

УДК 550.372

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНЫХ СРЕД ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МНОГОРАЗНОСНОЙ УСТАНОВКОЙ ЗСБ НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

П.Ю. Легейдо¹, Е.В. Агеенков^{1,2}, И.Ю. Пестерев¹, С.В. Яковлев¹

¹ ООО СГНПК. Россия, 664044, г. Иркутск, ул. Шапова, 14; e-mail: irkutsk@dnme.ru

² Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет (ИРНИТУ). Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; e-mail: aev@dnme.ru

Аннотация. На основе численного эксперимента определены некоторые проблемы изучения численных характеристик поляризационных свойств среды, в терминах модели Коула-Коула, при индукционном возбуждении электромагнитного поля и индуктивной регистрации отклика многоразносной установкой ЗСБ над горизонтально-слоистой проводящей поляризующейся средой. Показано присутствие эквивалентности поляризационных параметров для модели поляризующегося полупространства и слоистой модели типичной для юга Сибирской платформы.

Ключевые слова. Индукционно вызванная поляризация, индуктивный источник электромагнитного поля, модель Коула-Коула, частотная дисперсия проводимости, многоразносная установка ЗСБ, эквивалентность в электроразведке, поляризующееся полупространство, электроразведка методами переходных процессов на Сибирской платформе.

OCCURENCE OF EQUIVALENCE OF 1-D POLARIZABLE MEDIUM BY THE TEM SOUNDING WITH SEVERAL OFFSETS FOR SIBERIAN PLATFORM

P.Y. Legeydo¹, E.V. Ageenkov^{1,2}, I.Y. Pesterev¹, S.V. Iakovlev¹

¹ Siberian Geophysical Research Production Company Ltd. Russia, 664044, Irkutsk City, 14 Shapova st. e-mail: irkutsk@dnme.ru

² National Research Irkutsk State Technical University. Russia, 664074, Irkutsk City, 83 Lermontov st. e-mail: aev@dnme.ru

Abstract. The numeric experiment with magnetic source and receivers determined several problems of research of numerical characteristics of polarizable medium. Occurrence of polarizable parameters equivalences for polarizable half-space and layered model typical for the south of the Siberian Platform is shown.

Key words. Inductively induced polarization, magnetic source, Cole-Cole model, frequency dispersion of conductivity, TEM sounding with several offsets, equivalences in electromagnetic surveys, polarizable half-space medium, TEM on Siberian Platform.

ВВЕДЕНИЕ. При прохождении электрического тока через многокомпонентную двухфазную (многофазную) геологическую среду возникают процессы разделения носителей электрических зарядов под его воздействием, а после прекращения воздействия, этого внешнего для среды тока, происходит разряда запасаемой энергии в виде токов вызванной поляризации (ВП). Несмотря на свою разнообразную природу, феноменологически, ВП проявляется как электромагнитный процесс [8, 9, 10, 20, 31]. Интенсивность токов ВП зависит от свойств геологической среды, а регистрируемый на ее поверхности отклик может показывать присутствие некоторых минералов (графита, пирита и т.д.) [18] или диагностировать физико-химические изменения геологических образований [23]. Поэтому вызванная электрическая поляризация используется для решения ряда рудных, инженерно-геологических и нефтегазопроисловых задач.

Зачастую, в разведочной геофизике источником тока для изучения процессов ВП служит заземленная электрическая линия и последовательность прямоугольных импульсов тока низкой частоты, подаваемых в среду с ее помощью. В этом случае основную часть процессов ВП порождает гальванический ток, текущий между двумя заземлениями линии АВ. Однако, при использовании в качестве источ-

ника индуктивной петли, в среде также возникают процессы ВП индукционной природы, вызванные вихревым током [12, 16]. Переходные процессы в присутствии индукционно-вызванной поляризации (ВПИ), регистрируемые индуктивным приемником, отличаются от становления над проводящей средой и не могут быть аппроксимированы лишь изменением проводимости разреза с глубиной. Для их описания требуется вводить частотную дисперсию сопротивления (проводимости) среды.

Такие специфические переходные характеристики с нарушением монотонности и изменением полярности ЭДС отмечаются при проведении работ методом переходных процессов (МПП) в районах распространения многолетнемерзлых пород (Антарктида, Якутия, Канада, Аляска). Эти особенности сигналов являются проявлением быстропротекающей индукционно-вызванной электрической поляризации (БВПИ) геологической среды [4, 5, 21, 26, 27, 28, 29, 34, 38, 40, 41]. При моделировании таких эффектов учет ВПИ осуществляется использованием комплексных, зависящих от частоты электрических свойств среды – удельной электропроводности или удельного электрического сопротивления (УЭС), описываемых формулой Коула-Коула (1) [24, 25, 31, 33, 37, 39].

$$\rho(\omega) = \rho(0) \cdot \left(1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c}\right), \quad (1)$$

где $\rho(0)$ – УЭС на постоянном токе (Ом·м); η – коэффициент поляризуемости (доли ед.), равный $\frac{\rho(0) - \rho(\infty)}{\rho(0)}$, где $\rho(\infty)$ – УЭС на бесконечно высо-

кой частоте (Ом·м); τ – время релаксации или постоянная времени (с); c – показатель степени, в некоторой литературе называется показатель затухания (б.р.); ω – круговая частота (сек.⁻¹).

Инверсия полевых измерений, в частности для Якутии [11, 12, 14, 16, 17, 28, 29, 35, 36], выполненная с учетом поляризуемости среды, показала, что эффекты ВПИ порождаются поляризацией мерзлых пород верхней части геологического разреза (ВЧР) мощностью до 100 м. Мерзлые породы ВЧР характеризуются устойчивым набором поляризационных параметров, входящих в формулу Коула-Коула: поляризуемость заключена в диапазоне от 0,2 до 0,85, при этом большая часть значений η попадает в интервал 0,2–0,5; постоянная времени τ поляризационного процесса изменяется от 35 до 250 мкс при среднем значении 50–100 мкс. В отличие от η и τ показатель степени c изменяется в узких пределах (от 0,8 до 1) и, в большинстве случаев, близок к единице.

Исследования синтетических сигналов переходных процессов с присутствием БВПИ от простых моделей (поляризующееся полупространство, двухслойная среда с поляризующимся верхним слоем или основанием) [11, 12, 13, 36], позволили оценить чувствительность сигнала к параметрам, описывающим частотную дисперсию электрических свойств среды, и возможности восстановления параметров референтных моделей при инверсии синтетического сигнала от них. Временной диапазон этих расчетов начинался с микросекунд и заканчивался первыми миллисекундами.

При выполнении нефтегазописковых работ ЗСБ на ряде площадей юга Сибирской платформы зафиксированы переходные процессы, протекающие немонотонно, часто со сменой знака сигнала становления. Такие измерения возможно аппроксимировать только моделями с присутствием частотной дисперсии сопротивления, а учет поляризуемости снимает проблему появления на геоэлектрических разрезах и картах сопротивления не существующих в реальности геологических объектов. В результате инверсии полевых данных определено, что проявление ВПИ связано с породами верхней части разреза и характеризуется параметрами: $\rho = 5 - 160$ Ом·м, $\eta = 0,01 - 0,14$, $\tau = 0,02 - 0,5$ с, $c = 0,5 - 0,6$ б.р. ВПИ с такими значениями параметров может быть связано с поляризационными процессами другого типа, протекающими в двойных электрических слоях между электронными проводниками и ионной средой. Время релаксации этих процессов составляет десятки – сотни мс. Предположительно, поляризуемость верхней части разреза связана с вкрапленной сульфидной минерализацией [19].

Временной диапазон расчета сигнала от 0,5 до 500 мс, зачастую использующийся при проведении работ ЗСБ на Сибирской платформе [20].

Изучение частотной дисперсии электрических свойств льда [5] и мерзлых пород в условиях естественного залегания с последующей инверсией данных дали основание предположить, что поляризуемость η и постоянная времени τ не являются независимыми параметрами, если $c \approx 1$ [15, 17, 35].

При моделировании измерений становления поля от заземленной электрической линии над проводящей поляризующейся средой была отмечена корреляция параметров поляризации [2, 3]. Исследование функций цели обратной задачи в пространстве параметров η - τ - c для η в диапазоне от 0,001 до 0,2, для τ от 1 мс до 1 с и для c от 0,3 до 1 б.р. показали связь этих параметров в виде инварианта $\eta \cdot \tau^c = \text{const}$ [1]. Сигнал становления для этого исследования рассчитывался от 3 мс до 2 с. Впоследствии, при инверсии полевых измерений от электрической линии стала применяться практика фиксирования постоянной времени на априорно выбранных из геологической ситуации значениях.

Вопрос эквивалентной связи поляризационных параметров для индуктивной съемки переходных процессов также требует рассмотрения. Суть эквивалентности заключается в получении мало отличающихся откликов от моделей, в которых геоэлектрические параметры, в данном случае описывающие процесс ВП, изменяются согласно определенной зависимости. При наличии эквивалентных взаимосвязей характеристик среды нельзя говорить о изучении каждой из них по отдельности, а возможно лишь определение инварианта, такого как продольная проводимость или поперечное сопротивление [22]. В направлении изучения эквивалентности поляризационных параметров одномерной среды для индуктивной геоэлектрики был проведен численный эксперимент, результаты которого описаны ниже. Нужно отметить, что расчеты выполнены для модели поляризующегося полупространства и слоистой модели характерной для юга Сибирской платформы и выводы, сформулированные в ней, нельзя назвать общими, а вопрос требует более глубокого исследования.

Решение обратной задачи электроразведки, как правило, ведется в области моделей ограниченной априорными представлениями о геоэлектрической среде. Тем не менее, если о распределении проводимости среды можно получить дополнительные сведения из каротажных исследований, то о поляризационных характеристиках среды таких сведений практически нет. Однако инверсия электроразведочных данных более эффективна в классе задач с ограничениями, эти ограничения для поляризационных параметров можно ввести основываясь на опыте предыдущих решений и на знании об эквивалентных связях для поляризующейся модели среды.

Описание численного эксперимента

Перед исследованием были поставлены следующие задачи: получить синтетический отклик от одномерной проводящей поляризующейся среды для многоразносной установки ЗСБ (рис. 1); решить ряд обратных задач для этого отклика для нахождения эквивалентных моделей, позволяющих описать синтетический отклик с невязкой менее 5% по ЭДС.

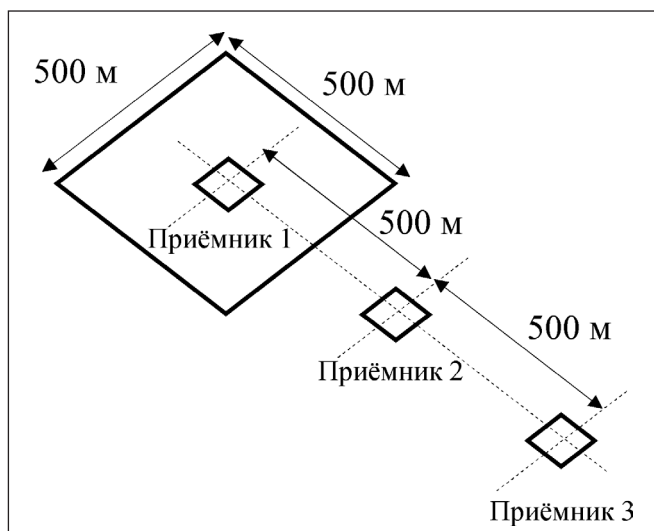


Рис. 1.

Схема многоразностной установки ЗСБ для расчета сигнала, состоящая из источника размером 500 на 500 м и трех приёмников: соосного и удаленных на 500 и 1000 м.

Уровень невязки в 5% выбран, основываясь на точности измерений, определенной инструкцией по электроразведке [7].

Для инверсии использовался метод главных осей [32, 34], основанный на аппроксимации оврага целевой функции кривой второго порядка и движению по оврагу с поиском нескольких локальных минимумов. Метод не использует частные производные и более устойчив при исследовании целевых функций с экстремумами.

Принятый временной диапазон расчета сигнала от 0,5 мс до 1,2 с часто используется при проведении работ ЗСБ на Сибирской платформе. Схема установки предполагала расчет сигнала становления для трех датчиков: соосного и удаленных от центра питающей петли на 500 и 1000 м. В качестве источника задавалась квадратная петля с размерами сторон 500 м.

Невязка во время решения обратной задачи рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{2 \cdot (\mathcal{E}DC_P(t_i) - \mathcal{E}DC_{II}(t_i))}{\mathcal{E}DC_P(t_i) + \mathcal{E}DC_{II}(t_i)} \right)^2}, \quad (2)$$

где индексом P обозначен сигнал от референтной модели, индексом II – сигнал от текущей модели изменяющейся в процессе инверсии.

Распределение невязки во времени рассчитывалось по формуле:

$$\delta(t) = \frac{2 \cdot (\mathcal{E}DC_P(t) - \mathcal{E}DC_{II}(t))}{\mathcal{E}DC_P(t) + \mathcal{E}DC_{II}(t)},$$

где значение индексов аналогично (2).

Поиск эквивалентных решений для проводящего поляризующегося полупространства

Расчеты для поиска эквивалентных моделей поляризующегося полупространства проводились для описанной установки и указанного временного

диапазона. Задавалось пять референтных моделей с параметрами, различающимися только временем релаксации (табл. 1).

Таблица 1

Модели проводящего поляризующегося полупространства

Слой	ρ , Ом·м	η	τ , с	c , б.р.	h , м
1	100	0,1	0,001 (модель 1), 0,01 (модель 2), 0,1 (модель 3), 1 (модель 4), 10 (модель 5)	0,5	∞

Для каждой модели проводился поиск эквивалентных решений при закреплении времени релаксации на смещенных значениях. Эквивалентным, считалось решение, если невязка между откликом от него и от референтной модели составляла меньше 5%.

На рис. 2 показаны области эквивалентных и неэквивалентных моделей для полупространства с пятью различными истинными значениями времени релаксации. При истинном значении времени релаксации поляризующегося полупространства равном 0,001 с, найдены эквивалентные решения для смещенных значений τ от 0,01 с до $1e-5$ с. Для смещенных значений τ больше 0,01 с эквивалентное решение найти не удалось.

При истинном значении τ равном 0,01 с, существуют эквивалентные модели со смещенным, на меньшие значения 0,001 и 0,0001 с, временем релаксации и не найдено эквивалентное решение при смещении времени релаксации на большие значения (до 0,1 с).

При истинном значении $\tau = 0,1$ с, не удалось найти эквивалентное решение при смещении времени релаксации как на большие (0,01 с), так и на меньшие значения (1 с).

При истинном значении $\tau = 1$ с, удалось найти эквивалентные решения для больших значений времени релаксации 10 и 100 с, однако, при смещении времени релаксации на меньшие значения 0,1 с, эквивалентного решения найти не удалось.

При истинном значении $\tau = 10$ с, существуют эквивалентные решения как для меньших значений времени релаксации 5 и 1 с, так и для больших – 100 с, но не удалось найти эквивалентное решение при уменьшении τ до 0,5 с.

Найденные пределы областей эквивалентности для моделей с различными временами релаксации поляризационного процесса, показали, что эквивалентность связана с тем, в какой момент время релаксации процесса ВП перекрывалось диапазоном времен регистрации переходного процесса. Если время релаксации тяготело к середине времен измерений, то было возможно точно определить его значение и значения других параметров поляризации по результатам инверсии, если оно находилось на краю диапазона времен измерений, то определить τ и другие поляризационные характеристики становилось невозможно из-за эквивалентных решений аппроксимирующих референтный сигнал.

Рис. 2.
Области эквивалентных
и неэквивалентных
моделей для полупро-
странства с пятью
различными истинными
значениями времени
релаксации
(0,001, 0,01, 0,1, 1 и 10 с)

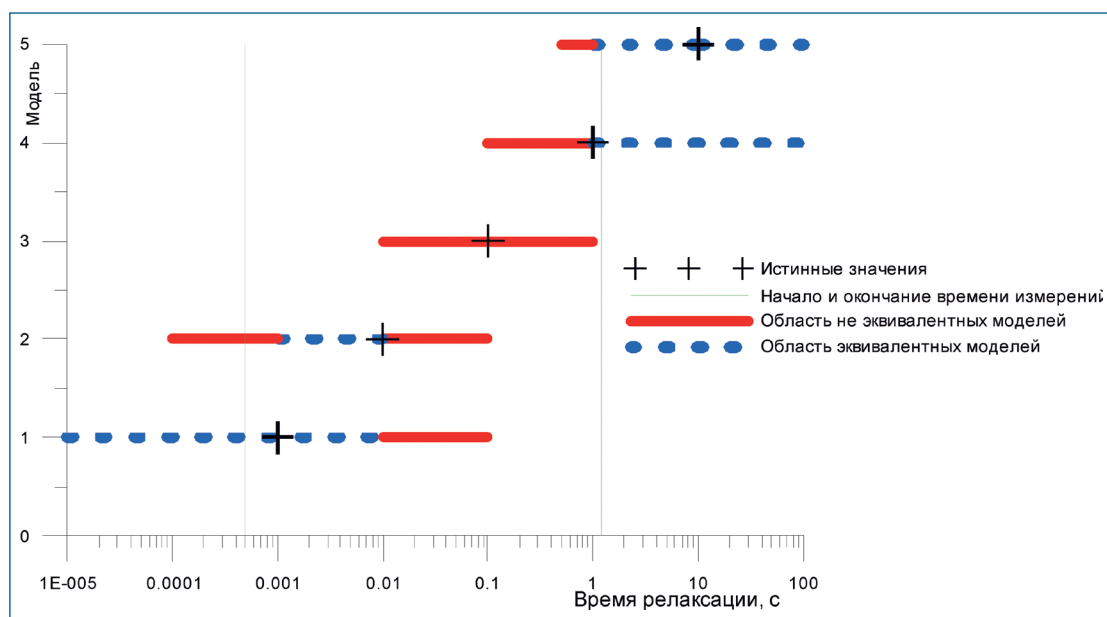
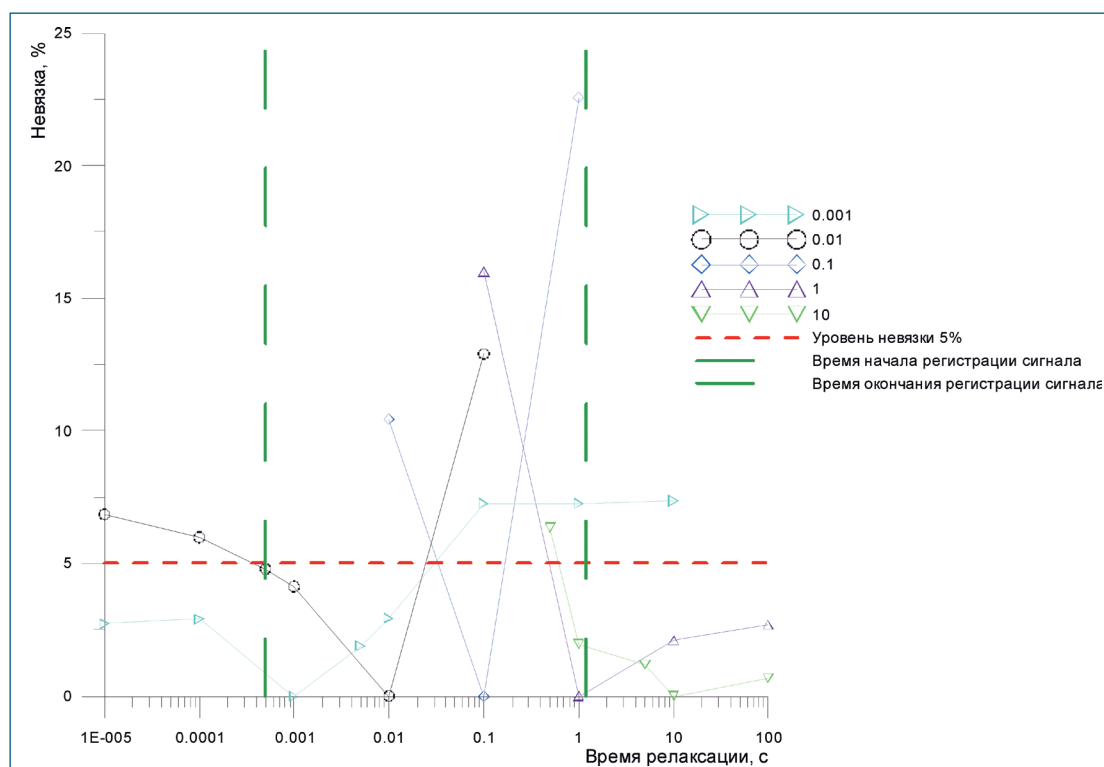


Рис. 3.
Невязки решений для
полупространства
с пятью истинными
значениями времени
релаксации
(0,001, 0,01, 0,1, 1, 10 с)



На рис. 3 показаны графики невязки решений для пяти референтных моделей поляризующегося полупространства. Горизонтальной пунктирной линией показан уровень невязки 5%, вертикальными пунктирными линиями выделен временной диапазон расчета переходного процесса. Эти графики иллюстрируют резкие увеличения невязки решений со смещенными значениями τ , зафиксированными во время инверсии, если истинное время релаксации находилось внутри диапазона времен расчета сигнала. И напротив, небольшую невязку решений, если референтное τ находилось на краю этого диапазона или за его пределами.

Поиск эквивалентных решений для слоистой поляризующейся модели

В табл. 2 представлена модель для расчета референтного отклика — это типичная геоэлектрическая модель юга Сибирской платформы [6] с переслаиванием относительно проводящих и высокоомных образований (предоставлена одним из авторов [19] Е.Ю. Анотоновым). Осадочный чехол в этом регионе сложен породами венд-кембрийского, кембрийского, ордовикского и юрского возрастов. По составу и свойствам пород он подразделяется на три структурных комплекса: надсолевой, солевой и подсолевой. Два верхних комплекса в модели пред-

Таблица 2
Референтная модель проводящей поляризующейся
одномерной геоэлектрической среды, характерной
для Сибирской платформы

Слой	ρ , Ом-м	η	τ , с	c , б.р.	h , м
1	33				43
2	13	0,036	0,06	0,5	81
3	37				107
4	103				352
5	38				573
6	246				665
7	26				530
8	33				350
9	2000				∞

ставлены пятью геоэлектрическими горизонтами, преимущественно терригенными породами надсолевой толщи, карбонто-галогенными породами литвинцевской, ангарской и бельско-булайской свит. В нижнем структурном комплексе выделены три геоэлектрических горизонта, представленные отложениями усольской свиты, а так же карбонатной и терригенной толщами подсолевых отложений.

Для поиска эквивалентных моделей первоначально закреплялось время релаксации второго слоя на смещенных, относительно истинного, значениях: 1, 0,001 и 10 с и выполнялось решение обратной задачи. В результате инверсии были найдены эквивалентные решения (модели М1, М2 и М3) с общей невязкой по ЭДС для трех измерителей 4,95, 3,39 и 4,99% соответственно. Затем, поляризующимся в модели был только первый слой, далее только третий. В этих случаях, во время решения обратной задачи, были раскреплены все поляризационные параметры этих слоев. Эквивалентные аппроксимации (модель М4 и М5) были получены с невязкой 4,17 и 3,87% соответственно.

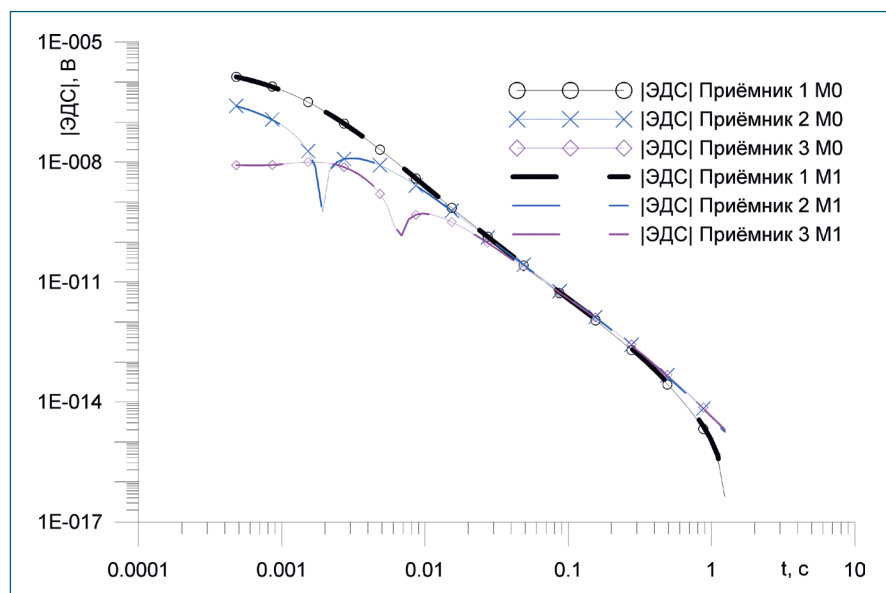


Рис. 4.
ЭДС от референтной (с индексом М0)
и от эквивалентной модели М1
(с индексом М1) для многоразностной
установки ЗСБ. Невязка: 4,95%.

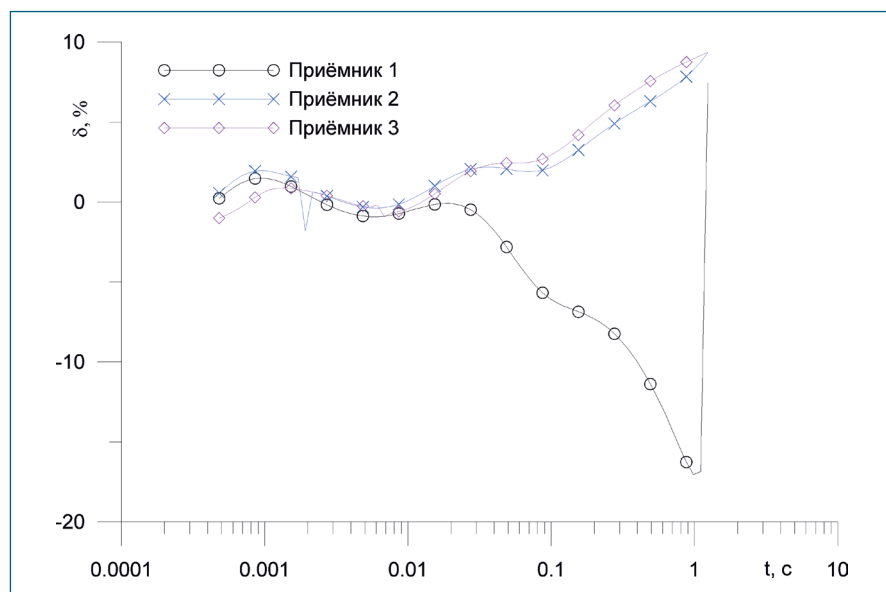


Рис. 5.
Распределение невязки ЭДС
во времени между откликом
от референтной и от эквивалентной
модели М1 для многоразностной
установки ЗСБ.

При помещении поляризующегося объекта в четвертый слой (модель М6), не удалось найти эквивалентное решение. Невязка составила 6,26%, поэтому эту модель нельзя назвать эквивалентной.

Основная невязка для эквивалентных аппроксимаций была сосредоточена на поздних временах спада от 300 мс до 1,2 с для всех датчиков, но самые большие значения невязки отмечались для сигнала на соосном датчике (рис. 5). Только в последнем случае, когда поляризующимся являлся четвертый слой (модель М6), максимальное расхождение сигнала фиксировалось на измерителе удаленном на 500 м.

Графики на рис. 6 иллюстрируют изменения с глубиной поляризационных параметров эквивалентных моделей. Поляризуемость и показатель степени приведены в линейном масштабе, время релаксации – в логарифмическом, значения глубины так же показаны в линейном масштабе от 0 до 600 м. Область эквивалентного расположения поляризующегося объекта

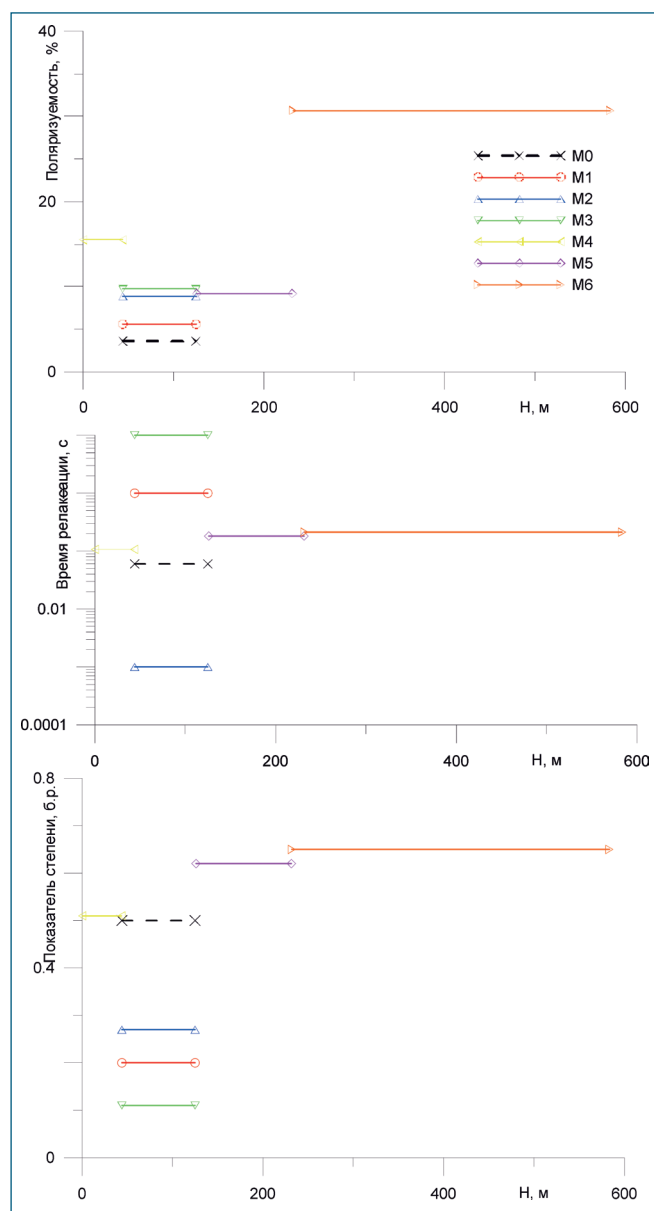


Рис. 6.

Поляризационные параметры (поляризуемость (вверху), время релаксации и показатель степени (внизу) по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6).

Таблица 3

УЭС (Ом·м) референтной (M0) и слоистых моделей (M1-M6), сигналы от которых наилучшим образом аппроксимировали референтный сигнал при различных смещенных априорных ограничениях решения обратной задачи

Слой	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	33	33	44	35	72	40	34
2	13	13	13	13	11	12	12
3	37	31	31	47	66	31	61
4	103	139	190	79	78	205	94
5	38	38	34	45	37	36	42
6	246	242	235	231	197	223	255
7	26	27	30	25	27	25	16
8	34	37	31	38	48	27	40
9	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
$\delta, \%$	–	4,95	3,39	4,99	4,17	3,87	6,26

Таблица 4

Поляризуемость референтной (M0) и слоистых моделей (M1-M6), сигналы от которых наилучшим образом аппроксимировали референтный сигнал при различных смещенных априорных ограничениях решения обратной задачи

Слой	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1					0,155		
2	0,036	0,056	0,089	0,097			
3						0,092	
4							0,307
$\delta, \%$	–	4,95	3,39	4,99	4,17	3,87	6,26

Таблица 5

Время релаксации (с) референтной (M0) и слоистых моделей (M1-M6), сигналы от которых наилучшим образом аппроксимировали референтный сигнал при различных смещенных априорных ограничениях решения обратной задачи

Слой	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1					0,107		
2	0,06	1	0,001	10			
3						0,182	
4							0,212
$\delta, \%$	–	4,95	3,39	4,99	4,17	3,87	6,26

Таблица 6

Показатель степени Коула-Коула (б.р.) референтной (M0) и слоистых моделей (M1-M6), сигналы от которых наилучшим образом аппроксимировали референтный сигнал при различных смещенных априорных ограничениях решения обратной задачи.

Слой	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1					0,51		
2	0,5	0,2	0,27	0,11			
3						0,62	
4							0,65
$\delta, \%$	–	4,95	3,39	4,99	4,17	3,87	6,26

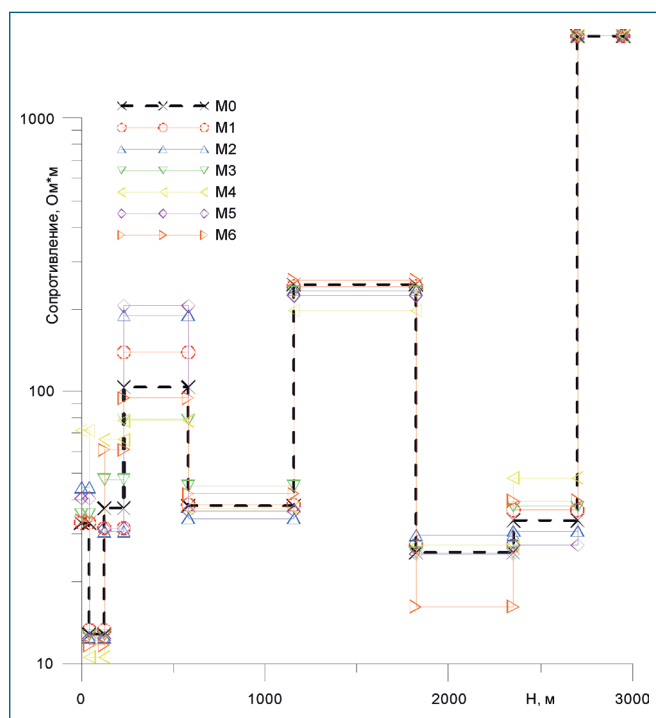


Рис. 7.

Графики изменения сопротивления по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6)

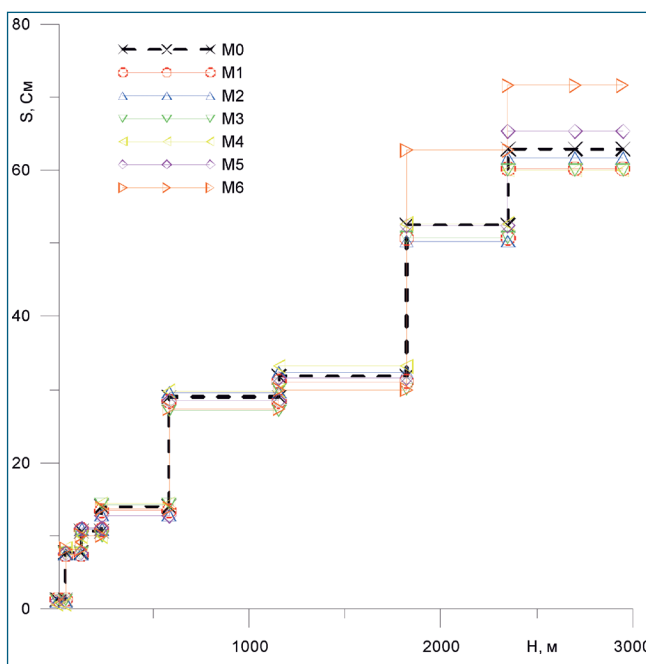


Рис. 8.

Графики накопленной проводимости по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6)

находится от поверхности до глубины 220 м, т.е. от первого до третьего слоя. Для такого положения этого объекта в модели, расчетный отклик может описывать отклик от референтной модели в пределах 5% общей погрешности для трех датчиков.

Нужно отметить, что УЭС (рис. 7) и проводимость (рис. 8) слоев для эквивалентных моделей незначительно отличаются от референтных значений. Только для модели M6 накопленная продольная проводимость отличается от референтного показателя более чем на 10%, в остальных случаях различие не более 5%.

Обсуждение результатов

Исследование подтвердило коррелированный характер связи поляризационных параметров, описывающих процесс ВП моделью Коула-Коула при некоторых условиях. Поиск эквивалентных решений для поляризующегося полупространства показал зависимость величины области эквивалентности η - τ - c от временного диапазона регистрации сигнала. Для изучения всех поляризационных характеристик необходимо чтобы временной интервал измерения сигнала включал в себя значение τ , исследуемого процесса ВП, иначе возможно существование множества решений с различными η , τ и c , отклик от которых описывает референтный сигнал с невязкой менее 5% при совместной инверсии данных для нескольких измерителей, удаленных на разную длину от источника.

Для многослойной модели, помимо параметров ВП, эквивалентной становится и глубина залегания поляризующегося объекта. Можно лишь предположить диапазон глубин его залегания.

Исследование в большей степени является дискуссионным, его цель привлечь внимание интерпретаторов, занимающихся инверсией данных переходных процессов, где отмечено проявление ВПИ. Возможно, следует пересмотреть некоторые результаты проведенной ранее инверсии с учетом взаимосвязи поляризационных параметров и ввести априорные ограничения при повторной инверсии.

Еще, нужно отметить, что для инверсии измерений переходных процессов с присутствием ВПИ целесообразно использовать алгоритмы способные работать в условиях овражистой функции цели, где присутствуют локальные минимумы.

Выводы.

Из проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- имеется чувствительность индукционного отклика к поляризационным параметрам референтной модели;
- исследование эквивалентности при смещенных значениях времени релаксации для поляризующегося полупространства показало, что распространение области эквивалентности связано с диапазоном измерения сигнала;
- возможность определения τ и других поляризационных параметров зависит от диапазона регистрации сигнала, если значение времени релаксации изучаемого поляризационного процесса находится близко к середине временного диапазона измерения (в данном случае расчета) сигнала, то эквивалентность поляризационных параметров не проявляется, если время релаксации близко к началу регистрации переходного процесса или к окончанию регистрации или за его пределами, то возникают эквивалентные

решения с широкими вариациями поляризационных параметров;

– присутствие эквивалентности η - τ - σ наводит на мысль при решении обратной задачи вводить априорные ограничения изменения τ и ограничивать их диапазоном измерения сигнала;

– отклик от слоистой референтной модели (табл. 2) в пределах погрешности наблюдений 5% можно аппроксимировать рядом эквивалентных моделей, поэтому существует определенная область эквивалентных поляризующихся моделей и численные значения поляризационных характеристик, в терминах модели Коула-Коула, можно определить лишь в широких пределах;

– для слоистой модели (табл. 2), по индукционному отклику, нельзя определить глубину залегания поляризующегося объекта.

Авторы выражают глубокую признательность Н.О. Кожевникову за замечания и предложения по улучшению статьи и Е.Ю. Антонову за обсуждение результатов исследования. Замечания и советы неизвестного рецензента и Г.М. Тригубовича помогли существенно улучшить текст и оформление статьи, за что авторы им очень благодарны. Так же огромное спасибо Е.Н. Водневой за помощь в оформлении публикации и обсуждения ее текста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев Е.В. Исследование эквивалентностей горизонтально-слоистых поляризующихся сред в дифференциально-нормированном методе электроразведки // Автореферат дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск: 2004. 18 с.
2. Агеев Е.В. Эквивалентная зависимость между параметрами модели Коул-Коул для поляризующихся разрезов. Вестник стипендиатов DAAD. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2001. С. 166–170.
3. Агеев Е.В. Эквивалентность определения поляризуемости и времени релаксации слоя с частотной дисперсией проводимости. Третья уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник докладов. Екатеринбург. 2002. С. 80–84.
4. Ванчугов В.А., Кожевников Н.О. Методика и результаты применения импульсной индуктивной электроразведки при изучении геоэлектрического строения Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Вып. 22. Иркутск: ИрГТУ. 1998. С. 164–176.
5. Вострецов Р.Н., Молчанов А.А., Сидоров В.А. Индукционные переходные процессы в массиве льда: Вопросы поляризации горных пород. Под. Ред. Молчанова А.А., Сидорова В.А. М.:Деп. в ВИНТИ. 06.08.85. № 5847-85. 1985. 109 с.
6. Геология нефти и газа Сибирской платформы. / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра. 1981. 552 с.
7. Инструкция по электроразведке. Ленинград: Недра. 1984. 534 с.
8. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования МПП. М.: ГЕОС. 1997. 162 с.
9. Каменецкий Ф. М., Тригубович Г. М. Феноменология вызванной поляризации // Геофизика. 2013. №1. С. 80–83.
10. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Что главное в геофизике: гео или физика? // Геофизика. 2015. №2. С. 69–76.
11. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных МПП с учетом быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика. 2007. №1. С. 42–50.
12. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. №4. Т.31. С. 104–118.
13. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учетом индукционно вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2009. Т.50. №2. С. 181–190.
14. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия индукционных переходных характеристик двухслойных сред с учетом быстро устанавливающейся вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2010. Т. 51 (6). С. 905–918.
15. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных зондирования массива льда методом переходных процессов // Геофизика. 2011. №4. С. 57–63.
16. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540.
17. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2014. т. 55. № 12. С. 1815–1827.
18. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра. 1980. 391 с.
19. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. №1. С. 35–40.
20. Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. – Свердловск: Изд-во ИГ УНЦ АН СССР. 1981. 44 с.
21. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород // Криосфера Земли, 2002. Т. VI. № 3. С. 59–68.
22. Матвеев Б.К. Электроразведка. М.: Недра. 1990. 368 с.
23. Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений / Старобинец И.С., Петухов А.В., Зубайраев С.Л. / Под ред. А.В. Петухова и И.С. Старобинец. М.: Недра. 1993. 332 с.
24. Светов Б.С., Агеев В.В., Лебедева Н.А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки // Геофизика. 1996. № 4. С. 42–52.
25. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 656 с.
26. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра. 1985. 192 с.
27. Сидоров В.А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Физика Земли. 1987. № 10. С. 58–64.
28. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 4. С. 46–56.
29. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Изд-во Малотиражная типография 2D. 2010. 121 с.
30. Уэйт Дж.Р. Геоэлектромагнетизм. М.: Недра. 1987. 235 с.
31. Шейнман С.М. Современные физические основы теории электроразведки. М.: Недра. 1996. 224 с.
32. Brent R.P. Algorithms for function minimization without derivatives. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1973.

33. Flis F.M., Newman G.A., Hohman G.W. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // Geophysics. 1989. Vol. 54. p. 514–523.

34. Gegennfurner K.R. PRAXIS: Brent's algorithm for function minimization // Behavior research methods, instruments & computers. 1992. 24(4). p. 560–564.

35. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // Geoph. Prosp. 2006. Vol. 54. p. 383–397.

36. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // J. Appl. Geoph. 2008. Vol. 66. p. 31–43.

37. Lee T. Transient response of a polarizable ground // Geophysics. 1981. Vol. 46. p. 1037–1041.

38. Molchanov A., Sidorov V., Nikolayev Y. and Yakhin A. New types of transient processes in electromagnetic sounding. // Izvestiya Earth Physics. 1984. 20. p. 76–79.

39. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. p. 588–609.

40. Walker G.G., Kawasaki K.K. Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings // Geoeexploration. 1988. Vol. 25. p. 245–254.

41. Smith R.S., Klein J. A special circumstance of airborne induced-polarization measurements // Geophysics. 1996. Vol. 61. p. 66–73.

РЕЦЕНЗЕНТЫ – доктор технических наук

Г.А. Тригубович,

доктор геолого-минералогических наук

В.А. Куликов

ОБ АВТОРАХ



ЛЕГЕЙДО
Петр Юрьевич

Окончил в 1983 г. Ленинградский государственный университет по специальности геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Генеральный директор ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (ООО СГНПК) до 2014 года, доктор геолого-минералогических наук. Сфера научных интересов: разработка теории и технологии дифференциально-нормированного метода электроразведки для условий суши, моря и транзитной зоны, решение прямых и обратных задач геоэлектрики. Автор более 40 научных публикаций на тему применения и технологии дифференциально-нормированного метода электроразведки на суше и на акваториях для поиска углеводородов, в том числе 5 патентов на изобретение в соавторстве.



АГЕЕНКОВ
Евгений Валерьевич

Окончил в 1998 г. Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ), кафедра прикладной геофизики и геоинформатики. Начальник отдела геофизики ООО СГНПК, преподаватель кафедры технологий геологической разведки Иркутского национального исследовательского технического университета, кандидат геолого-минералогических наук, доцент. Сфера научных интересов: прямые и обратные задачи геофизики и электроразведки в частности, технологии морской электроразведки, дифференциально-нормированный метод электроразведки. Автор около 10 научных публикаций на тему применения электроразведки в нефтегазовой области и технологии дифференциально-нормированного метода электроразведки на суше и на море, в том числе 2-х патентов на изобретение в соавторстве.



ПЕСТЕРЕВ
Иван Юрьевич

В 1995 г. окончил геологоразведочный факультет ИрГТУ по специальности «горный инженер-геофизик». Ведущий геофизик ООО СГНПК. Сфера научных интересов: математическая постановка прямых и обратных задач, разработка новых алгоритмов интерпретации, обработка электроразведочных данных, программные средства обработки и интерпретации, визуализация результатов обработки, геоинформатика. Автор более 12 научных статей на тему геологии, геофизики в нефтегазовой области, а также 3-х патентов на изобретение в соавторстве.



ЯКОВЛЕВ
Сергей Владимирович

Окончил в 2012 г. геологический факультет Иркутского государственного университета. Ведущий геофизик ООО СГНПК. Область научных интересов: глубинная электроразведка, разработка программных средств и методик обработки и анализа данных электромагнитных исследований.