologic studies / F.P. Haeni // *Ground water*. – 1991. – Vol. 29. – P. 375–386.
63. Herail G. Geodynamic and gold distribution in the Tipuani–Mapiri basin (Bolivia) / G. Herail, M. Fornari, G. Viscarra, G. Laubacher [et al.] // *International symposium on intermontane basins: geology and resources*, 1989. – P. 342–352.
64. Hickin A.S. Using ground–penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate 3–d fluvial architecture and grain–size distribution of a gravel floodplain in northeast british columbia, Canada / A.S. Hickin, B. Kerr, T.E. Barchyn, R.C. Paulen // *Journal of Sedimentary Research*. – 2009. – Vol. 79. – PP. 457–477.

65. Kaminsky A.E. ZondRes3D: software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data: manual / A.E. Kaminsky. – Saint-Petersburg: Russia, 2010. – 88 p.
66. Loke M.H. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion / M.H. Loke, R.D. Barker // Geophysical prospecting. – 1996a. – Vol. 44, № 3. – P. 499–523.
67. Kim S. Exploration Report Colomine Placer Gold Project Cameroon / S. Kim, M.J. Yoon, S.G. Kim, D.J. Kwon. – Seoul: Geotech Consultant Co., 2009. – 87 p.
68. Kuneš J. Similarity and modeling in science and engineering / J. Kuneš. – Springer Science & Business Media, 2012. – 437 p.
69. Loke M.H. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1 / M.H. Loke, R.D. Barker // Geophysical prospecting. – 1996b. – Vol. 44, № 1. – P. 131-152.
70. Loke M.H. RES3DINVx32 ver. 2.15: Rapid 3-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method (For 3-D surveys using the pole-pole, pole-dipole, dipole-dipole, rectangular, Wenner, Wenner-Schlumberger and non-conventional arrays) On land, aquatic, cross-borehole and time-lapse surveys: Geotomo Software Manual / M.H. Loke. – Penang, Malaysia, 2005. – 76 p.
71. Loke M.H. RES2DINV ver. 3.55: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner, dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays on land, aquatic, cross-borehole and time-lapse surveys: Geotomo Software Manual / M.H. Loke. – Penang, Malaysia, 2006. – 127 p.
72. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys: RES2DINV Manual / M.H. Loke. – IRIS Instrument, 2009. – 70 p.
73. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion / M.H. Loke, T. Dahlin // Near Surface 2010: 16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – EAGE Publications BV, 2010. – P. 164–00016.

74. Loke M.H. Tutorial: 2–D and 3–D electrical imaging surveys / M.H. Loke. – Penang, Malaysia, 2022. – 237 p.
75. Field geophysics / J. Milsom, A. Eriksen. – John Wiley & Sons, 2003. – 244 p.
76. Mohamed-Ali M.A., Ibrahim S.A. Geophysical and geochemical exploration of the gold bearing placer deposits in the Southern Blue Nile (Sudan) / M.A. Mohamed-Ali, S.A. Ibrahim // On Significant Applications of Geophysical Methods: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG–1), Tunisia 2018. – Springer International Publishing, 2019. – P. 147–150.
77. Moll P. Geophysical Survey with 2D Resistivity for Placer Investigation, Dycer Creek 2013: Report / P.Moll. – Arctic Geophysics Inc., 2013. – 34 p.
78. Nimnate P. Geomorphic criteria for distinguishing and locating abandoned channels from upstream part of Mun River, Khorat Plateau, northeastern Thailand / P. Nimnate, M. Choowong, T. Thitimakorn, K. Hisada // Environmental Earth Sciences. – 2017. – Vol. 76. – P. 1–13.
79. Nimnate P. Imaging and locating paleo–channels using geophysical data from meandering system of the Mun River, Khorat Plateau, Northeastern Thailand / P. Nimnate, T. Thitimakorn, M.Choowong, K. Hisada //Open Geosciences. – 2017. – Vol. 9, № 1. – P. 675–688.
80. Nimnate P. Ancient and modern fluvial geomorphology of meandering system from upstream area of the Mun River, Changwat Nakhon Ratchasima: PhD thesis, 2017. – 130 p.
81. Oh T.M. Effect of soil mineralogy and pore–water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils / T.M. Oh, G.C. Cho, C. Lee // Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering. – 2014. – Vol. 140, № 11. – P. 06014012.
82. Owen R., Dahlin T. Alluvial aquifers at geological boundaries: geophysical investigations and groundwater resources / R. Owen, T. Dahlin // Groundwater and human development. – Balkema. – 2005. – P. 233-246.

83. Resistivity characteristic of geologic targets: Electromagnetic methods applied geophysics: Theory, V. 1 / G.J. Palacky; Ed. by M. Nabighian. – Society of exploration Geophysicists, Tulsa, Okla, 1987. – P. 53–129.
84. Rasskazov I.Y. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotisty Deposit / I.Y. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvintsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – № 2. – P. 3–7.
85. Ryan S. An Evaluation of Placer Deposit Exploration Through GPR, DC Resistivity, Drone Imagery and Lidar / S. Ryan, A. Radjaee, I. Fage, C. Cote // FastTimes. – 2021. – V. 24. – P. 4-4.
86. Tokouet R.M. Geoelectrical imaging and spatial distribution of alluvial materials of the Sanaga River (Cameroon, Central Africa) / R.M. Tokouet, J.Q. Yene Atangana, M. Yem, E. Ekomane [et al.] // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2022. – Vol. 66, № 1. – P. 62–79
87. Ward S.H. The resistivity and induced polarization methods / S.H. Ward // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 1988. – P. 109–250.
88. Yene Atangana J.Q. Electrical resistivity imaging and 3D geological modelling of the sedimentary architecture of the Sanaga floodplain (Cameroon, Central Africa) / J.Q. Yene Atangana, R. Menanga Tokouet, L. Mbida Yem, L. Onana Enama [et al.] // Acta Geophysica. – 2023. – Vol. 71, № 2. – P. 735–755.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справки об использовании результатов кандидатской диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Барзасская экспедиция»

Гонеев В.В.
 «_____» _____ 2024 г.
 МП



АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Осиповой Полины Сергеевны по научной специальности 1.6.9 Геофизика

Комиссия в составе:

председатель: директор ООО «Барзасская экспедиция» Гонеев В. В.

член комиссии: главный геолог ООО «Барзасская экспедиция» Кураев А.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осиповой Полины Сергеевны «Обоснование применения метода электротомографии для поисков и разведки аллювиальных россыпей золота», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы при проведении геолого-поисковых и геолого-разведочных работ на россыпное золото в границах лицензии КЕМ 00932 ТР.

Результаты диссертационной работы Осиповой П. С. позволили:

1. оценить мощность покровных суглинков, установить положение кровли коренных пород;
2. вывить границы распространения золотоносных отложений симоновской свиты;
3. скорректировать поисковые и разведочные буровые сети.

Объективность геофизических данных и их интерпретации подтверждена скважинами, заданными по геофизическим данным.

Заключение: использование указанных результатов позволяет повысить качество геолого-поисковых и разведочных работ; сократить затраты на буровые работы; увеличить эффективность горных работ.

Председатель комиссии:

Директор ООО «Барзасская экспедиция»


Гонеев В. В.

Член комиссии:

Главный геолог ООО «Барзасская экспедиция»


Кураев А.А.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «КВАРЦ»


 Ш.Л. Наурузов
 « 09 » _____ 2024 г.



СПРАВКА

об использовании результатов
кандидатской диссертации

Осиповой Полины Сергеевны по научной специальности 1.6.9 Геофизика

Комиссия в составе:

председатель: Генеральный директор ООО «КВАРЦ» Ш.Л. Наурузов;

члены комиссии: Геолог А.А. Богородов.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осиповой Полины Сергеевны «Обоснование применения метода электротомографии для поисков и разведки аллювиальных россыпей золота», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы при проведении геолого-поисковых работ в границах лицензий АБН № 00804 БП и АБН № 00857 БП с целью поиска геологических структур, перспективных на россыпное золото.

Результаты диссертационной работы Осиповой П.С. позволили:

1. Определить мощность аллювиальных отложений и рельеф плотика;
2. Выявить границы фрагментов палеорусел и палеодолин;
3. Обнаружить углубления в кровле плотика;
4. Уточнить перспективные участки для детальных исследований.

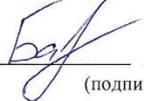
Объективность геофизических данных и их интерпретации подтверждена бурением, заданным по геофизическим данным.

Заключение: результаты работ уточнили геологические карты и сократили затраты на буровые работы за счёт рекомендаций по расположению скважин в выявленных наиболее перспективных местах.

Председатель комиссии:
Генеральный директор
ООО «КВАРЦ»


 Ш.Л. Наурузов

Член комиссии:
Геолог

(подпись)

 А.А. Богородов
 (подпись)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Ресурсы-Сибирь»

Заровищева Д.В.

«21» июля 2024 г.



СПРАВКА

об использовании результатов
кандидатской диссертации

Осиповой Полины Сергеевны по научной специальности 1.6.9 Геофизика

Комиссия в составе:

председатель: должность, ФИО директор Заровищева Д.В.

члены комиссии: должность, ФИО геолог Дурасов В.П.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осиповой Полины Сергеевны «Обоснование применения метода электротомографии для поисков и разведки аллювиальных россыпей золота», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы при проведении поисковых работ на россыпное золото в границах лицензии ИРК 03451 БП.

Результаты диссертационной работы Осиповой П.С. позволили:

1. Закартировать палеорусло в плане;
2. Определить рельеф кровли коренных пород и выявить локальные углубления.

Объективность геофизических данных и их интерпретации подтверждена шурфами, заданным по геофизическим данным.

Заключение: результаты работ повысили эффективность горных работ за счёт рекомендаций по расположению шурфов; результаты использованы для оценки прогнозных ресурсов по категории Р₁.

Председатель комиссии:

Должность

Член комиссии:

Должность

Заровищева Д.В. (подпись) ФИО

Дурасов В.П. (подпись) ФИО

УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО «Талан Голд»

Минин В.В.

«09» декабря 2024 г.

МП

СПРАВКА

об использовании результатов
кандидатской диссертации

Осиповой Полины Сергеевны по научной специальности 1.6.9 Геофизика

Комиссия в составе:

председатель: Директор ООО «ТаланГолд Минин Виктор Владимирович,

члены комиссии: Главный геолог Сидяков Николай Андреевич

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осиповой Полины Сергеевны «Обоснование применения метода электротомографии для поисков и разведки аллювиальных россыпей золота», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы при проведении геолого-поисковых работ в границах лицензии ЧИТ 02452 БР с целью поиска геологических структур, перспективных на россыпное золото.

Результаты диссертационной работы Осиповой П.С. позволили:

1. установить мощность аллювиальных отложений;
2. определить границы целиковых и отработанных участков россыпей, рекультивированных полигонов;
3. выявить границы мёрзлых пород;
4. спланировать буровые работы.

Объективность геофизических данных и их интерпретации подтверждена бурением, заданным по геофизическим данным.

Заключение: результаты работ позволили определить наиболее перспективные на золотоносность речные долины, сократили затраты на буровые работы за счёт рекомендаций по расположению скважин.

Председатель комиссии:

Директор


(подпись)

Минин В.В.

Член комиссии:

Гл. геолог


(подпись)

Сидяков Н.А.

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «ТИСК Геоголд»

« 15 » сентября 2024 г.



СПРАВКА

об использовании результатов
кандидатской диссертации

Осиповой Полины Сергеевны по научной специальности 1.6.9 Геофизика

Комиссия в составе:

председатель: заместитель генерального директора Милованцева И.В.

члены комиссии: главный геолог Логутов Б.Б.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осиповой Полины Сергеевны «Обоснование применения метода электротомографии для поисков и разведки аллювиальных россыпей золота», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы при проведении разведочных работ в границах лицензии ТОМ 02251 БП. В задачи исследования входило картирование потенциально золотоносных аллювиальных отложений.

Результаты диссертационной работы Осиповой П.С. позволили:

1. Установить положение пластов аллювиальных отложений в разрезе;
2. Определить границы палеорусел в плане;
3. Спланировать горные работы.

Объективность геофизических данных и их интерпретации подтверждена бурением, заданным по геофизическим данным.

Заключение: результаты работ повысили эффективность горных работ за счёт рекомендаций по расположению шурфов, канав и скважин; результаты использованы для оценки прогнозных ресурсов по категориям P_1 , P_2 , P_3 и позволили поставить на учёт прогнозные ресурсы по категории P_1 одного из участков (Протокол №8 заседания Подсекции экспертизы и апробации прогнозных ресурсов Секции геологии Ученого совета ФГБУ «ЦНИГРИ» от «20» июля 2023).

Председатель комиссии:
Заместитель генерального директора


(подпись)

Милованцева И.В.

Член комиссии:
Главный геолог


(подпись)

Логутов Б.Б.