

УДК 550.379

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ПАЛЕОРУСЛА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Осипова Полина Сергеевна¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Оленченко Владимир Владимирович¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Чекрыжов Андрей Васильевич¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования объясняется необходимостью определения методических особенностей применения метода электротомографии при картировании палеорусел при поисках россыпного золота.

Цель: определить необходимые и достаточные параметры сети наблюдения для картирования палеорусла на основе численного и физического моделирования.

Объект: электрические поля на физической и численной модели палеорусла.

Методы: электротомография, физический эксперимент, численное моделирование.

Результаты. Электрические зондирования методом электротомографии проведены на физической модели речной долины. Дополнительно выполнен численный эксперимент на трёхмерной модели фрагмента речной долины с палеоруслом. За единицу масштаба съёмки принято межэлектродное расстояние, которое в эксперименте равно 1 см и эквивалентно 5 м при реальных полевых исследованиях. Расстояние между профилями изменялось от 2 до 12 см с шагом 2 см, что соответствует разным масштабам съёмки. В соответствии с геологическими представлениями собрана модель речной долины с сегментной пологой стадией формирования излучины русла. Трёхмерная инверсия проводилась для набора данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения, и затем для разреженных до нужного масштаба данных. На карте удельного электрического сопротивления палеорусло выделяется лентообразной высокоомной аномалией. Анализ карт показал, что для восстановления формы палеорусла в плане необходимо использовать масштаб сети наблюдения 1:3000, при котором расстояние между профилями равно 30 м. Результаты физического эксперимента подтверждены математическим моделированием. Для повышения экономической эффективности геофизических исследований предложено уменьшение масштаба до 1:5000 с детализацией на отдельных участках.

Ключевые слова:

палеорусло, электротомография, оптимальная сеть, физическое моделирование, аллювиальная россыпь золота.

Введение

Среди различных типов россыпных месторождений ведущую роль занимают аллювиальные россыпи, связанные с русловыми отложениями рек, в том числе палеоруслами [1]. Именно в них наблюдается максимальная концентрация металла. Одной из проблем при изучении палеорусел является их слабая выраженность в современном рельефе, поскольку они находятся в погребённом состоянии. Эффективность поисков и разведки аллювиальных россыпей повышается за счет использования геофизических методов [1, 2].

Палеорусла заполнены отложениями русловых фаций – валунами, галькой и гравием [3–5]. Контраст по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) между породами русловых фаций, вмещающими их отложениями пойменной фации и выветрелыми вблизи кровли коренными породами позволяет использовать электроразведочные методы для выявления палеорусел.

Метод электротомографии (ЭТ) уже положительно зарекомендовал себя для выявления палеорусел [6–9] и в том числе для решения поисковых задач на россыпное золото [10–13]. Однако требования к ме-

тодике ЭТ, определяющие необходимый масштаб и детальность съёмки при поисках россыпного золота, остаются непроработанными [10, 14]. Чаще всего исследования выполняются по отдельным профилям, а если съёмка выполнена 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 будет оптимальной, то есть с вероятностью близкой к единице позволит определить геометрические параметры объекта исследования при наименьших затратах средств [15]. При площадных исследованиях методом ЭТ расстояние между профилями не должно превышать двух-четырёхкратного расстояния между электродами [16]. Однако при такой детальности слишком велики временные и экономические затраты. Цель этого исследования – определить необходимые и достаточные параметры сети ЭТ для картирования палеорусла при поисковых работах на россыпное золото на основе физического моделирования.

Выбор физического моделирования как метода исследования обусловлен тем, что оно обеспечивает

возможность создания модели, приближенной к реальной геологической среде. Для верификации результатов физического моделирования было проведено трёхмерное численное моделирование электрических полей.

Методика физического моделирования

Согласно теории физического моделирования [17, 18] необходимыми условиями эксперимента являются геометрическое подобие (подобие формы) и физическое подобие модели и природы. Два объекта будут геометрически подобными, если любой линейный размер одного из них можно получить из линейного размера другого путем умножения на постоянный множитель – коэффициент подобия.

Метод ЭТ представляет собой геометрические зондирования, в которых применяется переменный ток низкой частоты (2–5 Гц), эквивалентный постоянному току. Распространение тока в среде зависит от электропроводности материала, а не от размера или формы вещества.

В методе ЭТ расчётным параметром является кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_k , получаемое по формуле

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \quad (1)$$

где K – геометрический коэффициент установки; ΔU_{MN} – измеренная разность потенциалов между приемными электродами M и N ; I_{AB} – ток в питающей линии AB .

Измеряемый сигнал ΔU_{MN} пропорционален геометрическому коэффициенту установки k , который определяется расстоянием между электродами a (рис. 1). Следовательно, для установки ЭТ справедливо геометрическое подобие.

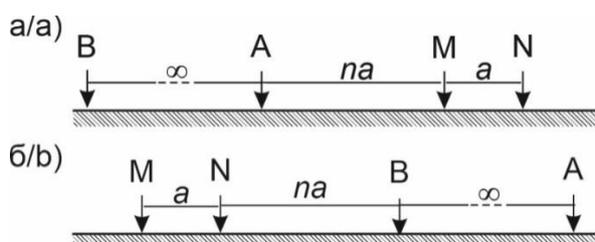


Рис. 1. Схема прямой (а) и обратной (б) трехэлектродной установки электротомографии

Fig. 1. Scheme of forward (a) and reverse (b) pole-dipole arrays for electrical resistivity tomography

Размеры физической модели речной долины являются геометрически подобными размерам реальной долины. За единицу масштаба съемки 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.

Геологическая модель аллювиальной россыпи

В общем виде геологическая модель аллювиальной россыпи трёхслойная [4, 5]. На коренных породах

(плотике) залегают отложения русловых фаций, перекрытые фациями поймы.

Породы плотика могут быть разными – карбонатные, песчаники, сланцы, метаморфические и магматические породы. На контакте с аллювиальными отложениями они интенсивно трещиноватые или выветрелые до состояния щебня с суглинистым заполнителем или суглинка. В этом случае основание будет более проводящим по сравнению с перекрывающими отложениями. Когда плотик представлен неизменными магматическими или метаморфическими породами, УЭС коренных пород будет выше, чем УЭС аллювия [19].

Отложения, залегающие непосредственно на плотике, представлены фациями кос и береговых отледей. Они сложены мелким и хорошо промытым песчаным материалом с кривой слоистостью диагонального типа. В них вложены фации плёсов и перекатов валунно-галечникового состава, богатые россыпным золотом. Этот слой – палеоруло – и является объектом поисков при геофизических исследованиях. Наиболее благоприятные условия для формирования россыпей создаются на полугорных реках.

Перекрывающие отложения пойменных фаций формируются в периоды половодий и представляют собой супесчано-суглинистый материал.

В соответствии с геологическими представлениями мы собрали модель речной долины с врезанным относительно прямолинейным руслом с узкой поймой. Моделируется ситуация, когда породы плотика высокоомные. Модель помещалась в ящик из оргстекла размерами 120×40×15 см (рис. 2, а). Она состояла из вмещающей среды, представленной промытым мелкозернистым речным песком («торфа»), и мелкого галечника (3–5 мм), заполняющего модель русла и имитирующего отложения русловой фации аллювия («пески») мощностью 1,5 см. «Пески» перекрывались слоем «речников» – смесью гальки с песком – мощностью 0,5 см и «торфами» мощностью 0,5 см (рис. 2, б). Листы пластика имитировали высокоомные коренные породы, падающие под углом 30° к тальвегу долины. Ширина долины составила 14 см, ширина русла – 4а (4 см), глубина палеорула – 2,5а (2,5 см). Согласно [20] степень развитости русла равна отношению длины излучины (l) по руслу к шагу излучины (L). В данном случае $l/L=1,1$, 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 $r/h_n=5$, поэтому в нашей модели излучина является пологой.

Рыхлый материал увлажнялся водопроводной водой перед укладкой. Постоянная влажность поддерживалась за счет опрыскивания водой раз в сутки и укрытия пленкой 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.

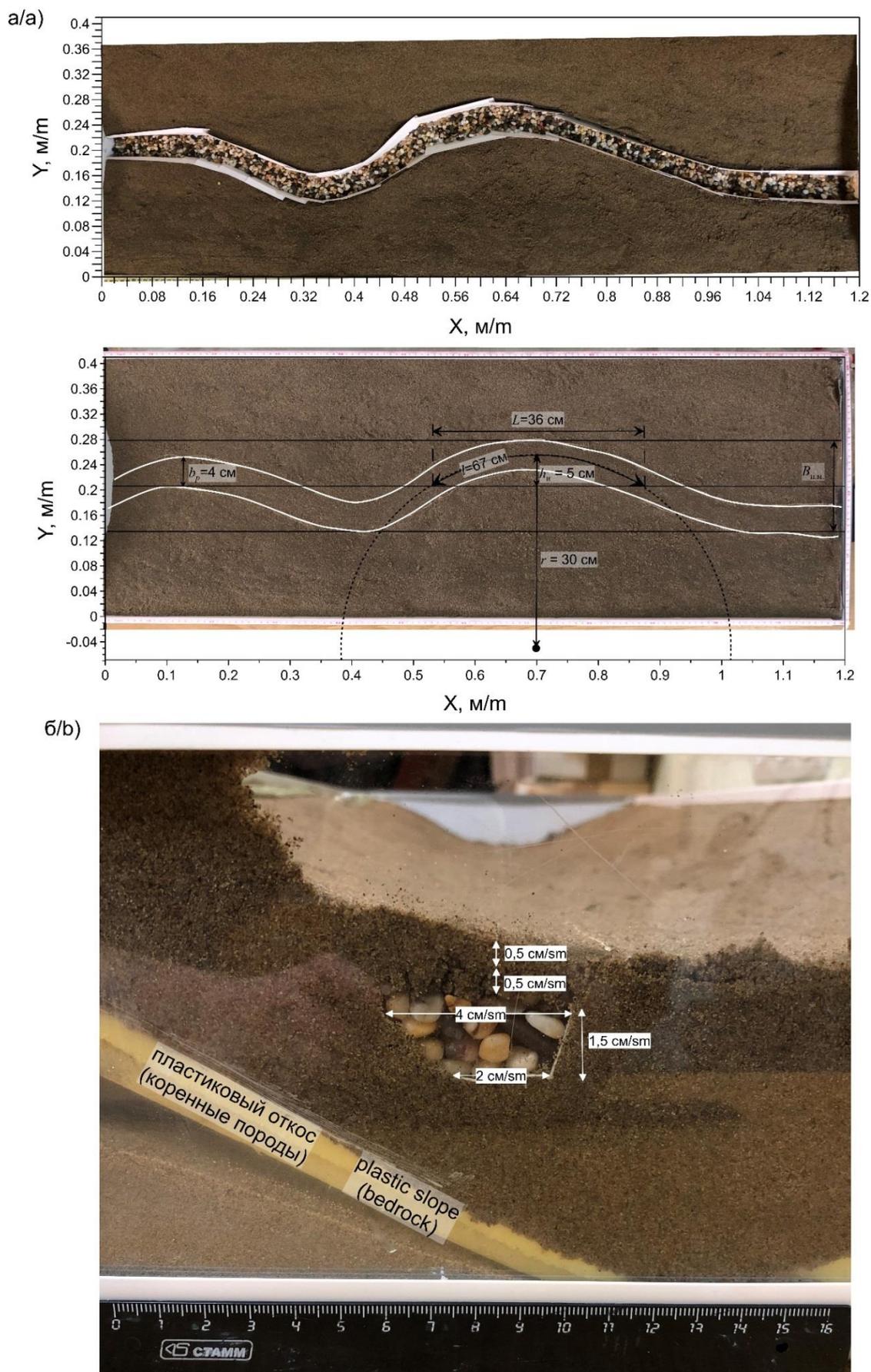


Рис. 2. Физическая модель и её параметры: а) вид сверху; б) разрез сбоку
 Fig. 2. Physical model and its parameters: a) top view; b) side section

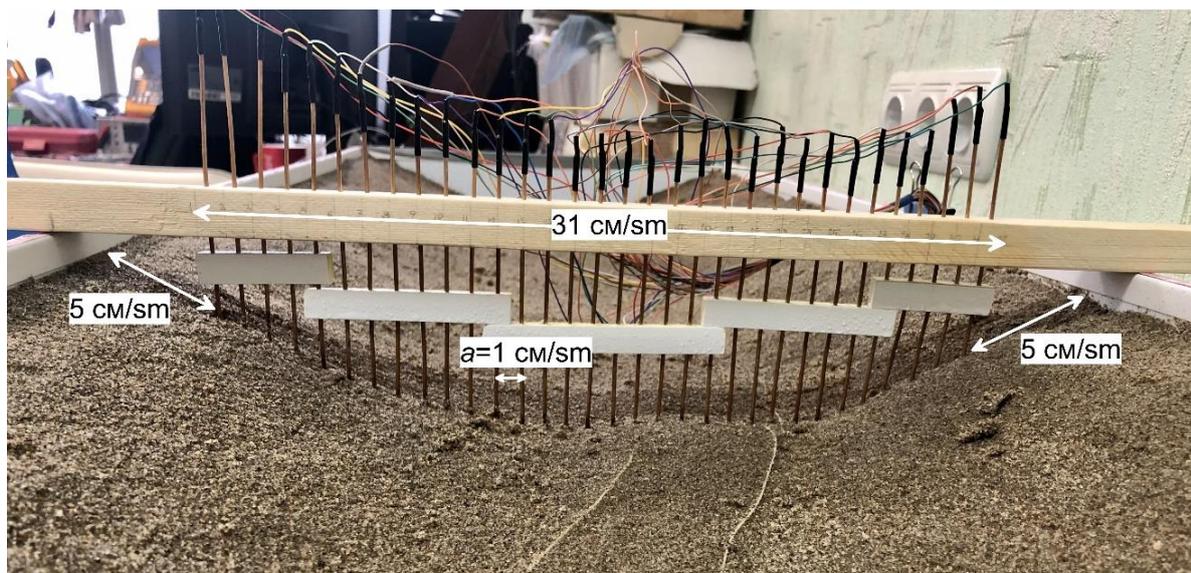


Рис. 3. Параметры измерительной установки

Fig. 3. Measuring setup parameters

Таблица. Электрические свойства материалов физической модели

Table. Electrical properties of physical model materials

Материал Material	УЭС, Ом·м/ER, Ohm·m
Песок/Sand	30–60
Песчано-галечная смесь Sand-pebble mixture	160
Галька/Pebble	650
Пластиковый откос (коренные породы) Plastic slope (bedrock)	∞

ER – electrical resistivity.

Методика измерений и обработки данных

Измерения выполнены с помощью аппаратуры Скала-64к15 с использованием 32 электродов. Длина профиля составила 31 см. Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродной прямой и обратной установкам, которые имеют лучшую разрешающую способность при полевых работах. Разнос между приемными электродами (a) изменялся от 1 до 5 см, между питающим и приемным электродом, находящимся на профиле (na) – от 1 до 31 см (рис. 1, 3).

Расстояние между профилями (y) изменялось от 2 до 12 см с шагом 2 см, что при полевых исследованиях с шагом 5 м соответствует масштабам съёмки 1:1000, 1:2000, 1:3000, 1:4000, 1:5000 1:6000.

Для обработки данных применялись программы инверсии Res2DInv [21] и Res3DInv [22]. Согласно инструкции [23] к программам для идеальной трехэлектродной установки расстояние от профиля до удаленного электрода должно более чем в 5 раз превышать максимальный разнос na . В противном случае при инверсии необходимо учитывать расположение удаленного электрода. Из-за ограниченных размеров бака расстояние от профиля до удаленного электрода превышало максимальной разнос na от 2 до 4 раз в зависимости от положения профиля, что учитывалось при инверсии. Обратная задача решалась с

использованием робастной инверсии с настройками программы по умолчанию.

Трёхмерная инверсия проводилась для набора данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения ($y=2a$, или 2 см). Затем решение обратной задачи выполнялось для разреженных до нужного масштаба данных ($4a$, $6a$ и т. д.).

Оценка влияния глубины заземления электродов

В теории электрод представляет собой точечный источник тока, то есть 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. При выполнении измерений на физической модели глубина погружения электродов составляла 3–5 мм, что позволило достичь сопротивления заземления на уровне 2–3 кОм, но при этом нарушались условия точечности.

Для оценки влияния глубины заземления электродов на результаты измерений проведен 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 и 5 см. Электроды погружались в бак с водой на глубину 0,01, 5, 10 мм.

По результатам двумерной инверсии на геоэлектрических разрезах граница между слоем воды и дном определяется неверно вне зависимости от глубины погружения электродов, вероятно, из-за влияния боковых стенок бака (рис. 4). В случае точечного (0,01 мм) заземления УЭС слоя воды распределено неравномерно, присутствуют локальные высокоомные и проводящие аномалии. При заземлении 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).

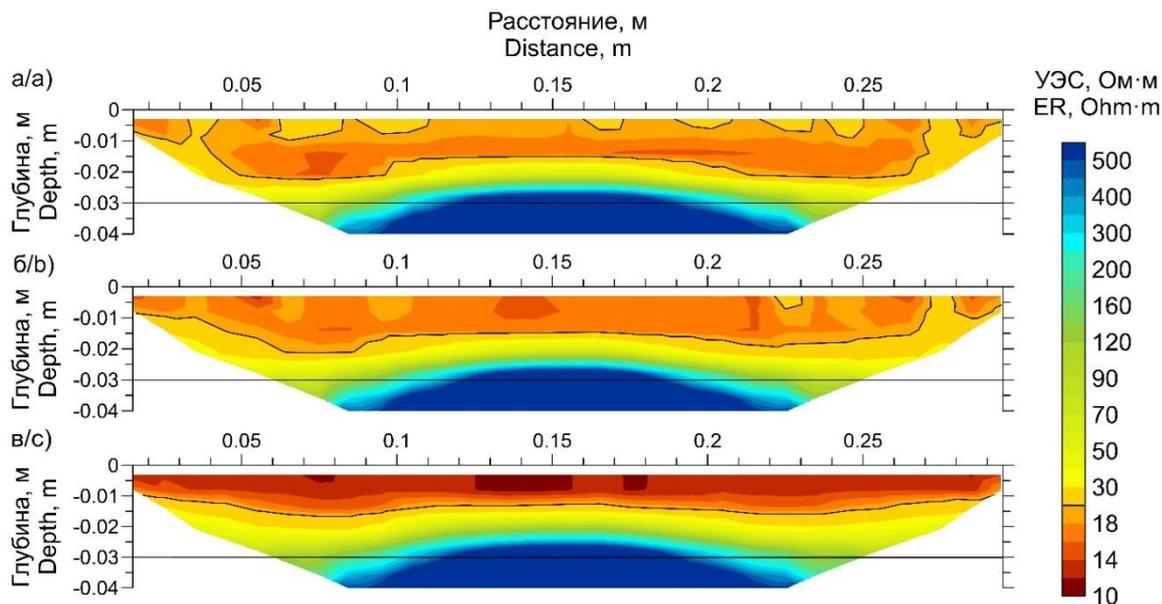


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, полученные в результате измерений в баке с водой, для установки с погружением электродов на глубину, мм: а) 0,01; б) 5; в) 10

Fig. 4. Geoelectric sections obtained as a result of measurements in a tank with water for installation with electrodes immersed to a depth, mm: a) 0,01; b) 5; c) 10

В результате эксперимента определено, что для обеспечения хорошего заземления и исключения ложных аномалий электроды должны быть погружены в среду на глубину не более 5 мм.

Методика численного моделирования

Численное моделирование зондирования выполнялось в два этапа: решение прямой задачи и инверсия данных.

В программе ZondRes3D [23] составлена геоэлектрическая модель речной долины с палеоруслом, состоящим из одной извилины (рис. 5, а). Модель состоит из слоя коренных пород, двухслойного палеорусла мощностью 5 м и вмещающих его суглинков. Электрические характеристики слоев соответ-

ствуют физической модели. Геометрия долины изменена согласно масштабному коэффициенту (1:500) – шагу между электродами, равному 5 м. Система наблюдений состоит из 20 параллельных профилей длиной 155 м, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Расчеты прямой задачи ЭТ выполнены для прямой и обратной трехэлектродных установок.

На втором этапе полученные значения ρ_k с добавленным шумом 5 % экспортированы для инверсии в программе Res3Dinv. Как и в физическом эксперименте, трёхмерная инверсия проводилась для данных, полученных при максимальной плотности сети наблюдения, а затем для разреженных до нужного масштаба.

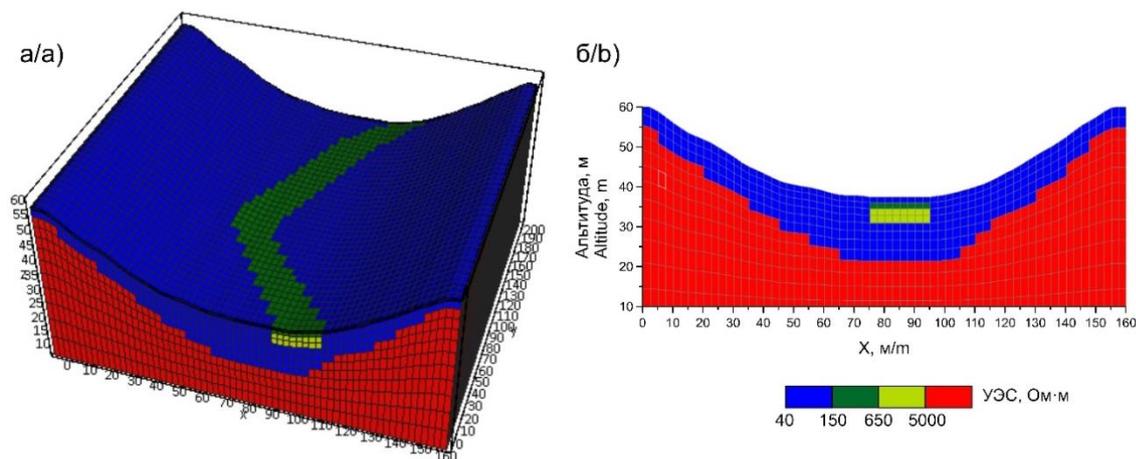


Рис. 5. Объемная геоэлектрическая модель (а) и разрез модели вдоль профиля (б)

Fig. 5. Volumetric geoelectric model (a) and model section along the profile (b)

Результаты

На геоэлектрическом разрезе по $X=50$ см по результатам двумерной инверсии в пределах палеоруслу в интервале 0,11–0,155 м на глубине 0,004–0,026 м выделяется аномалия повышенного сопротивления 150–450 Ом·м (рис. 6, а). Разрез осложнен локальными изоляторами (интервал 0,17–0,18 м, глубина 0,013–0,03 м) и проводниками (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). Они являются артефактами инверсии, которые возникают в контрастных средах, и связаны с использованием ограничения гладкости [24, 25]. Коренные породы определяются по аномалии высокого сопротивления в нижней части разреза. Глубина их залегания определяется верно, однако форма верхней границы искажена из-за ложных аномалий.

На геоэлектрическом разрезе по результатам 3-D инверсии УЭС песков более однородно (15–30 Ом·м) (рис. 6, б). Палеоруслу локализуется в интервале 0,11–0,16 м на глубине 0,004–0,025 м. Верхняя граница

коренных пород восстанавливается на верной глубине.

Рассмотрим карты УЭС с глубины 0,019 м при разной плотности сети наблюдения (рис. 7). На этой глубине срез в физической модели расположена галька, имитирующая золотоносные отложения. При максимальной плотности сети наблюдения на карте УЭС палеоруслу выделяется лентообразной аномалией интенсивностью 100–400 Ом·м на фоне 10–70 Ом·м. Локальные аномалии в фоновой части модели (вмещающей среде), возникшие из-за неидеальности моделируемой системы и влияния стенок бака, можно рассматривать как геологический шум. Несмотря на этот шум, палеоруслу выявляется однозначно.

При разрежении интервала между профилями от 4а до 6а аномалия рассыпается на отдельные фрагменты, которые, однако, при интерпретации можно объединить в одну структуру. При дальнейшем увеличении u от 8а до 12а объединить отдельные аномалии затруднительно.

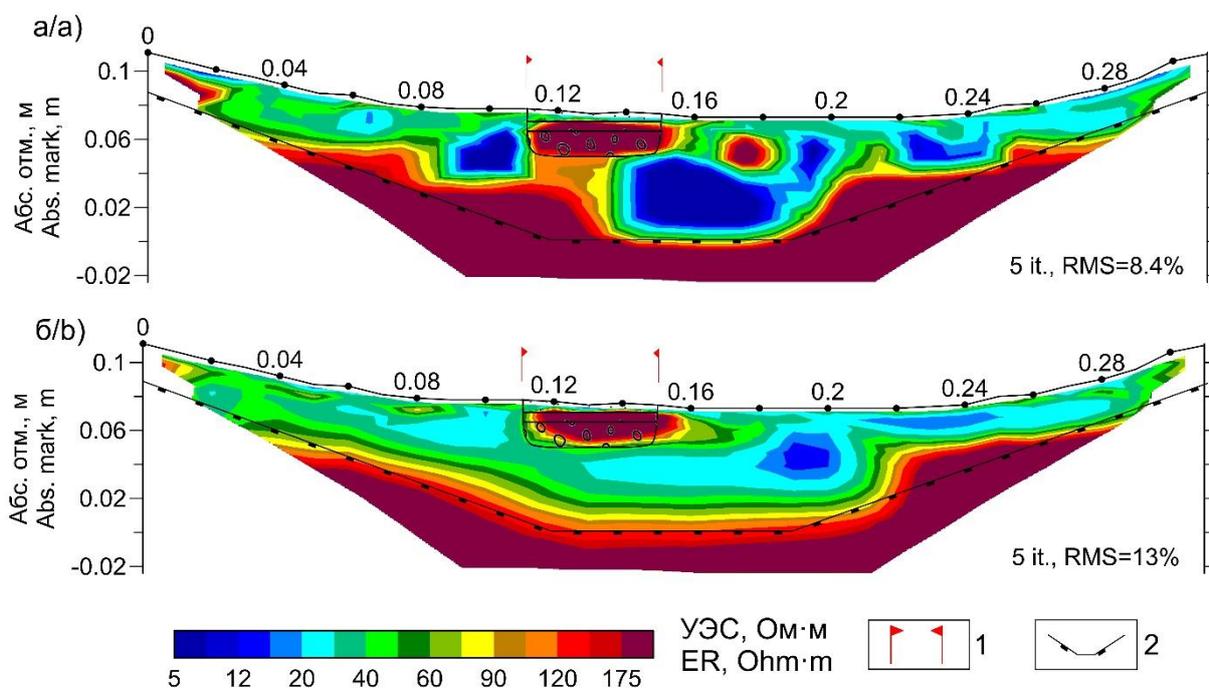


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по результатам 2-D (а) и 3-D (б) инверсии: 1 – реальные границы палеоруслу; 2 – реальное положение кровли коренных пород

Fig. 6. Geoelectric sections by the results of 2-D (a) and 3-D (b) inversion: 1 – real boundaries of the paleochannel; 2 – actual position of the bedrock top

На карте для максимальной плотности синтетических данных аномалия от палеоруслу соответствует его реальному положению и геометрическим параметрам (рис. 8, а). Аномалия имеет яркий контраст УЭС с фоновыми значениями вмещающих пород. При разрежении сети до масштаба 1:2000 (4а) анома-

лия от палеоруслу менее однородна по УЭС, но форма восстанавливается отчетливо (рис. 8, б). Для карт, где профили расположены с интервалом 6а (рис. 8, в) и 8а (рис. 8, з), аномалия начинает разделяться на отдельные фрагменты, однако изгиб палеоруслу восстанавливается удовлетворительно.

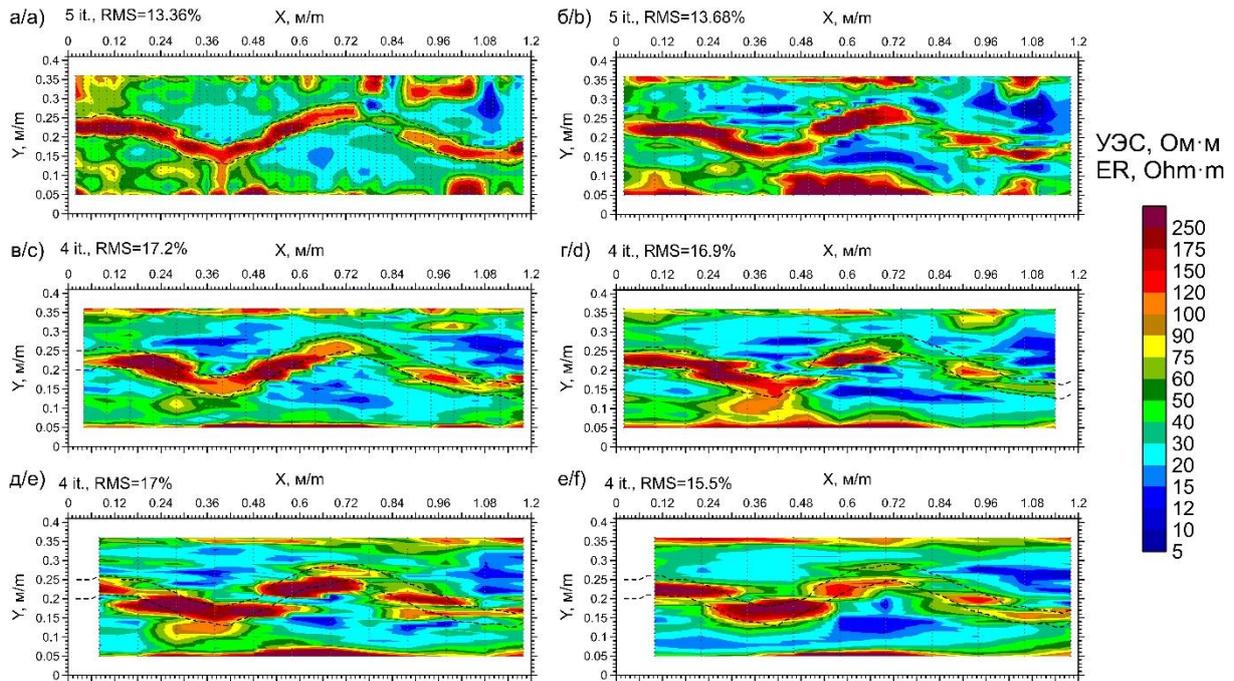


Рис. 7. Карты УЭС на глубине 0,019 м с интервалом между профилями: а) 2а (2 см); б) 4а (4 см); в) 6а (6 см); г) 8а (8 см); д) 10а (10 см); е) 12а (12 см)

Fig. 7. Maps of resistivity at the depth of 0,019 m with an interval between profiles: a) 2a (2 cm); б) 4a (4 cm); в) 6a (6 cm); д) 8a (8 cm); е) 10a (10 cm); ф) 12a (12 cm)

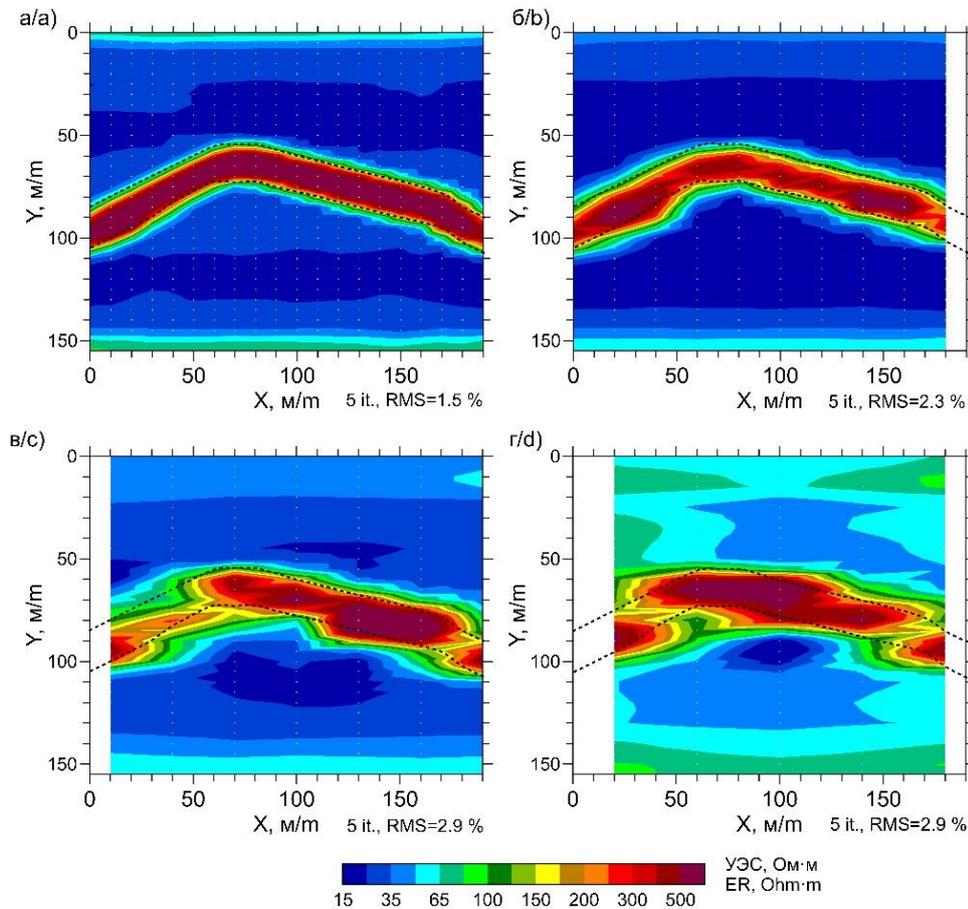


Рис. 8. Карты УЭС на глубине 3,5 м с интервалом между профилями: а) 2а (10 м); б) 4а (20 м); в) 6а (30 м); г) 8а (40 м)

Fig. 8. Maps of resistivity at the depth of 3,5 m with an interval between profiles: a) 2a (10 m); б) 4a (20 m); в) 6a (30 m); д) 8a (40 m)

Обсуждение

Для относительно прямолинейных неразветвленных и врезанных русел контур россыпи – это узкие ленточные залежи с наибольшей концентрацией металла в русловых отложениях [20]. Рационально проводить разведку с заложением разведочных линий, в том числе геофизических профилей, по нормали к направлению палеорусел.

Нами определено, что проследить форму палеорула шириной $4a$ с пологими излучинами и степенью развитости от 1,1 до 1,4 можно только до момента, пока u не превышает $6a$, что соответствует интервалу 30 м между профилями при шаге между электродами 5 м. Моделирование показало, что при поисковых геофизических работах u может быть увеличено до $10a$, что при шаге между электродами 5 м соответствует масштабу 1:5000, когда дистанция между профилями составляет 50 м.

Таким образом, расстояние между профилями должно быть таким, чтобы на один шаг излучины приходилось не менее 6 профилей на оценочной стадии работ и не менее 4 профилей на стадии поисковых работ.

Очевидно, что для русел шириной более $4a$ интервал между профилями может быть увеличен для повышения рентабельности геофизических исследований. С ростом степени развитости реки до значения 2 необходимо уменьшать величину u между профилями, чтобы не пропустить излучину. Для русел с петлеобразными ($l/L > 2$; $l = 2,8h_u$; $r = 3,8b_p$; $L/h_u > 1$) и синусоидальными ($l/L > 2$; $l = 2,5h_u$; $r = 2b_p$; $L/h_u > 1$) излучинами, когда их крылья длиннее, чем шаг излучины, сеть необходимо располагать вдоль направления оси реки.

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 отчетливо 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 (рис. 8, z) можно восстановить контур русла на карте, по данным физического эксперимента (рис. 7, z) – затруднительно. Если бы наши выводы основывались только на результатах численного моделирования, мы могли бы сделать ложные выводы о более высокой разрешающей способности метода ЭТ при разреженной сети наблюдений.

Заключение

В настоящее время применение метода электромиграции, несмотря на его эффективность при поисках россыпного золота, не регламентировано нормативной документацией, до сих пор не обоснованы методика и выбор масштабов работ. Проведённое исследование отчасти восполняет недостающую информацию и объясняет, какой масштаб полевых исследований выбрать для решения поставленной геологической задачи при относительно малых затратах.

В методе ЭТ принято, что для получения качественной трёхмерной геоэлектрической модели расстояние между профилями не должно превышать четырёхкратное расстояние между электродами, что на практике при межэлектродном шаге 5 м соответствует расстоянию 20 м. Такая плотная сеть наблюдений повлечет высокие экономические затраты. Одним из путей снижения затрат является разрежение сети наблюдения до допустимого уровня. В ходе физического и численного экспериментов определены параметры оптимальной сети наблюдения для выявления палеорула. Анализ карт показал, что для определения геометрии палеорула шириной 20 м масштаб сети геофизических наблюдений должен быть не мельче 1:3000, что соответствует расстоянию 30 м между профилями. Но для повышения экономической эффективности геофизических исследований возможно уменьшение масштаба до 1:5000 с детализацией до масштаба 1:2500 на отдельных участках.

Исследования выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torvela T., Chapman R., Lambert-Smith J. An introduction to recent advances in understanding gold deposits: from orogeny to alluvium: the importance of multi-method approaches and developing a characterization // Geological Society, London, Special Publications. – 2022. – V. 516. – № 1. – P. 1–14.
2. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю.С. Будилин, Н.А. Вашко, В.А. Джобадзе, И.А. Зуев, С.С. Кальниченко, Л.П. Кащеев, А.Г. Мочалов. – М.: ЦНИГРИ, 1992. – 307 с.
3. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. – М.: Изд-в АН СССР, 1955. – 117 с.
4. Goldfarb Y.I. Dynamic classification of alluvial gold placers in the northeast of Russia // Geology of Ore Deposits. – 2007. – V. 49. – P. 241–270.
5. Виноградова О.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. – М.: МГУ, 2009. – 171 с.
6. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills / D. Baines, D.G. Smith, D.G. Froese, P. Bauman, G. Nimeck // Sedimentology. – 2002. – V. 49. – № 3. – P. 441–449.
7. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography / J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, D. Wardrop, A. Hameed, I. Hill, C. Jeffrey, M.H. Loke, P.I. Meldrum, O. Kuras, M. Cave, D.A. Gunn // Geomorphology. – 2012. – V. 177. – P. 17–25.
8. Ismail N., Yanis M., Asyqari A. The use of magnetic and geoelectrical methods to locate buried ancient artificial canals and wells around the cultural heritage of Indrapatra Fort, Aceh, Indonesia // Geosciences Journal. – 2023. – V. 27. – № 1. – P. 67–76.
9. Imaging and locating paleo-channels using geophysical data from meandering system of the Mun River, Khorat Plateau, Northeastern Thailand / P. Nimmate, T. Thitimakorn, M. Choowong, K. Hisada // Open Geosciences. – 2017. – V. 9. – № 1. – P. 675–688.
10. Пустозеров М.Г., Тригубович Г.М. Возможности электромиграции ВП при поисках и оценке россыпей золота в Восточных Саянах // Вопросы естествознания. – 2017. – № 1. – С. 70–81.
11. 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. – V. 2. – P. 3–7.

12. Mohamed-Ali M.A., Ibrahim S.A. Geophysical and geochemical exploration of the gold bearing placer deposits in the Southern Blue Nile (Sudan) // On Significant Applications of Geophysical Methods: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1). – Tunisia, 2018. – Cham: Springer International Publ., 2019. – P. 147-150.
13. Оленченко В.В., Осипова П.С. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 1. – С. 117–129.
14. Давыдов В.А., Бакаев В.П. Геофизика на россыпных месторождениях золота // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 4. – С. 41–47.
15. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. – Тверь: ГЕРС, 2004. – 294 с.
16. Gharibi M., Bentley L.R. Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2005. – V. 10. – № 4. – P. 339–349.
17. Kuneš J. Similarity and modeling in science and engineering. – Cambridge: Springer, 2012. – 440 с.
18. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента / Н.Ц. Гагапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2014. – 77 с.
19. Геоэлектрические признаки рекультивированных отработанных россыпных месторождений золота / П.С. Осипова, В.В. Оленченко, А.С. Калганов, А.В. Чекрыжов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 158–167.
20. Чалов П.С. Руслловые процессы (русловедение). – М.: ИНФРА-М, 2016. – 565 с.
21. Loke M.H. RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2018. – 145 p.
22. Loke M.H. RES3DINV-rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2018. – 110 p.
23. Kaminsky A.E. ZondRes3D: software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. – Saint-Petersburg, 2010. – 97 p.
24. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software Tutorial. – Penang, Malaysia, 2022. – 237 p.
25. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion // Near Surface 2010-16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Zurich, Switzerland: EAGE Publications BV, 2010. – P. 164-00016

Поступила: 30.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 13.04.2023 г.

Информация об авторах

Осипова П.С., младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

Оленченко В.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

Чекрыжов А.В., инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.379

DETERMINATION OF OPTIMAL OBSERVATION NETWORK PARAMETERS FOR MAPPING PALEOCHANNEL BY THE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY METHOD BASED ON NUMERICAL AND PHYSICAL MODELING

Polina S. Osipova¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Andrey V. Chekryzhov¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the study is explained by the need to determine the methodological features of applying the electrical resistivity tomography method to map paleochannels when prospecting for placer gold.

The main aim: to determine the necessary and enough parameters of the observation network for paleochannel mapping based on numerical and physical modeling.

Object: electrical fields on the physical and numerical model of the paleochannel.

Methods: electrical resistivity tomography, physical experiment, numerical simulation.

Results. Electrical soundings by electrical tomography were carried out on a physical model of a river valley. In addition, a numerical experiment was performed on a three-dimensional model of a river valley fragment with a paleochannel. The unit of the survey scale is the distance between two electrodes, which in the experiment is 1 cm and is equivalent to 5 m in real field studies. The distance between the profiles varied from 2 to 12 cm with a step of 2 cm, which corresponds to different survey scales. In accordance with geological concepts, the authors formed a model of a river valley with a segmentally gently stage of channel formation. Three-dimensional inversion was carried out for the data set obtained at the maximum density of the observation network, and then for the data sparse to the desired scale. On the resistivity map, the paleochannel is recognized by a ribbon-shaped high-resistivity anomaly. The analysis of the maps showed that to determine the shape of the paleochannel in plan, it is necessary to use the observation network scale of 1:3000, at which the distance between the profiles is 30 m. The physical experiment results were confirmed by mathematical modeling. The scale should be reduced to 1:5000 with detailing in individual areas to improve the economic efficiency of geophysical research.

Key words:

paleochannel, electrical resistivity tomography, optimal geophysical network, physical modeling, alluvial gold placer.

The study was supported by the project of the Program of basis research no. FWZZ-2022-0024.

REFERENCES

- Torvela T., Chapman R., Lambert-Smith J. An introduction to recent advances in understanding gold deposits: from orogeny to alluvium: the importance of multi-method approaches and developing a characterization. *Geological Society, London, Special Publications*, 2022, vol. 516, no. 1, pp. 1–14.
- Budilin Yu.S., Vashko N.A., Dzhobadze V.A., Zuev I.A., Kalnichenko S.S., Kashheev L.P., Mochalov A.G. *Metodika razvedki rossypey zolota i platinoydov* [Methods of prospecting for placers of gold and platinum]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1992. 307 p.
- Bilibin Yu.A. *Osnovy geologii rossypey* [Principles of Placer Geology]. 2nd ed. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1955. 117 p.
- Goldfarb Y.I. Dynamic classification of alluvial gold placers in the northeast of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2007, vol. 49, pp. 241–270.
- Vinogradova O.V., Khmeleva N.V. *Ruslovye protsessy i formirovaniye allyuvialnykh rossypey zolota* [Channel processes and formation of alluvial placers of gold]. Moscow, MSU Publ., 2009. 171 p.
- Baines D., Smith D.G., Froese D.G., Bauman P., Nimeck G. Electrical resistivity ground imaging (ERGI): a new tool for mapping the lithology and geometry of channel-belts and valley-fills. *Sedimentology*, 2002, vol. 49, no. 3, pp. 441–449.
- Chambers J.E., Wilkinson P.B., Wardrop D., Hameed A., Hill I., Jeffrey C., Loke M.H., Meldrum P.I., Kuras O., Cave M., Gunn D.A. Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 2012, vol. 177, pp. 17–25.
- Ismail N., Yanis M., Asyqari A. The use of magnetic and geoelectrical methods to locate buried ancient artificial canals and wells around the cultural heritage of Indrapatra Fort, Aceh, Indonesia. *Geosciences Journal*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 67–76.
- Nimnate P., Thitimakorn T., Choowong M., Hisada K. Imaging and locating paleo-channels using geophysical data from meandering system of the Mun River, Khorat Plateau, Northeastern Thailand. *Open Geosciences*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 675–688.
- Pustozarov M.G., Trigubovich G.M. Effectiveness of IP electrical tomography in search and assessment of alluvial gold in the Eastern Sayan mountains. *Questions of Natural Science*, 2017, no. 1, pp. 70–81. In Rus.
- Rasskazov I.Y., Shkabarnya N.G., Litvintsev V.S., Shkabarnya G.N. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotisty Deposit. *Eurasian Mining*, 2017, vol. 2, pp. 3–7.
- Mohamed-Ali M.A., Ibrahim S.A. Geophysical and geochemical exploration of the gold bearing placer deposits in the Southern Blue Nile (Sudan). *On Significant Applications of Geophysical Methods. Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1)*. Tunisia 2018. Cham, Springer International Publ., 2019. pp. 147–150.
- Olenchenko V.V., Osipova P.S. Electrical resistivity tomography of alluvial deposits during prospecting for placer. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 1, pp. 98–108.
- Davydov V.A., Bakaev V.P. Geophysics for placer gold deposits. *Prospect and protection of mineral resources*, 2012, no. 4, pp. 41–47. In Rus.

15. Nikitin A.A., Khmelevskoy V.K. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov* [Integration of geophysical methods]. Tver, GERS Publ., 2004. 294 p.
16. Gharibi M., Bentley L.R. Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2005, vol. 10, no. 4, pp. 339–349.
17. Kuneš J. *Similarity and modeling in science and engineering*. Cambridge, Springer, 2012. 439 p.
18. Gatapova N.C., Koliuh A.N., Orlova N.V., Orlov A.Tu. *Osnovy teorii i tekhniki fizicheskogo modelirovaniya i eksperimenta* [Fundamentals of the theory and technology of physical modeling and experiment]. Tambov, TGTU Publ., 2014. 77 p.
19. Osipova P.S., Olenchenko V.V., Kalganov A.S., Chekryzhov A.V. Geoelectric attributes of reclaimed post-mining placer gold deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 158–167. In Rus.
20. Chalov R.S. *Ruslovye protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (channel science)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 565 p.
21. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2018. 145 p.
22. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2018. 110 p.
23. Kaminsky A.E. ZondRes3D: software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. St Petersburg, 2010. 97 p.
24. Loke M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software Tutorial*. Penang, Malaysia, 2022. 237 p.
25. Loke M.H., Dahlin T. Methods to reduce banding effects in 3-D resistivity inversion. *16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Zurich, Switzerland, EAGE Publications BV, 2010. pp. 164-00016.

Received: 30 March 2023.

Reviewed: 13 April 2023.

Information about the authors

Polina S. Osipova, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Vladimir V. Olenchenko, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Andrey V. Chekryzhov, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.