ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 51, 26 – 33, 2026

Поступила в редакцию 22.04.2026 г.
Опубликована 27.05.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.837.31, 550.371

АНАЛИЗ ОЦЕНОК КАЖУЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В. Г. Черкасов[1,2], Д. К. Большаков[1], И. Н. Модин[1]

[1]*Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]ООО «Инженерная Геология и Геотехника», *Москва, Россия*

Результатом применения метода электротомографии, при инженерных изысканиях, является двумерная геоэлектрическая модель верхней части геологического разреза. Основой для получения свойств и геометрии геоэлектрических моделей служат результаты двумерной инверсии разрезов кажущегося сопротивления, вычисляемые с использованием специального программного обеспечения для обработки и интерпретации данных. Возможность использования первичных полевых записей метода электротомографии, хранящихся в виде цифровых временных рядов, для получения двумерных разрезов вызванной поляризуемости, как правило, не реализуется из-за ограниченности временного диапазона регистрации и низкой, для извлечения оценок поляризуемости, точности измерений. Однако, в некоторых случаях информативность результатов инверсии данных кажущейся поляризуемости соизмерима по информативности с результатами инверсии кажущегося сопротивления. Причем, подтверждаются не только свойства и геометрия геоэлектрических моделей, но и выявляются дополнительные особенности строения верхней части геологического разреза. Совместное использование результатов инверсии кажущегося сопротивления и поляризуемости позволяет получать геоэлектрическую модель, содержащую особенности и детали, связанные с двумя указанными геоэлектрическими свойствами изучаемых массивов грунтов. Настоящее сообщение посвящено анализу, извлекаемых из данных метода электротомографии, значений кажущейся поляризуемости для выбора таких параметров полевых записей, которые позволяют получать надежные оценки поляризуемости без дополнительных измерений, смены методики и аппаратуры. Приведены результаты анализа оценок кажущейся поляризуемости, извлеченных из записей метода электротомографии, полученных для лабораторной физической модели.

Ключевые слова: электротомография, кажущееся сопротивление, поляризуемость, длительность пропускания тока, оптимальная оценка кажущейся поляризуемости

EDN: OCFCGY

1. ВВЕДЕНИЕ

Основным результатом исследования строения приповерхностной части геологической среды, для решения инженерно-геологических задач с помощью метода электротомографии (ЭТ), является двумерное распределение удельного электрического сопротивления (УЭС), удовлетворительно отражающее как основные особенности изменений свойств и геометрии, так и детали строения, а также, состояния изучаемого массива грунтов. В настоящее время метод электротомографии довольно

Электронная почта авторов для переписки:

Черкасов Василий Григорьевич, e-mail: vasiliycherkasov20@gmail.com

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/ocfcgy

редко применяется для изучения поляризуемости грунтов по измерениям во временной области [Бобачев и др., 2006; Тарасов и Титов, 2006; Бобачев и Шевнин, 2022]. Большинство работ, использующих модификацию ЭТ-ВП, как наиболее информативную и эффективную технологию для исследования геологических сред со сложным строением, связано с поиском и изучением рудных тел (например, [Куликов и др., 2017]). Особенности теории и физические проявления поляризуемости геологических образований, многообразие изучаемых параметров, наличие целого ряда методических приемов и вариантов практической реализации измерений во временной и частотной областях [Куликов и Шемякин, 1978; Комаров, 1980], в целом, делают метод ВП, пожалуй, одним из самых сложных, трудоемких и дорогостоящих методов электроразведки, требующим применения специальной аппаратуры, оборудования, программного обеспечения, привлечения специалистов высокой квалификации. Современная многоэлектродная (многоканальная) аппаратура для метода ЭТ [Бобачев и др., 2006] позволяет выполнять измерения во временной области и получать оценки не только кажущегося сопротивления, но и оценки кажущейся вызванной поляризуемости [Nyquist & Corry, 2002; Бобачев и др., 2010; Ефремов и др., 2022].

Для данных электротомографии, благодаря особенностям первичных (рядовых) полевых записей, используемой многоэлектродной (многоканальной) аппаратуры и современным программам обработки, реализована возможность извлечения и использования оценок кажущейся поляризуемости [Бобачев и др., 2010] для построения двумерных геоэлектрических моделей изучаемого геологического пространства. Указанная возможность позволяет выявлять особенности строения, уточнять и дополнять геоэлектрические модели, построенные по результатам инверсии данных о кажущемся сопротивлении [Loke & Barker, 1996], а также, корректировать границы и дополнительно выделять локальные приповерхностные и глубинные неоднородности, структурные особенности, которые не проявляются в разрезах кажущегося сопротивления [Черкасов и др., 2026]. Впервые на эту особенность, при интерпретации данных ВЭЗ-ВП, в которых кажущееся сопротивление не чувствительно к некоторым существенным изменениям геологического строения приповерхностной части геологической среды, обратили внимание М.И. Симонс и И.Н. Модин [Симонс, 1994].

Настоящее сообщение посвящено анализу оценок кажущейся поляризуемости, извлеченных из записей метода электротомографии, полученных при измерениях с разными длительностями пропускания тока на специально сконструированной лабораторной физической модели. Для выявления оптимальных параметров измерений выполнены качественный и количественный анализ полученных оценок кажущейся поляризуемости и их изменений в зависимости от значений длительностей.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Физическая модель, созданная в стеклянном аквариуме (150×50 см, глубина 70 см) с водопроводной водой (вмещающая среда, УЭС около 20 Ом·м) содержала два тела (рис. 1, показаны черным цветом), – погруженный на глубину 10 см полый алюминиевый цилиндр (диаметр 9 см, центр – ПК 40 см) и лист оргстекла (вертикальная ориентация, ПК 88 см).

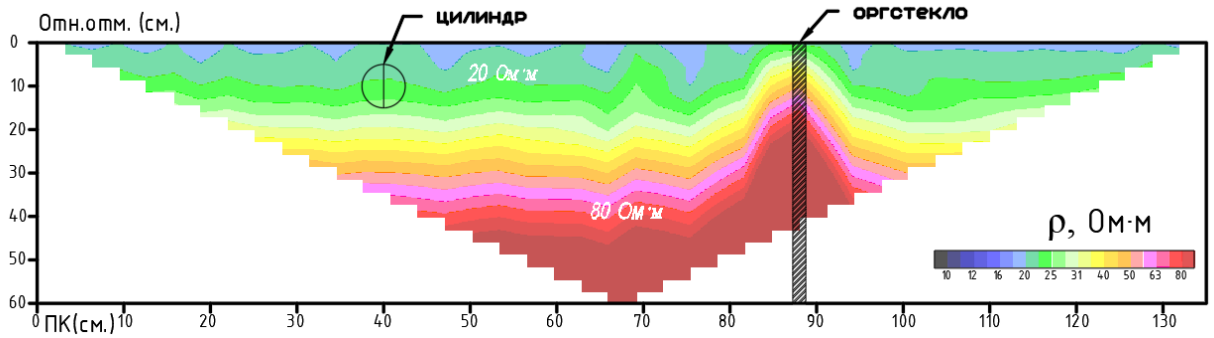

Рис. 1. Разрез кажущегося сопротивления по данным ЭТ вдоль профиля над лабораторной физической моделью, содержащей два тела – алюминиевый цилиндр и лист оргстекла (указаны черным цветом)

Измерения на поверхности физической модели выполнены со станцией «Омега-48» (www.logsys.ru) многократно (более 20 раз) на расстановке из 47 электродов (шаг 3 см) с симметричной

четырехэлектродной установкой Шлюмберже по стандартной методике электротомографии с длительностями импульсов тока 50, 100, 200 и 400 мс и 2-3 накоплениями [Черкасов и др., 2025].

Обработка первичных записей метода ЭТ выполнена по программе «TomoFusion» (автор М.А. Андреев). Значения кажущегося сопротивления (рис. 1) и кажущейся поляризуемости (рис. 2), а также, кривые спада поляризуемости (рис. 3, ВПк (кажущаяся вызванная поляризация) визуализированы с использованием программы «x2ipi» (автор А.А. Бобачев, https://x2ipi.ru/).

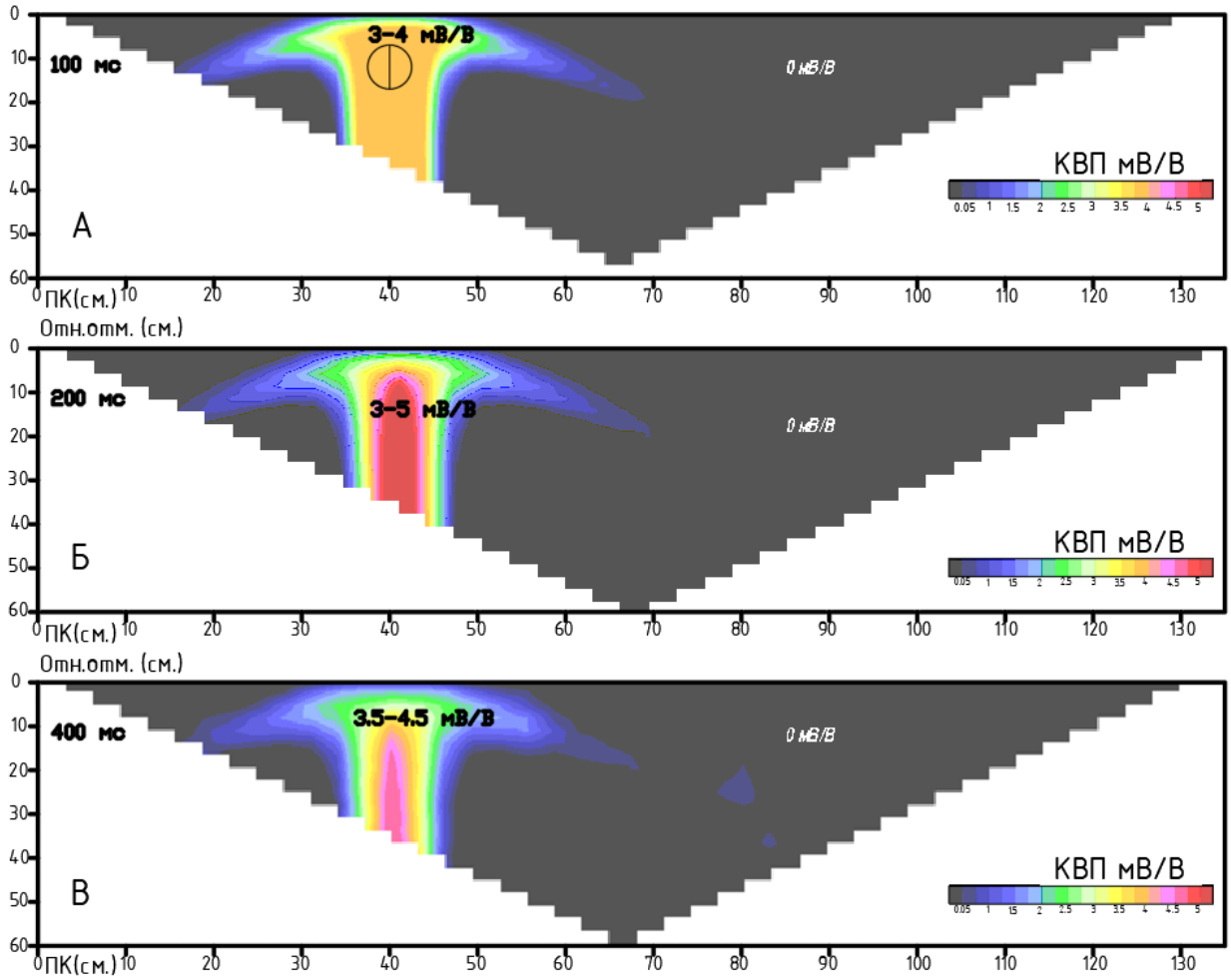

Рис. 2. Разрезы кажущейся вызванной поляризуемости (КВП) по данным ЭТ для длительностей импульса тока 100 мс (А), 200 мс (Б) и 400 мс (В) вдоль профиля над лабораторной физической моделью, содержащей два тела – алюминиевый цилиндр и лист оргстекла (показаны на рисунке 1)

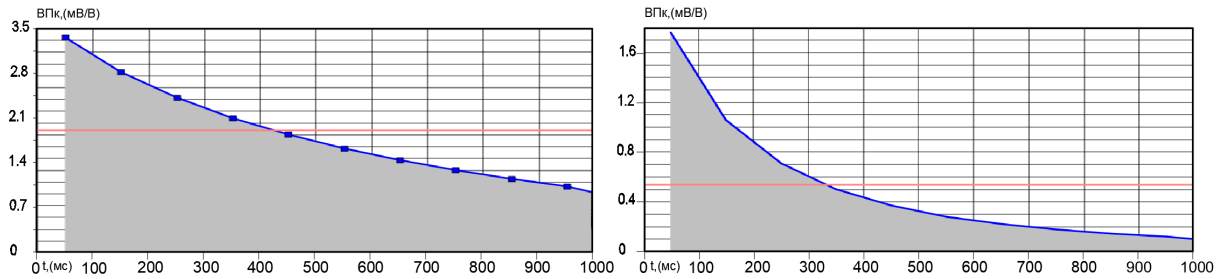

Рис. 3. Кривые спада поляризуемости для длительностей импульса тока 200 (слева) и 400 (справа) мс

Анализ результатов измерений. Значения кажущегося сопротивления (рис. 1) существенно и монотонно увеличиваются с глубиной (от 18-20 Ом·м до 100 Ом·м). Увеличение абсолютных значений

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

сопротивления не зависит от длительности импульсов тока, количества накоплений и связано с влиянием стенок аквариума. Лист оргстекла уверенно проявляется повышенными значениями сопротивлений (ПК 86-90 см, эффективная глубина 5-35 см), в отличие от полого цилиндра, проявления которого на разрезе кажущегося сопротивления визуально не фиксируются (рис. 1, ПК 40 см). На разрезах кажущейся поляризуемости ситуация противоположная. На общем фоне поляризуемости близком к нулю, полый цилиндр уверенно проявляется (рис. 1, ПК 35-40 см), пусть и незначительным, но стабильным увеличением значений поляризуемости (до 4.5-5 мВ/В). Форма визуально выявляемой (ПК 35-40 см, глубина от 4-5 см до максимальной), симметричной относительно вертикальной оси, положительной аномалии поляризуемости отличается от ожидаемой существенной вытянутостью по вертикали и наличием дополнительных, сопутствующих (наклонных) особенностей в верхней части аномальной области. Абсолютные значения внутри выявленной аномальной области поляризуемости изменяются в зависимости от длительности пропускания тока и количества накоплений, в целом, возрастая с увеличением длительности.

Следует отметить, что, формально, максимальные значения кажущейся поляризуемости (5 мВ/В и более) получены для длительности пропускания тока 200 мс (рис. 2Б), для длительности 400 мс (рис. 2В) значения кажущейся поляризуемости в аномальной области, пусть и не существенно, но, все-таки, меньше (менее 5 мВ/В), что подтверждается и по результатам качественного анализа кривых спада (рис. 3) поляризуемости для этих длительностей. Наиболее вероятное объяснение такого результата связано с тем, что цилиндр сделан из алюминия, поверхностная окисная пленка которого обладает аномальными электрофизическими свойствами.

Получение состоятельных оценок кажущейся поляризуемости. Минимальные значения поляризуемости в выявленной аномальной области (до 4 мВ/В) получены для длительности пропускания тока 100 мс (рис. 2А). Оценки значений кажущейся поляризуемости для трех длительностей представлены графически совместно с парой оценок для длительности 50 мс (рис. 4, слева). Строго говоря, по результатам качественного визуального анализа разброса демонстрируемых для каждой длительности оценок поляризуемости, формально, следовало бы сделать вывод о их несостоятельности (из-за малого количества точек опробования) и продолжить экспериментальные измерения.

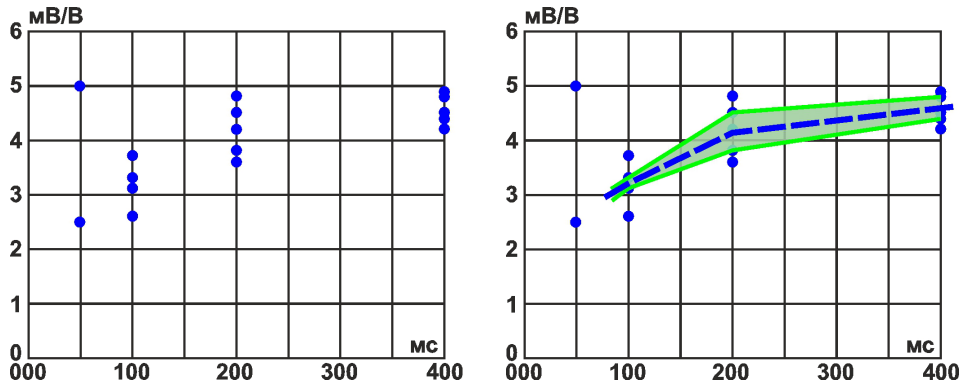

Рис. 4. Зависимость значений кажущейся поляризуемости от длительности импульса тока (слева) с оценками медианного среднего (синий пунктир) и его отклонений (зеленые линии)

Однако, с использованием свойства робастности медианного («жесткого») осреднения, уточнены и представлены графически (рис. 4, справа) медианные оценки отклонений, а также, медианное среднее для каждой длительности (кроме 50 мс).

Качественный анализ оценок поляризуемости. Максимальные и минимальные значения оценок поляризуемости (соединены жирными зелеными линиями), фактически, указывают (рис. 4, справа) на границы области вероятных значений кажущейся поляризуемости для аномальной области. Наиболее вероятные значения поляризуемости (медианы) для каждой длительности (соединены жирной пунктирной линией синего цвета) возрастают с увеличением времени пропускания тока. Абсолютные значения оценок поляризуемости (3.2, 4.1, 4.5 мВ/В) для каждой из опробованных длительностей пропускания тока (100, 200, 400 мс) весьма низкие, получены медианным осреднением, строго говоря, недостаточного для применения аппарата математической статистики количества измерений. Сами измерения выполнены в лабораторных условиях при почти полном отсутствии помех естественной и искусственной природы. И тем не менее, несмотря на небольшой объем данных для

получения количественных оценок кажущейся поляризуемости алюминиевого полого цилиндра, эта возможность авторами реализована с использованием рядовых записей метода электротомографии без дополнительных измерений, смены методики и аппаратуры. Отметим, что увеличение времени пропускания тока приводит к росту кажущейся поляризуемости, однако, несмотря на объективное увеличение абсолютных значений поляризуемости, относительные изменения могут быть несущественными. И, наоборот, – сокращение времени пропускания тока неизменно влечет снижение эффекта поляризации и, при фактическом уменьшении абсолютных значений кажущейся поляризуемости, относительные изменения могут быть несущественными.

Количественный анализ оценок поляризуемости и их изменений. В нашем случае, при увеличении длительности пропускания тока (каждый раз вдвое), сначала – от 100 мс до 200 мс и, далее, – от 200 мс до 400 мс, абсолютное значение кажущейся поляризуемости в аномальной области также увеличивается (рис. 4, справа, жирная пунктирная линия синего цвета) от 3.2 мВ/В до 4.1 мВ/В и от 4.1 мВ/В до 4.5 мВ/В, соответственно. Относительные изменения поляризуемости при этом составляют 0.9 (=4.1-3.2) мВ/В и 0.4 (=4.5-4.1) мВ/В, соответственно. Выразив в процентах (в долях) от абсолютного значения поляризуемости для длительности 100 мс (3.2 мВ/В = 100 %) указанные абсолютные значения поляризуемости для длительностей 200 мс и 400 мс, получим значения 128 % и 141 %, соответственно. Этот результат представлен графически (рис. 5, слева, график красного цвета). Аналогичные значения для относительных (в долях) изменений поляризуемости – 28 % и 13 %, при увеличении длительности от 100 мс до 200 мс и от 200 мс до 400 мс, соответственно. К последним двум значениям следует добавить значение относительного изменения кажущейся поляризуемости при увеличении длительности пропускания тока в четыре (!) раза (от 100 мс до 400 мс) – 1.3 (=4.5-3.2) мВ/В, которое в процентах (долях) от абсолютного значения поляризуемости для длительности 100 мс (3.2 мВ/В = 100 %) составляет 41 %. Вычисление абсцисс для указанных трех значений относительных изменений кажущейся поляризуемости (ординат), как средних арифметических от значений длительностей, для которых наблюдаются указанные относительные изменения, позволило представить результаты этих расчетов графически (рис. 5, справа, график красного цвета). Следует пояснить, что в нашем случае, при увеличении длительности пропускания тока в четыре раза (от 100 мс до 400 мс) относительное возрастание кажущейся поляризуемости максимально (41 %), а значение абсциссы (250 мс), вычисленное для него как среднее арифметическое от 100 мс и 400 мс ((100+400)/2 = 250), ложится между аналогично рассчитанными значениями абсцисс ((100+200)/2 = 150 мс; (200+400)/2 = 300 мс) для двух других относительных изменений поляризуемости (28 % и 13 %, соответственно). Именно поэтому график относительных изменений (рис. 5, справа, график красного цвета) кажущейся поляризуемости имеет максимум. Аналогичным образом получены и представлены графически (рис. 5), значения абсолютных (рис. 5, слева) и относительных (рис. 5, справа) изменений (в процентах от абсолютных значений поляризуемости) для длительностей 200 мс (график зеленого цвета) и 400 мс (график черного цвета). Демонстрируемые результаты (рис. 5) наглядно показывают, что наиболее значимые относительные изменения кажущейся поляризуемости (в нашем случае – 30-40 %) наблюдаются при четырехкратном увеличении длительности. В случае двукратного увеличения длительности изменения существенно меньше (в нашем случае – 10-20 %). *Обратим внимание на то, что указанные проценты – это только относительные доли (не имеют отношения к физическому свойству) трех абсолютных значений поляризуемости, полученных для длительностей 100 мс, 200 мс, 400 мс только в мВ/В, используемые для того, чтобы показать насколько* ***значения поляризуемости (в настоящем сообщении имеют размерность только [мВ/В]****, в проценты не пересчитывались) и изменения поляризуемости отличаются между собой.* Этот результат описан в литературе [Куликов и др., 2013; Соловьева и Куликов, 2015; Куликов и Соловьева, 2016]) и используется при решении прикладных задач с применением метода вызванной поляризации [Куликов и др., 2016а; 2016б; 2017] в частотной области. Другим, более интересным и важным для нас, утверждением, следующим из результатов качественного анализа представленных графиков, является заключение о возможности использования длительности 200 мс для получения оценок кажущейся поляризуемости из рядовых полевых записей электротомографии, без дополнительных измерений, смены методики и аппаратуры.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

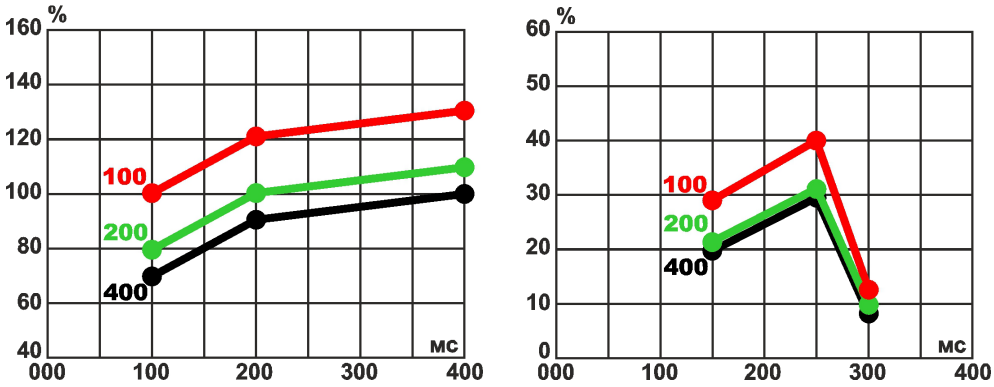

Рис. 5. Графики абсолютных (слева) и относительных (справа) изменений поляризуемости от длительности пропускания тока (в процентах=ДОЛЯХ от абсолютного значения для трех длительностей – 100, 200 и 400 мс)

Рациональная и оптимальная оценки кажущейся поляризуемости. Действительно, для длительности 200 мс (очень часто используемой при проведении работ методом электротомографии) в нашем лабораторном эксперименте, получено абсолютное значение кажущейся поляризуемости (4.1 мВ/В) существенно большее, чем для длительности 100 мс (3.2 мВ/В), при этом оно незначительно меньше оценки для длительности 400 мс (4.5 мВ/В), использование которой требует в два раза большего времени на измерения, что при выполнении производственных работ является нерациональным. Следовательно, оценка кажущейся поляризуемости для длительности 200 мс является оптимальной по величине абсолютного значения (сигналов, поляризуемости) и рациональной по временным затратам. Конечно, для длительности 100 мс время измерений существенно меньше и это наилучшее (из опробованных) значение длительности, с позиции рациональности оценки (по времени). Однако, с позиции оптимальности (в данном случае по значению амплитуды), – происходит ощутимое уменьшение амплитуды (неоптимальная оценка), которое в нашем лабораторном эксперименте, не является существенным, из-за почти полного отсутствия помех, наличие которых в полевых условиях затруднит, а, скорее всего, сделает невозможным получение результата.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа материалов лабораторного эксперимента подтверждают возможность получения оценок кажущейся поляризуемости из рядовых полевых записей метода электротомографии способом, предложенным И.Н. Модиным и реализованным М.А. Андреевым в программном обеспечении к электроразведочной станции «Омега-48» [Бобачев и др., 2010]. Из результатов качественного и количественного анализов измерений, выполненных на физической модели, следует возможность получения надежных оценок кажущейся поляризуемости. Указанная возможность удовлетворительно реализуется при условии выполнения рядовых полевых записей метода электротомографии на длительностях пропускания тока не менее 200 мс. С использованием результатов измерений на лабораторной физической модели в условиях почти полного отсутствия помех и результатов качественного и количественного анализа оценок поляризуемости для трех длительностей пропускания тока, показано, что для длительности пропускания тока 200 мс, эффективная оценка кажущейся поляризуемости является рациональной.

ЛИТЕРАТУРА

- *Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А.* Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, № 2, 2006. С. 14-17.
- *Бобачев А.А., Марченко М.Н., Дудник А.В., Андреев М.А., Каминский А.Е.* Инструкция по выполнению работ методом наземной двумерной электротомографии с аппаратурой "Омега-48" // под ред. проф. И.Н. Модина, проф. В.А. Шевнина. М.: "НПЦ Геоскан", "Логис", 2010. 58 с.
- *Бобачев А.А., Шевнин В.А.* Влияние приповерхностного слоя геоэлектрического разреза на результаты методов сопротивлений и вызванной поляризации. // Геофизика, №6, 2022. С. 43-48.
- *Ефремов И.Д., Большаков Д.К., Модин И.Н.* Возможность использования полевых записей метода электротомографии для получения информации о полях электрохимической природы // ГеоЕвразия –

2022. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес: материалы V междунар. науч. конф., Москва, Россия, 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.gece.moscow/2022 (дата обращения: 27.03.2023)

- *Комаров В.А.* Электроразведка методом вызванной поляризации // 2-е изд., перераб. и доп. Л., Недра, 1980. 391 с.
- *Куликов А.В., Шемякин Е.А.* Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации // Москва, «Недра», 1978. 175 с.
- *Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В.* Результаты использования метода ВЭЗ-ВП при изучении песчано-гравийных смесей на территории Мосальского района Калужской области // Вестник Московского университета, Серия 4: Геология, Изд-во Моск. ун-та (М.), № 2, 2016а. С. 52-58.
- *Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В.* Результаты опытных работ методом ЭТ-ВП на месторождении песчано-гравийных отложений Вязищи в Калужской области // Инженерные изыскания, №8, 2017. С. 44-54.
- *Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В., Яковлев А.Г.* Использование метода вызванной поляризации при изучении песчано-гравийных отложений // Инженерные изыскания, № 14, 2016б. С. 42-49.
- *Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжеева И.Т., Яковлев А.Г.* Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра. // Геофизика, №6, 2013. С. 23-31.
- *Куликов В.А., Соловьева А.В.* Результаты измерений методом спектральной вызванной поляризации на слабоконтрастных магнитных аномалиях // Разведка и охрана недр, №3, 2016. С. 26-31.
- *Симонс М.И.* Математическое моделирование поля вызванной поляризации с учетом влияния вмещающего геоэлектрического разреза // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, 1994. 22 с.
- *Соловьева А.В., Куликов В.А.* Результаты многочастотных фазовых измерений вызванной поляризации на слабоконтрастных магнитных аномалиях // Научно-практическая конференция и выставка «Инженерная, угольная и рудная геофизика, 2015. С. 95-98.
- *Тарасов А.В., Титов К.В.* Оценка распределения времен релаксации по данным метода вызванной поляризации во временной области // Геофизика, №6, 2006. С. 42-56.
- *Черкасов В.Г., Большаков Д.К., Модин И.Н.* Сравнение оценок поляризуемости по экспериментальным данным метода электротомографии // Труды VIII Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», Том II(III), 2025. С. 73-77.
- *Черкасов В.Г., Большаков Д.К., Модин И.Н.* Уточнение геоэлектрических моделей с привлечением оценок поляризуемости массива грунтов, полученных из полевых записей метода электротомографии // Труды IX Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2026. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», 2026. С. 71-75.
- *Loke M.H., Barker R.D.* Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting, 44, 1996. P. 499-523.
- *Nyquist J.E., Corry, C.E.* Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics // The Leading Edge, 21(5), 2002. DOI: 10.1190/1.1481251.

ANALYSIS OF APPARENT CHARGEABILITY ESTIMATES FROM ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY MEASUREMENTS ON A PHYSICAL MODEL

Cherkasov V. G., Bolshakov D. K., Modin I. N.

The result of the application of the electrotomography method, in engineering surveys, is a two-dimensional geoelectric model of the upper part of the geological section. The basis for obtaining the properties and geometry of geoelectric models is the results of two-dimensional inversion of apparent resistance sections, calculated using special software for data processing and interpretation. The possibility of using primary field records of the electrotomography method, stored as digital time series, to obtain two-dimensional sections of induced polarizability, is generally not realized due to the limited time range of registration and low measurement accuracy for extracting polarizability estimates. However, in some cases, the information content of the results of apparent polarizability data inversion is comparable to the information content of the results of apparent resistance data inversion. Moreover, not only are the properties and geometry of the geoelectric models confirmed, but additional features of the structure of the upper part of the geological

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

section are also revealed. The combined use of the results of apparent resistance and polarizability inversion allows for the creation of a geoelectric model that contains features and details related to the two specified geoelectric properties of the studied soil masses. This report is devoted to the analysis of apparent polarizability values extracted from electrotomography data to select such parameters of field records that allow obtaining consistent, optimal and rational estimates of polarizability without additional measurements, change of the technique and equipment. The results of the analysis of estimates of apparent polarizability extracted from the records of the electrotomography method obtained for the laboratory physical model are given.

KEYWORDS: ERT, APPARENT RESISTIVITY, INDUCED POLARIZATION, DURATION OF CURRENT FLOW, OPTIMAL ESTIMATION OF APPARENT CHARGEABILITY.