

УДК 550.837

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ОТРАБОТАННЫХ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Осипова Полина Сергеевна¹,
OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Оленченко Владимир Владимирович¹,
OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Калганов Александр Сергеевич¹,
KalganovAS@ipgg.sbras.ru

Чекрыжов Андрей Васильевич¹,
ChekryzhovAV@ipgg.sbras.ru

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

Актуальность исследования определяется необходимостью выявления отработанных россыпей среди целиков и оконтуривания нетронутых участков в пределах рекультивированных полигонов при поисковых и разведочных работах на россыпное золото. Задача определения таких границ на лицензионных площадях возникает, когда недропользователи, приступая к разработке месторождения, вскрывают уже перемытые рыхлые отложения, оставшиеся от хищнических отработок или неучтённой добычи прошлых лет.

Цель: определить специфические геоэлектрические признаки отработанных и неотработанных россыпей золота.

Объекты: аллювиальные россыпные месторождения золота отработанные и в естественном залегании.

Методы: электротомография, численное моделирование, полевой эксперимент.

Результаты. На основе литературных данных составлена геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании. Она включает отложения фации кос и береговых отмелей с вложенным палеоруслом и коренные породы. Модель рекультивированного полигона отличается отсутствием валунно-галечниковых отложений палеорусла. На основе геологических моделей составлены геоэлектрические модели. Отсутствие высокоомного включения в модели отработанного полигона является главным отличием от геоэлектрической модели целиковой россыпи. Численное моделирование данных электротомографии показало, что на разрезах удельного электрического сопротивления по результатам 2-D инверсии признаком целиковой россыпи является наличие локальной высокоомной аномалии от палеорусла, а в случае рекультивированного полигона – слоя в верхней части разреза, выдержанного по мощности и удельному электрическому сопротивлению. Установленные признаки выявлены при полевых исследованиях на аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока. Геоэлектрические критерии выделения целиков и отработанных россыпей являются универсальными независимо от района исследований и геологической ситуации.

Ключевые слова:

Аллювиальная россыпь, электротомография, численное моделирование, отработанный полигон, целиковая россыпь, техногенная россыпь.

Введение

Проблема выявления погребённых отработанных россыпей на лицензионных площадях нередко возникает, когда недропользователи, приступая к разработке месторождения, вскрывают уже перемытые рыхлые отложения, оставшиеся от хищнических отработок или неучтённой добычи прошлых лет. История золотодобычи на некоторых россыпных месторождениях насчитывает несколько сотен лет, такие россыпи обрабатывались многократно. Часто бывает, что документация со схемами отработки россыпи не сохранилась.

В перемытых рыхлых отложениях нередко находят значимые остаточные содержания золота. Такие россыпи называются техногенными. Например, за период с 1848 по 2018 г. из россыпей Тувы было добыто около 50 т золота [1]. При этом в разные этапы освоения россыпей на местах добычи формировались отвалы перемытых песков от мускульной, дражной и гидравлической отработки с содержанием золота до

379 мг/м³ [1]. В связи с развитием технологий добычи техногенные россыпи стали представлять интерес для повторной отработки.

В случае нерекультивированных гале-эфельных отвалов необходимость в оконтуривании отработанной россыпи не возникает. Если же в долине реки проводилась рекультивация, то при повторной отработке остро встаёт проблема определения границ перемытых отложений и целиков под планируемыми (разровненными) отвалами.

Согласно методическим рекомендациям [2, 3] при поисках и разведке россыпных месторождений геофизические методы применяют для определения мощности рыхлых отложений, расчета объемов горных работ и выбора технологии проходки выработок; изучения характера рельефа коренных пород с целью более эффективного направления поисковых и разведочных работ; картирования локальных преград (мерзлоты, таликовых зон и т. п.) для более рационального размещения горных выработок.

Для определения глубины залегания кровли коренных пород и расчленения разреза рыхлых отложений на россыпных месторождениях используют метод сейсморазведки на преломленных волнах [4]. Применение аэромагнитной съемки высокого разрешения на низком уровне от поверхности земли направлено на картирование распределения магнитных минералов в аллювиальном покрове [5].

При поисках и разведке золотоносных россыпей применяют и методы электроразведки. Для оценки мощности рыхлых отложений и определения морфологии рельефа плотика эффективным по трудозатратам является метод георадиолокации (ГРЛ) [6]. Методика ГРЛ при изучении строения массива горных пород на россыпном месторождении криолитозоны позволила определить контуры отработки дражного котлована для оценки объемов техногенных образований и обнаружить выходы скрытых скальных пород [7].

Индуктивная импульсная электроразведка по утверждению авторов [8] позволила детально расчленить разрез аллювиальных неконсолидированных отложений, выделить древние русловые врезы и локализовать участки с россыпями драгметаллов как низкоомные аномалии.

Что касается электроразведки на низкочастотном токе, то в настоящее время для поисков россыпного золота применяют электротомографию (ЭТ). Один из первых примеров выделения аллювиальных отложений на геоэлектрическом разрезе по данным ЭТ показан ещё в 1998 г. [9]. На этом же участке выполнены зондирования методом ГРЛ, которые были эффективными только в местах распространения песчано-галечниковых отложений в долине ручья и не дали информации, если в разрезе присутствовали линзы глины или ила.

Метод ЭТ в профильном варианте применен для изучения геологического строения россыпи участка

ручья Болотистого золоторудного месторождения в Хабаровском крае [10]. По данным ЭТ определены мощность и литологический состав отложений аллювия, глубина залегания коренных пород. Основным результатом исследований является выявленный слой, представленный глинисто-цементированными обломками пород, который в данной геологической ситуации является перспективным на глубинные россыпи золота.

Применение ЭТ с вызванной поляризацией (ЭТ-ВП) позволяет не только локализовать аллювиальные отложения, но и устанавливать присутствие зон золотосульфидной минерализации, которые в свою очередь являются источниками россыпной золотоносности [11]. Возможности модификации метода продемонстрированы при поисках россыпей золота в Восточных Саянах [12]. В результате исследования построена карта мощности рыхлых отложений, околонулены палеоруслу и выделены зоны золоторудной минерализации. Кроме того, отмечена необходимость создания физико-геологических моделей россыпей, характерных для изучаемых территорий. Ранее нами на основе численного моделирования и на примере полевых исследований показано, что выделяемые в поймах рек линейные аномалии высокого удельного электросопротивления соответствуют перспективным на золотоносность фациям плесов и перекатов [13].

Нам не известны публикации, где рассмотрена задача выявления отработанных россыпей среди целиков. Вероятно, ранее эта задача считалась сложной, поскольку неясны были интерпретационные критерии распознавания таких объектов. Целью настоящей работы является выявление специфических геоэлектрических признаков погребённых перемытых «песков» и «торфов», которые позволят отличать их от аллювиальных отложений в естественном залегании (целиков).

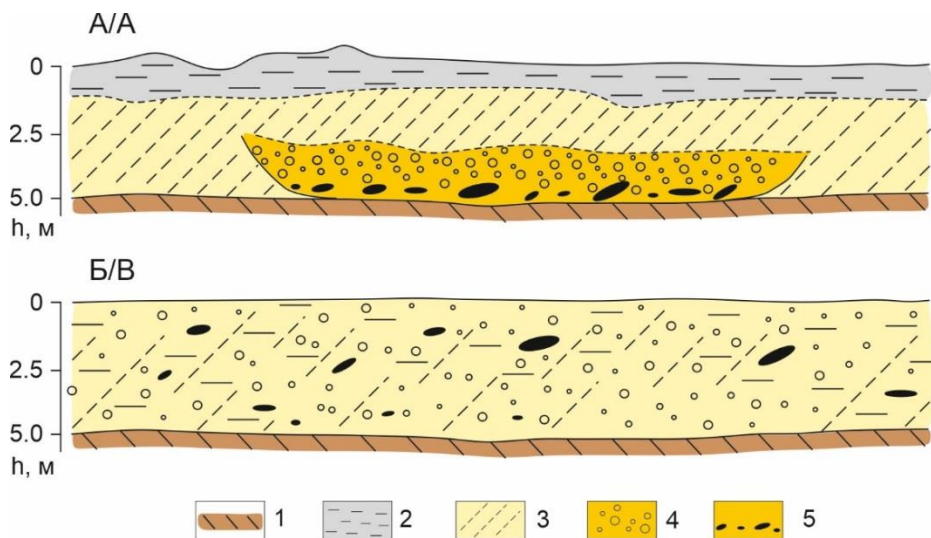


Рис. 1. Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании (А) и рекультивированного полигона (Б): 1 – коренные породы; 2 – пойменная фация; 3 – фация кос и береговых отмелей; 4 – фация перекатов; 5 – фация плёсов; 6 – восстановленный почвенно-растительный покров

Fig. 1. Geological model of alluvial placer in natural occurrence (A) and reclaimed landfill (B): 1 – bedrock; 2 – floodplain facies; 3 – facies of bars and coastal shoals; 4 – streambed facies of riffles; 5 – streambed pool facies; 6 – restored soil-plant cover

Геологическая модель

Геологическая модель аллювиальной россыпи в естественном залегании составлена на основе литературных данных [14]. На коренных породах (плотике) залегают отложения фации кос и береговых отмелей, в которые вложено палеоруло, заполненное фацией плёсов и перекаатов (рис. 1, А).

Породы плотика могут быть разными – карбонатные, песчаники, сланцы, метаморфические и магматические породы. В большинстве случаев эти породы на контакте с аллювиальными отложениями интенсивно трещиноватые или выветрелые до состояния щебня с суглинистым заполнителем или суглинка.

Пойменная фация формируется в периоды паводков и представляет собой супесчано-суглинистый материал.

Фация кос и береговых отмелей сложена мелким и хорошо промытым песчаным материалом с правильной крупной косой слойчатостью диагонального типа.

Фация плёсов и перекаатов представляет собой валунно-галечниковые отложения. Именно эта фация богата россыпным золотом и является объектом поисков при геофизических исследованиях.

В процессе отработки россыпи гидравлическим или дражным способом на поверхности формируют гале-эфельные отвалы. При рекультивации эти отвалы разравнивают бульдозерами, в результате чего получают слой техногенных отложений смешанного фациального состава (рис. 1, Б).

Геоэлектрическая модель

Состав фаций определяет их электрические свойства. В обводнённых отложениях речной долины удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород определяет не влажность, а гранулометрический состав. Здесь мы не учитываем влияние минерализации подземных вод на УЭС, считая, что в пределах речной долины она постоянна или изменяется незначительно. Такая зависимость УЭС от гранулометрического состава объясняется законом Арчи, который для полностью водонасыщенных сред имеет вид [15]:

$$\rho_r = a \cdot \rho_f \cdot n^{-m},$$

где ρ_r – УЭС породы; a – коэффициент извилистости пор; ρ_f – УЭС жидкости; n – пористость; m – степень цементации (1,3–1,6 для чистых песков). Степень цементации m указывает на уменьшение количества и размера пор или уменьшение количества закрытых (тупиковых) каналов. В работе [16] показано, что степень цементации m связана с геометрией пор, а не с цементацией. Для рыхлых нецементированных пород коэффициент извилистости пор a близок к 1. Так, при постоянном УЭС поровой воды ρ_f УЭС рыхлых пород ρ_r будет зависеть от их пористости, которая определяется гранулометрическим составом.

Известно, что в ряду галечник–песок–супесь–глина УЭС пород закономерно уменьшается [17]. Эта зависимость справедлива как для талых, так и для мёрзлых пород. Хорошо промытые валунно-галечниковые отложения имеют максимальное УЭС,

достигающее первых тысяч Ом·м. Песчаный и суглинистый заполнитель уменьшает УЭС валунно-галечниковых отложений, но оно по-прежнему остаётся высоким относительно УЭС пород других фаций.

Опыт наших исследований показал, что породы аллювиальных россыпей Сибири и Дальнего Востока имеют следующие электрические свойства (таблица).

УЭС песков фации кос и береговых отмелей изменяется в пределах первых сотен Ом·м и зависит от крупности песка и примеси илстых частиц.

Пойменная фация имеет самое низкое УЭС (первые десятки Ом·м), что связано с её высокой глинистостью.

Электрические свойства пород плотика также определяются их литологическим составом, степенью трещиноватости и выветрелости. УЭС карбонатных, магматических и метаморфических пород изменяется в пределах от первых сотен до первых тысяч Ом·м, а в некоторых случаях до первых десятков тысяч Ом·м. Низкое и весьма низкое УЭС (первые десятки – единицы Ом·м) наблюдается у плотиков, сложенных аргиллитами, глинистыми сланцами, особенно пиритизированной черносланцевой формации. В коре выветривания пород плотика и в зоне экзогенной трещиноватости УЭС изменяется в пределах первых десятков Ом·м.

В условиях криолитозоны УЭС аллювиальных отложений возрастает в десятки–сотни раз. Мёрзлые отложения фации плёсов и перекаатов имеют УЭС от нескольких тысяч до первых десятков тысяч Ом·м.

Таблица. Электрические свойства талых пород в пределах аллювиальных россыпей золота Сибири и Дальнего Востока

Table. Electrical properties of thawed rocks within alluvial placers of gold in Siberia and the Far East

| Состав пород Rock composition | | УЭС, Ом·м ER, Ohm·m |
|---|--|------------------------|
| Аллювий/Alluvium | | |
| Пойменная фация Floodplain facies | Супеси, суглинки Sandy loam, loam | 18–60 |
| Фация кос и береговых отмелей Facies of bars and coastal shoals | Песок мелкозернистый Fine sand | 60–100 |
| Фация плёсов и перекаатов Facies of riffles and pool facies | Валунно-галечниковые Boulder-pebble | 300–3000 |
| Плотик/Bedrock | | |
| Аргиллиты, глинистые сланцы/Argillites, clay shales | | 1–30 |
| Эффузивы выветрелые/Weathered effusive | | 70–150 |
| Алевриты, песчаники/Siltstone, sandstone | | 300–500 |
| Карбонатные породы (известняк, мергель) Carbonate rocks (limestone, marl) | | 300–3000 |
| Гранитоиды трещиноватые/Fractured granitoids | | 500–5000 |
| Элювий, зона экзогенной трещиноватости Eluvium, zone of exogenous fracturing | | 30–100 |

Численное моделирование

Численное моделирование данных электротомографии выполнялось с помощью программы ZondRes2D [18]. 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 [19].

В случае целиковой россыпи двумерная геоэлектрическая модель представляет собой горизонтально слоистую среду с высокоомным включением, имитирующим палеоруслу (рис. 2, А). Верхний слой – пойменная фация с УЭС 100 Ом·м, ниже залегает фация кос и береговых отмелей (300 Ом·м), внутри которой вложено высокоомное (2500 Ом·м) палеоруслу с отложениями фации плёсов и перекаатов. Плотик в модели имеет УЭС 30 Ом·м, что соответствует выветрелым породам (элювий).

Геоэлектрическая модель рекультивированного полигона (рис. 2, Б) представляет собой описанную выше трёхслойную горизонтально слоистую модель, в которой слой техногенных отложений полифациального состава имеет единое значение УЭС 300 Ом·м. Незаконномерное распределение валунов из палеоруслу в техногенном слое не приводит к существенному увеличению УЭС последнего. Отсутствие

высокоомного включения в модели погребённого отработанного полигона является главным отличием от модели целиковой россыпи. На этом и основана методика выявления отработанных россыпей по данным электротомографии.

На разрезе кажущегося сопротивления (ρ_k), полученного по результатам решения прямой задачи, в случае целиковой россыпи выделяется аномалия повышенного ρ_k от палеоруслу (рис. 2, В).

В результате решения обратной задачи восстанавливается пространственное положение палеоруслу, однако мощность фации плёсов и перекаатов завышена (рис. 2, Д).

Для модели рекультивированного полигона на разрезе ρ_k отсутствует локальная высокоомная аномалия (рис. 2, Г), а в результате инверсии с достаточной точностью восстанавливается горизонтально слоистое строение разреза (рис. 2, Е) с однородным по УЭС слоем техногенных отложений.

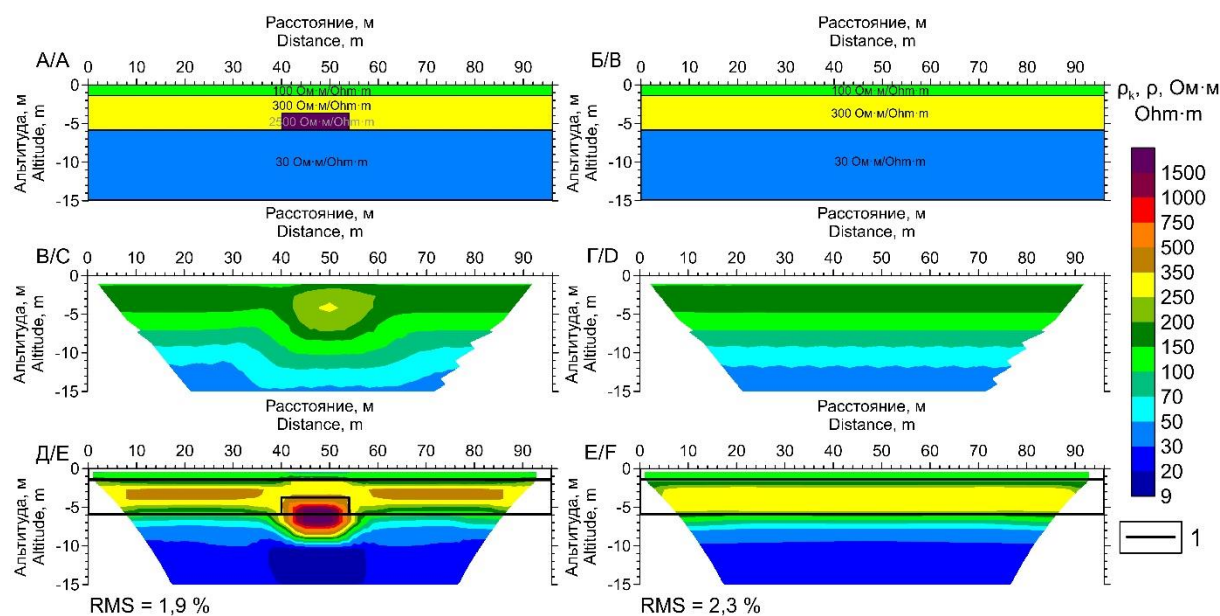


Рис. 2. Геоэлектрическая модель целиковой россыпи (А) и рекультивированного полигона (Б), разрез наблюдаемого кажущегося УЭС для модели целиковой россыпи (В) и рекультивированного полигона (Г), результат инверсии для модели целиковой россыпи (Д) и рекультивированной россыпи (Е): 1 – граница слоя в модели

Fig. 2. Geoelectric model of an original placer (A) and a reclaimed landfill (B), a section of the observed apparent resistivity for the model of a solid placer (C) and a reclaimed polygon (D), the inversion result for the model of an original placer (E) and a reclaimed placer (F): 1 – layer boundary in the model

Численное моделирование показало критерии распознавания целиковой россыпи и рекультивированного полигона отработанной россыпи по данным электротомографии. Такими критериями на разрезах УЭС по результатам 2-D инверсии являются наличие локальной высокоомной аномалии от палеоруслу в случае целиковой россыпи и однородный по УЭС слой в случае рекультивированного полигона.

Примеры полевых исследований

Полевые исследования методом электротомографии выполнялись на аллювиальных россыпях Сибири и Дальнего Востока.

Основы метода электротомографии, технологии измерений и обработки данных изложены в [20–22]. При полевых исследованиях применялась аппаратура Скала-48к12. Последовательность подключения электродов соответствовала одной из установок – Шлюмберге, дипольно-осевой, трёхэлектродной или их комбинации. Расстояние между электродами составляло 5 м.

В долине реки Горхон (Забайкалье) съемка ЭТ проведена на участках с известными границами рекультивированного полигона. В 1982–1990 гг. россыпь в долине р. Горхон детально разведана, подсчитаны и утверждены балансовые и забалансовые запа-

сы. Россыпь отработана дражным способом и частично рекультивирована. Общая мощность рыхлых отложений на реке составляла около 5 м, золотоносного пласта – 1,5 м. Коренные породы на участке представлены сланцами, гнейсами и гранитами. На геоэлектрическом разрезе по профилю через целик (рис. 3, А) в верхней части выделяется высокоомный слой (1000–15000 Ом·м) аллювия на фоне низкоомных сланцев в плотике. Перспективные для будущей отработки отложения русловой фации (целик) выделяются в интервале 180–300 м. Значения УЭС более 5000 Ом·м связаны как с литологическим составом

валунно-галечниковых отложений, так и с их мерзлым состоянием. Мощность отложений палеорула скорее всего меньше, чем толщина аномалии, как было показано ранее по результатам численного моделирования. На геоэлектрическом разрезе по профилю через рекультивированный полигон (рис. 3, Б) в интервале 190–430 м рыхлые отложения выделяются выдержанным по мощности однородным геоэлектрическим слоем с УЭС, изменяющимся в узком диапазоне от 1900 до 2300 Ом·м. Такой однородный геоэлектрический слой является признаком отработанной россыпи.

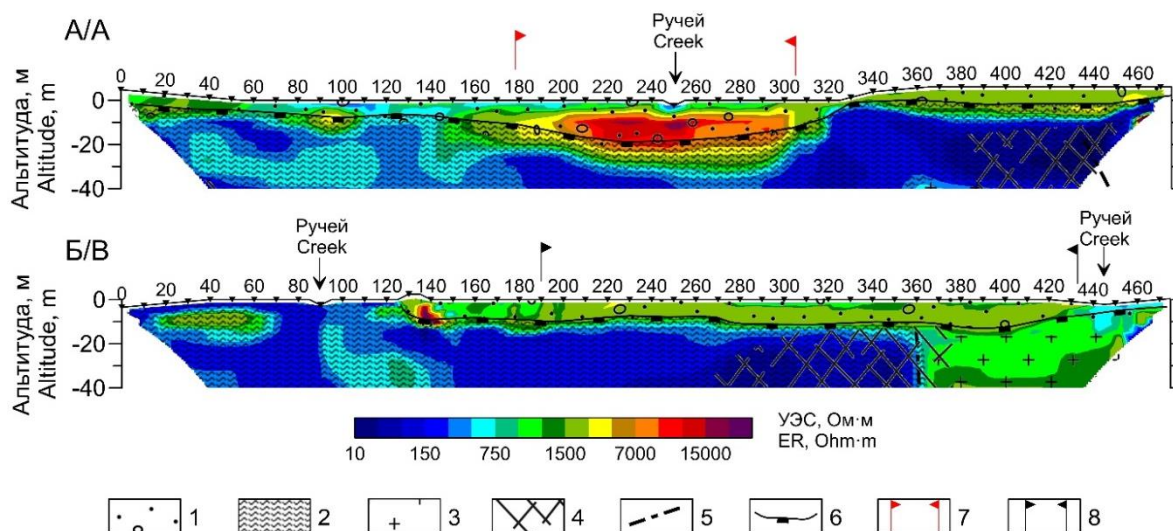


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы долины р. Горхон через целиковую россыпь (А) и рекультивированный полигон (Б) по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – граниты; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы рекультивированного полигона

Fig 3. Valley of the river Gorkhon geoelectric sections through an original placer (A) and a reclaimed landfill (B) by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – shales, gneisses; 3 – granites; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facies (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

На Дальнем Востоке россыпи руч. Дегдекан эксплуатируются с 1941 г. Добыча велась, как правило, на богатых участках россыпи. В результате в долине остались целиковые участки, местоположение которых неизвестно из-за отсутствия документации. В настоящее время особый интерес для отработки представляет крупная россыпь палеоканьона. В прошлом это была узкая пойма с отвесными склонами. Ширина каньонной россыпи 10–30 м. Мощности торфов и песков сильно колеблются от 0,6 до 4,0 м и от 0,6 до 15 м соответственно. Плотик представлен сильно трещиноватыми углистыми пиритизированными сланцами. В пределах отработанной россыпи рекультивированных полигонов нет, перемытые отложения складированы в отвалы, которые нередко навалены на целики. Опытные работы методом ЭТ проведены нами с целью определения геоэлектрических признаков нетронутых отработкой участков россыпи. На геоэлектрическом разрезе через неотработанный участок (рис. 4, А) отвалы в интервалах 10–75 м, 145–190 м имеют сопротивление 500–2000 Ом·м. В интервале 75–145 м до глубины 10 м выделены отложения рус-

ловой фации аллювия с УЭС 200–2000 Ом·м, залегающие на низкоомном плотике. На геоэлектрическом разрезе через отработанный участок (рис. 4, Б) отвал распознается по высокому сопротивлению в интервале 50–110 м. В интервале 110–140 м близко к поверхности выходят низкоомные породы плотика. Неотработанные отложения (целик) выделены в интервале 140–160 м профиля. Сопоставление разрезов показало, что нетронутая россыпь выделяется высоким УЭС. Если россыпь отработана полностью до плотика, то высокоомного слоя в верхней части разреза не наблюдается, поскольку целиковых аллювиальных отложений нет.

В Алтайском крае на территории Ануйского золотороссыпного узла разработка золотоносных россыпей на территории проводилась старателями в XVIII–IXX вв., а крупными старательскими артелями – с 1930-х гг. по настоящее время. В результате многие россыпи были выработаны и рекультивированы, но остались и нетронутые участки. ЭТ проведена с целью оценки геологического строения речных долин для планирования поисковых работ на россыпное золото. Мощность золотоносного слоя достигает 2 м,

торфов – до 3 м. Коренные породы представлены гранодиорит-порфирами, алевролитами и сланцами. Один из профилей располагался на правом берегу реки Ануй. В интервале 100–220 м он пересекал техногенный ландшафт, невыраженный в масштабе геоэлектрического разреза (рис. 5). До глубины 5 м по повышенному до 900 Ом·м на фоне 400 Ом·м УЭС выделяется русловой аллювий. В интервале 10–100 м

УЭС аллювия изменяется от 450 до 900 Ом·м в локальных областях. Между пикетами профиля 100–220 м УЭС рыхлых отложений слабо изменяется в пределах от 350 до 500 Ом·м. Таким образом, перспективные для отработки отложения долины реки в естественном залегании установлены в интервале профиля 10–100 м, а рекультивированный полигон выделен в интервале профиля 100–220 м.

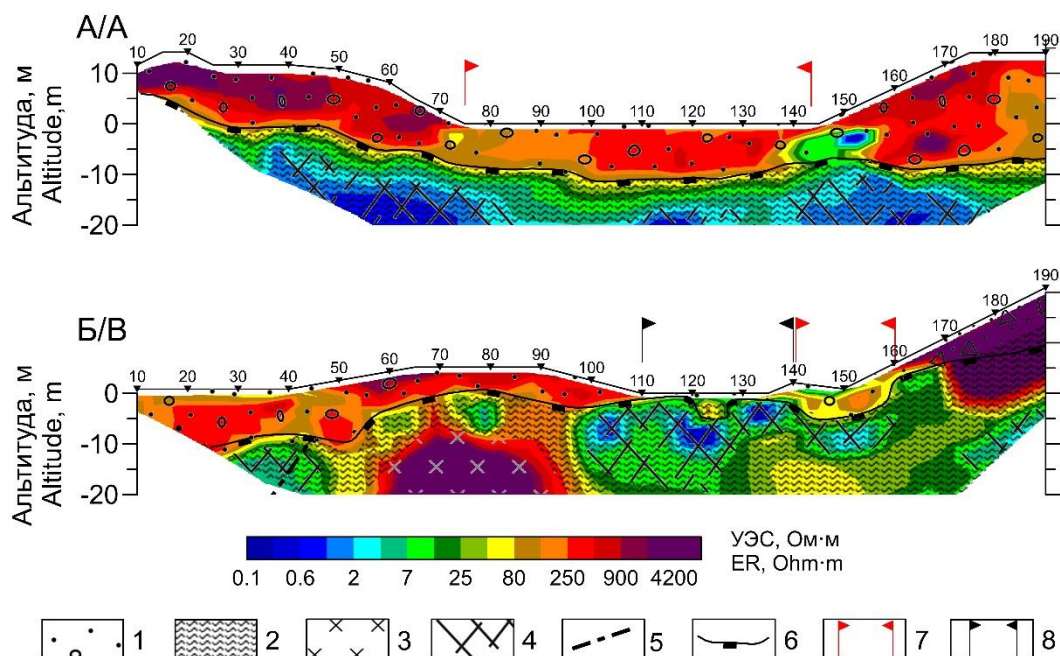


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы долины руч. Дегдекан через целиковую россыпь (А) и отработанный участок (Б) по данным ЭТ: 1 – аллювиальные отложения; 2 – сланцы, гнейсы; 3 – порфириты; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы отработанного полигона

Fig. 4. Valley of the creek Gvardeets geoelectric sections through an original placer (A) and a reclaimed landfill (B) by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – shales, gneisses; 3 – porphyrites; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facies (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

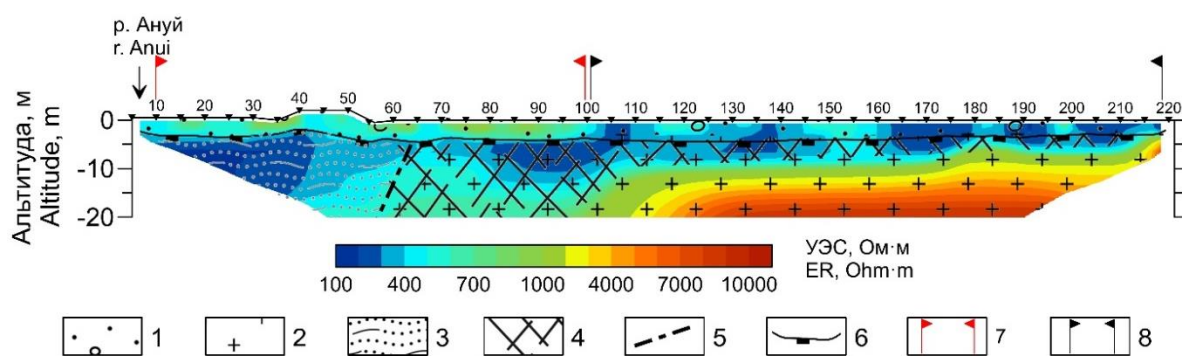


Рис. 5. Геоэлектрический разрез долины р. Ануй по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – гранодиорит-порфиры; 3 – алевролиты, сланцы; 4 – трещиноватые породы; 5 – ось разлома; 6 – кровля плотика; 7 – границы русловой фации аллювия (целик); 8 – границы рекультивированного полигона

Fig. 5. Valley of the river Anui geoelectric section by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – granodiorite-porphyrates; 3 – siltstones, shales; 4 – fractured rocks; 5 – fault axis; 6 – roof of bedrock; 7 – boundaries of alluvium of streambed facies (original placer); 8 – boundaries of the reclaimed landfill

В долине реки Воскресенка в Кемеровской области проведены исследования с целью картирования рельефа плотика. Один из профилей пересекал залеженный участок с вековыми деревьями, и только за-

росшая водоотводная канава была признаком того, что в этом месте долины реки велась добыча россыпного золота. По историческим сведениям, добыча золота на Воскресенском прииске проводилась с сере-

дины XIX в. Золотоносный пласт залегал на глубине от 1,5 до 6 м. Породы плотика представлены эффузивами. На геоэлектрическом разрезе (рис. 6) участок долины в интервале профиля 100–160 м в верхней части разреза представляет собой слой с УЭС 270–340 Ом·м.

Такой однородный геоэлектрический слой является признаком отработанной россыпи, так как ни в пределах современного русла р. Воскресенка, ни в остальной части долины не выделяются скопления высокоомных валунно-галечниковых отложений.

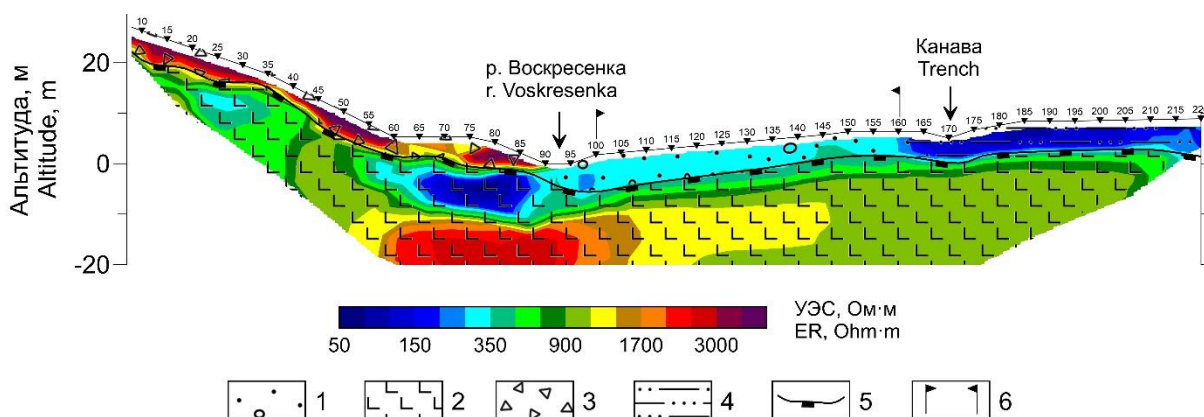


Рис. 6. Геоэлектрический разрез долины р. Воскресенка по данным электротомографии: 1 – аллювиальные отложения; 2 – эффузивные породы; 3 – делювиальные отложения; 4 – пойменные отложения; 5 – кровля плотика; 6 – границы рекультивированного полигона

Fig. 6. Valley of the river Voskresenka geoelectric section by electrotomography data: 1 – alluvial deposits; 2 – effusive rocks; 3 – diluvial deposits; 4 – floodplain deposits; 5 – roof of bedrock; 6 – boundaries of the reclaimed landfill

Анализ данных ЭТ аллювиальных россыпей показал, что рыхлые отложения рекультивированных полигонов отличаются однородностью распределения УЭС. Установлено, что целиковые (неотработанные) участки россыпей распознаются 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.

Заключение

По результатам численного моделирования и полевых исследований методом электротомографии целиковых и отработанных аллювиальных россыпей Сибири и Дальнего Востока нами установлены геоэлектрические признаки рекультивированных перемытых отложений, которые позволяют отличать их от аллювиальных отложений в естественном залегании (целики).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прудников С.Г., Хертек Ч.М. Оценка ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота Кара-Чем, Проздной (Тува) // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 2. – С. 67–72.
2. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Россыпные месторождения. – М.: Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых, 2007. – 64 с.
3. Методика разведки россыпей золота и платиноидов / Ю.С. Будилин, Н.А. Вашко, В.А. Джобадзе, И.А. Зуев, С.С. Кальниченко, Л.П. Кашеев, А.Г. Мочалов. – М.: ЦНИГРИ, 1992. – 307 с.

Численное моделирование показало, что критерием распознавания целиковой россыпи является наличие на двумерных геоэлектрических разрезах локальной высокоомной аномалии от палеорусла. Рекультивированный полигон отработанной россыпи выделяется по выдержанному по мощности слою с однородным УЭС в верхней части разреза. На этом и основана методика выявления отработанных россыпей по данным электротомографии.

Данные полевых исследований подтверждают результаты численного моделирования. Установленные критерии остаются неизменными для разных геологических ситуаций и геокриологических условий.

Мы показали, что метод электротомографии позволяет решать задачу выявления отработанных россыпей среди целиков и нетронутых участков в пределах рекультивированных полигонов, что необходимо внедрять в практику поисковых и разведочных работ на россыпное золото. Аналогичный подход следует применять и при изучении техногенных россыпей.

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

4. Гайдай Н.К., Хасанов И.М. Перспективы использования сейсморазведки при поиске и разведке аллювиальных месторождений золота // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: XIV Международная сейсмологическая школа Республики Молдова. – Обнинск, 2019. – С. 33.
5. Magnetic mapping of river channel and palaeochannel 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.
6. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations // Journal of Applied Geophysics. – 2012. – V. 81. – P. 29–37.

7. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 11. – С. 160–165.
8. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов // Геофизика. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
9. Dahlin T., Owen R. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe // 4th EEGS Meeting. – Spain, Barcelona, 1998. – P. 43.
10. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of Bolotistey Deposit / I.Y. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvintsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – № 2. – P. 3–7.
11. Осипова П.С., Оленченко В.В. Электротомография с вызванной поляризацией при поисках аллювиальной россыпи золота // Инженерная и рудная геофизика: 16-я научно-практическая конференция и выставка. – Россия, Пермь, 2020. – С. 1–7.
12. Пустозеров М.Г., Тригубович Г.М. Возможности электротомографии ВП при поисках и оценке россыпей золота в Восточных Саянах // Вопросы естествознания. – 2017. – № 1. – С. 70–81.
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. Kartashov I.P. Geological features of alluvial placers // Economic Geology. – 1971. – V. 66. – № 6. – P. 879–885.
15. Oh T.M., Cho G.C., Lee C. Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2014. – V. 140. – № 11. – P. 06014012.
16. Pore geometrical model for the resistivity of brine saturated rocks / E.M. Abousrafa, J.M. Somerville, S.A. Hamilton, P.W.H. Olden, B.D.G. Smart, J. Ford // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – V. 65. – № 3–4. – P. 113–122.
17. Schön J.H. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics. – Oxford: Elsevier, 2015. – 512 p.
18. Kaminsky A.E. ZondRes2D. Software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. Zond Geophysical Software. – Saint-Petersburg, Russia, 2010. – 139 p.
19. Loke M.H. RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual. – Penang, Malaysia, 2006. – 127 p.
20. Electrical resistance tomography – theory and practice / W. Daily, A. Ramirez, A. Binley, D. LaBrecque // Near Surface Geophysics. – 2005. – № 13. – P. 525–550.
21. Electrical resistivity surveys and data interpretation / M. H. Loke, D.F. Rucker, J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, O. Kuras // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. – Cham: Springer International Publ., 2020. – P. 1–6.
22. Instrumentation, Electrical resistivity / M.H. Loke, O. Kuras, J.E. Chambers, D.F. Rucker, P.B. Wilkinson // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. – Cham: Springer International Publ., 2020. – P. 1–7.

Поступила: 17.01.2022 г.

Информация об авторах

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

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

Калганов А.С., инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

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

UDC 550.837

GEOELECTRIC ATTRIBUTES OF RECLAIMED POST-MINING PLACER GOLD DEPOSITS

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

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

Aleksandr S. Kalganov¹,
KalganovAS@ipgg.sbras.ru

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

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

The relevance of the study is determined by the need to identify post-mining placers among the original and delineate untouched areas within the reclaimed landfills during prospecting and exploration for placer gold. The task of determining such boundaries in licensed areas arises when subsoil users, starting to develop a field, open up already washed loose deposits left over from predatory mining or unaccounted for production of previous years.

The aim: to determine the specific geoelectric features of post-mining and unworked gold placers.

Objects: alluvial post-mining placer gold deposits and in natural occurrence.

Methods: electrotomography, numerical simulation, field experiment.

Results. On the basis of literature data, a geological model of an alluvial placer in natural occurrence was compiled. It includes deposits of spits facies and coastal shallows with nested paleochannel and bedrock. The model of the reclaimed polygon is distinguished by the absence of boulder-pebble deposits of the paleochannel. On the basis of geological models, geoelectric models were compiled. The absence of a high-resistance inclusion in the model of the exhausted polygon is the main difference from the geoelectric model of the original placer. Numerical modeling of electrical tomography data showed that in the electrical resistivity sections, according to the results of 2-D inversion, a sign of a solid placer is the presence of a local high-resistivity anomaly from a paleochannel, and in the case of a reclaimed polygon, a layer in the upper part of the section, consistent in thickness and electrical resistivity. The established signs were revealed during field studies on alluvial placers in Siberia and the Far East. Geoelectric criteria for identifying original and post-mining placers are universal regardless of the study area and geological situation.

Key words:

Alluvial placer, electrical resistivity tomography, numerical modeling, post-mining polygon, technogenic placer.

The research was supported by the Basic Scientific Research Program no. FWZZ-2022-0024.

REFERENCES

- Prudnikov S.G., Hertek Ch.M. Assessment of resources of technogenic formations of spent gold placers Kara-Chem, Proezdnoy (Tuva). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 2, pp. 67–72. In Rus.
- Metodicheskie rekomendatsii po primeneniuyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. *Rossyynye mestorozhdeniya* [Methodological recommendations on the application of the Classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Placer deposits]. Moscow, State Commission for Mineral Reserves Publ., 2007. 64 p.
- Budilin Yu.S., Vashko N.A., Dzhobadze V.A., Zuev I.A., Kalnichenko S.S., Kashheev L.P., Mochalov A.G. *Metodika razvedki rossypei zolota i platinoydov* [Methods of prospecting for placers of gold and platinoids]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1992. 307 p.
- Gayday N.K., Khasanov I.M. Perspektivy ispolzovaniya seismo-razvedki pri poiske i razvedke allyuvialnykh mestorozhdeniy zolota [Prospects for the use of seismic in prospecting and exploration of alluvial gold deposits]. *XIV Mezhdunarodnaya seismologicheskaya shkola Respubliki Moldova. Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh damykh* [XIV International Seismological School of the Republic of Moldova. Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Obninsk, 2019. pp. 33.
- Foss C., Reed G., Keeping T., Davies M. Magnetic mapping of river channel and palaeochannel deposits-an example from Teetulpa, South Australia. *24th International Geophysical Conference and Exhibition*. Perth, Western Australia, 2015. pp. 1–4.
- Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, vol. 81, pp. 29–37.
- Fedorova L.L., Kulyandin G.A. Experience of using the GPR method for operational exploration of placer gold deposits in Yakutia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 11, pp. 160–165. In Rus.
- Korotkov Yu.V. Possibilities of inductive pulse geoelectricians in search and investigation of gold and platinoids placers. *Geophysics*, 2016, no. 2, pp. 54–60. In Rus.
- Dahlin T., Owen R. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. *4th EEGS Meeting*. Spain, Barcelona, 1998. p. 43.
- 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, no. 2, pp. 3–7.
- Osipova P.S., Olenchenko V.V. Elektrotomografiya s vyzvannoy polarizatsiyei pri poiskakh allyuvialnoy rossypi zolota [Electrical resistivity tomography and induced polarization for alluvial gold placer prospecting]. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika* [Engineering and Mining Geophysics 2019 16th Conference and Exhibition]. Perm, EAGE Publ. 2020. pp. 1–7.
- 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.

13. 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.
14. Kartashov I.P. Geological features of alluvial placers. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, no. 6, pp. 879–885.
15. Oh T.M., Cho G.C., Lee C. Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, vol. 140, no. 11, pp. 06014012.
16. Abousrafa E.M., Somerville J.M., Hamilton S.A., Olden P.W.H., Smart B.D.G., Ford J. Pore geometrical model for the resistivity of brine saturated rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, vol. 65, no. 3–4, pp. 113–122.
17. Schön J.H. *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*. Oxford, Elsevier Publ., 2015. 512 p.
18. Kaminsky A.E. *ZondRes2D. Software for two-dimensional interpretation of DC resistivity and IP data. Zond Geophysical Software*. Saint-Petersburg, Russia, 2010. 139 p.
19. Loke M.H. *RES2DINV-rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software Manual*. Penang, Malaysia, 2006. 127 p.
20. Daily W., Ramirez A., Binley A., LaBrecque D. Electrical resistance tomography – theory and practice. *Near Surface Geophysics*, 2005, no. 13, pp. 525–550.
21. Loke M., Rucker D.F., Chambers J.E., Wilkinson P.B., Kuras O. Electrical resistivity surveys and data interpretation. *Solid Earth Geophysics Encyclopedia. 2nd ed. «Electrical & Electromagnetic»*. Cham, Springer International Publ., 2020. pp. 1–6.
22. Loke M.H., Kuras O., Chambers J.E., Rucker D.F., Wilkinson P.B. Instrumentation, electrical resistivity. *Solid Earth Geophysics Encyclopedia. 2nd ed. «Electrical & Electromagnetic»*. Cham, Springer International Publ., 2020. pp. 1–7.

Received: 17 January 2022.

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.

Aleksandr S. Kalganov, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

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