

Методика получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами

- Бобровский В.В., Ильичев П.В., Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызская Республика.
- Александров П.Н., Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, г. Москва.

Аннотация.

В работе представлена методика получения геоэлектрических характеристик среды для экспериментального электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами с учетом особенностей его аппаратурно-программной реализации. Предложено улучшение метода решения обратной задачи ЗСБ в рамках модели с проводящей S плоскостью позволяющее повысить достоверность получаемых результатов. Показана реализация методики в программном обеспечении электроразведочного комплекса.

Ключевые слова: электроразведка, шумоподобные сигналы, корреляционная обработка сигналов, метод становления поля, измерительный комплекс.

Введение

В настоящее время в Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) ведутся работы по отработке технологии зондирования земной коры с ранее разработанным экспериментальным образцом аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС) [1], в основу построения которого положен метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ). В отличие от традиционных способов зондирования становлением поля в ЭРК ШПС используются шумоподобные зондирующие сигналы (ШПС), обладающие «информационной избыточностью». Корреляционная обработка таких сигналов, регистрируемых на приемной стороне, на фоне значительных шумов и помех различного происхождения, обеспечивает многократное (100 - 10000 раз) повышение соотношения сигнал-шум [2]. Тем самым расширяется диапазон исследуемых глубин земной коры при значительном снижении энергопотребления зондирующих генераторных установок. Далее рассматривается методика получения геоэлектрических

характеристик изучаемой геологической среды в рамках модели с проводящей S плоскостью (пленка Прайса-Шейнманна) с учетом особенностей реализации аппаратурно-программного измерительного комплекса ЭРК ШПС.

Особенности реализации аппаратурно-программного измерительного комплекса ЭРК ШПС

Для получения сигналов становления поля применительно к методу ЗСБ в ЭРК ШПС используется установка с соосными петлями. В качестве источника первичного поля взята квадратная рамка со стороной от 50 до 200 м. Зондирующие импульсы представляют собой шумоподобные сигналы в виде M -последовательностей биполярных импульсов тока, подаваемых в зондирующую рамку. Отличительной особенностью предлагаемого метода зондирования от типового является то, что при применении шумоподобных зондирующих сигналов с широким спектром и измерении ЭДС - $e(t)$ в приемной рамке, как в традиционном методе, после корреляционной обработки зарегистри-

рованных сигналов мы будем получать сигнал пропорциональный скорости изменения ЭДС или второй производной от магнитного потока $\Phi''(t) = e'(t)$, так как корреляционная обработка шумоподобных сигналов с широким спектром приводит к дифференцированию сигнала. Поэтому желательно, чтобы датчик регистрируемых сигналов был интегрирующего типа и обеспечивал на своем выходе сигнал пропорциональный магнитному потоку $\Phi(t)$. В ЭРК ШПС применен широкополосный термокомпенсированный индукционный датчик сигналов (ИДС) собственной разработки [3]. Переменный ток, индуцированный в короткозамкнутой измерительной катушке датчика пропорционален магнитному потоку, пронизывающему витки этой катушки. Регистрация магнитного потока (индукции магнитного поля) при зондировании земной коры шумоподобными сигналами позволяет получить менее быстро убывающую со временем характеристику среды [4] чем при регистрации ЭДС и описывается формулой:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot Q \cdot q}{30} \cdot \left(\frac{\mu_0}{\rho \cdot \pi} \right)^{3/2} \cdot t^{-3/2},$$

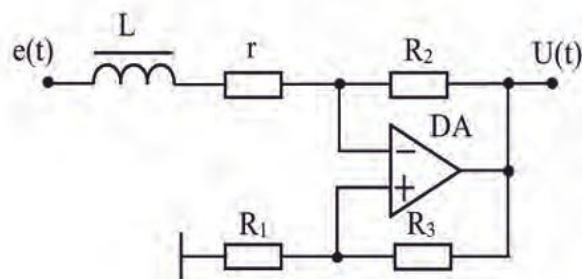
где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (проницаемость) вакуума; q – площадь приемной рамки (эквивалентная площадь измерительной катушки датчика); Q – площадь зондирующей рамки; I – амплитуда импульсов тока в зондирующей рамке; ρ – удельное электрическое сопротивление среды (земной коры); t – текущее время отсчитываемое от момента подачи скачка тока в зондирующую рамку. Дальнейшая корреляционная обработка регистрируемого на приемной стороне сигнала позволяет получить кривую, которая начиная со времени равного длительности минимального импульса зондирующей

М-последовательности будет приближаться к ЭДС [2].

Реальный датчик не является идеальным интегратором, что приводит к увеличению погрешности при получении кривой становления поля особенно на больших временах. Поэтому важным условием первичной обработки является компенсация не идеальности переходной характеристики ИДС.

Компенсация не идеальности переходной характеристики индукционного датчика сигналов

В первом приближении для низких частот (больших времен становления поля) измерительная катушка ИДС может быть представлена как последовательное соединение идеальной индуктивности L и резистора сопротивлением r включенных в схему (рис. 1), выполненную на операционном усилителе DA.



▲ Рис. 1. Электрическая схема индукционного датчика магнитного поля интегрирующего типа с повышенной постоянной времени интегрирования.

С целью повышения постоянной времени интегрирования была применена схема с положительной и отрицательной обратными связями. Положительная обратная связь реализована через делитель напряжения (R_1, R_3). В результате входное сопротивление схемы $R_{вх}$ по инвертирующему входу операционного усилителя становится отрицательным, сумма $(r + R_{вх})$ уменьшается, а постоянная времени схемы при этом может быть

значительно увеличена. Выражение для передаточной характеристики по Лапласу для этой схемы запишется как [3]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{e(p)} = \frac{K_0}{(1 + p \cdot K_\tau \cdot \tau_0)}$$

где K_0 – коэффициент передачи схемы на постоянном токе, $\tau_0 = L/r$ – собственная постоянная времени измерительной катушки, K_τ – коэффициент увеличения (умножения) постоянной времени измерительной катушки.

Для снижения зависимости параметров схемы (τ_0 , K_0 и K_τ) от температуры окружающей среды в качестве резистора R_2 был применен проволочный резистор, выполненный в виде двух встречно-параллельно включенных катушек индуктивности из медного провода, размещенных в отдельном каркасе на том же сердечнике что и измерительная катушка.

На рис. 2 представлены переходные характеристики идеального интегратора $F_1(t)$ и реальной схемы (рис. 1), выполненной на операционном усилителе с положительной и отрицательной обратными связями $F_2(t)$. Постоянные времени передаточных характеристик этих схем одинаковые и равны $\tau=0,6$ сек. Приведен также график зависимости погрешности интегрирования от времени.

▼ Рис. 2. Переходные характеристики идеального интегратора $F_1(t)$ и реальной схемы датчика $F_2(t)$ и график погрешности интегрирования $\delta(t)$.

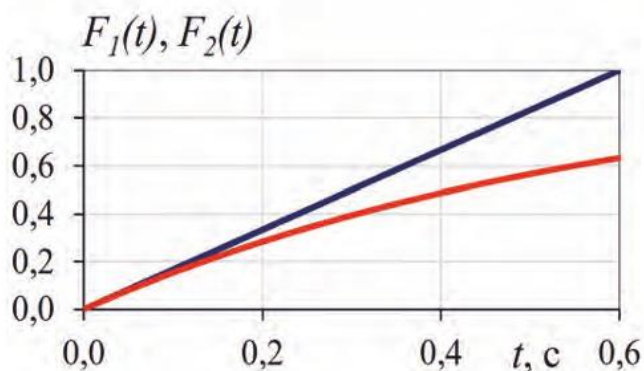


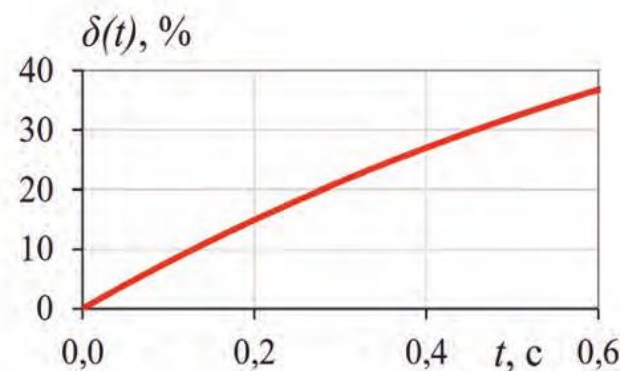
График погрешности интегрирования $\delta(t)$ строился согласно выражению:

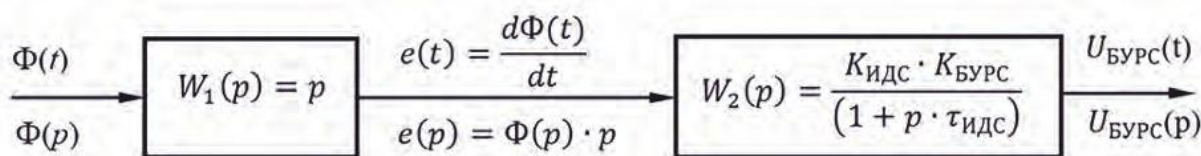
$$\delta(t) = \frac{[F_1(t) - F_2(t)]}{F_1(t)} \cdot 100\% = \left[\frac{t}{\tau} - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \cdot \frac{\tau}{t} \cdot 100\%,$$

где $F_1(t) = t/\tau$ – переходная характеристика идеального интегратора с постоянной времени τ , $F_2(t) = 1 - e^{-t/\tau}$ – переходная характеристика реальной схемы представленной на рис. 1. Согласно рис. 2 и выше приведенной формулы погрешность интегрирования возрастает с увеличением времени t . При $t=\tau/10$ она достигает значения 5 %, а на временах $t \geq \tau$ её величина становится больше 37%.

С целью снижения погрешности интегрирования особенно на больших временах становления поля при цифровой обработке зарегистрированных сигналов предполагается применить процедуру приведения их ко входу измерительного канала с учетом экспериментально измеренной по переходной характеристике $F_2(t)$ постоянной времени τ схемы ИДС (рис. 1), полученной в результате проведения специальной градуировки измерительного канала ЭРК ШПС и обработки зарегистрированных данных.

На рис. 3 представлена функциональная схема упрощенной модели аналого-





▲ Рис. 3. Функциональная схема упрощенной модели измерительного канала ЭРК ШПС.

вой части измерительного канала ЭРК ШПС, включающего ИДС и блок управления и регистрации сигналов (БУРС). Входным сигналом в этой схеме является магнитный поток $\Phi(t)$, пронизывающий измерительную катушку ИДС, а выходным аналоговый сигнал $U_{\text{БУРС}}(t)$, подаваемый на вход АЦП.

Передаточная характеристика по Лапласу для упрощенной модели измерительного канала (рис. 3) определяется выражением:

$$W(p) = \frac{U_{\text{БУРС}}(p)}{\Phi(p)} = W_1(p) \cdot W_2(p) = K_{\text{ИДС}} \cdot K_{\text{БУРС}} \cdot \frac{p}{(1 + p \cdot \tau_{\text{ИДС}})},$$

где $W_i(p)$ – передаточная характеристика, определяющая закон электромагнитной индукции т.е. генерацию в замкнутом контуре (измерительной катушке датчика) ЭДС, величина которой пропорциональна скорости изменения потока магнитной индукции пронизывающего этот контур, $K_{\text{ИДС}}$ и $K_{\text{БУРС}}$ – коэффициенты передачи модели индукционного датчика (см. рис. 1) и БУРС на постоянном токе, $\tau_{\text{ИДС}}$ – постоянная времени модели индукционного датчика, p – оператор Лапласа.

На основании выше приведенного выражения для передаточной характеристики модели измерительного канала запишем выражение для входного сигнала, приведенного к его выходу:

$$\left(\frac{K_{\text{ИДС}} \cdot K_{\text{БУРС}}}{\tau_{\text{ИДС}}} \right) \cdot \Phi(p) = U_{\text{БУРС}}(p) + U_{\text{БУРС}}(p) \cdot \frac{1}{p \cdot \tau_{\text{ИДС}}}$$

Обозначим постоянный коэффициент перед $\Phi(p)$ как $K_{\text{пр}}$ и назовем его коэффициентом преобразования измерительного канала. Далее применим обратное преобразование Лапласа:

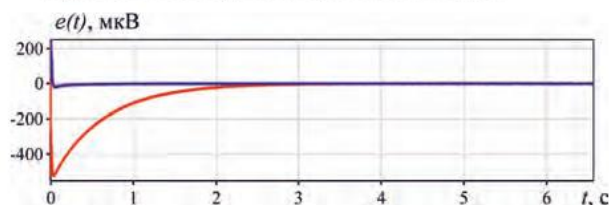
$$K_{\text{пр}} \cdot \Phi(t) = U_{\text{БУРС}}(t) + \frac{1}{\tau_{\text{ИДС}}} \cdot \int_0^t U_{\text{БУРС}}(t) \cdot dt$$

Таким образом, для того чтобы выходной сигнал измерительного канала был пропорционален потоку магнитной индукции необходимо вычислить сумму зарегистрированного сигнала с интегралом от него с масштабным коэффициентом $1/\tau_{\text{ИДС}}$. Значение $\tau_{\text{ИДС}}$ находится (вычисляется) в результате обработки данных градуировки измерительного канала. На рис. 4 приведен результат выполнения данной операции для сигнала становления поля, полученного в условиях полевого эксперимента.

Методика получения геоэлектрических характеристик изучаемой геологической среды

Дальнейшая обработка сигнала становления поля осуществляется в рамках модели проводящей горизонтальной плоскости (тонкой пленки) в непроводя-

▼ Рис. 4. Участок кривой становления поля без (красный цвет) и с (синий цвет) компенсацией не идеальности переходной характеристики ИДС.



щей среде [5]. Для данной модели можно выразить становление поля через элементарные функции. Работа вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру L равна ЭДС в контуре:

$$U(t) = \oint_L E_\varphi(t) dl,$$

где E_φ - касательная составляющая электрического поля. E_φ имеет вид:

$$E_\varphi(t) = \frac{3Mr\left(h + \frac{t}{\mu_0 S}\right)}{\pi S\left(r^2 + 4\left(h + \frac{t}{\mu_0 S}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}},$$

где $M=I \cdot Q$ - момент тока в генераторной петле; S - кажущаяся продольная проводимость пленки; h - глубина погружения пленки; t — время, в течение которого рассматривается процесс становления поля. Из этих соображений находится формула расчета ЭДС индукции в приемной горизонтальной петле. Не теряя общности, рассмотрим круговую приемную петлю радиуса r . Тогда циркуляция касательной составляющей вектора напряженности E_φ по окружности длиной $L=2\pi r$ равна:

$$U(t) = 2\pi r E_\varphi = \frac{6r^2\left(h + \frac{t}{\mu_0 S}\right)}{S\left(r^2 + 4\left(h + \frac{t}{\mu_0 S}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}}$$

При замене $m = \frac{h}{r} + \frac{t}{\mu_0 S r}$ формула примет вид:

$$U(t) = \frac{6Mm}{Sr^2(1+4m^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{K}{S} \cdot F(m),$$

$$\text{где } K = \frac{6M}{r^2}, F(m) = \frac{m}{(1+4m^2)^{\frac{5}{2}}}.$$

Выполнив ряд преобразований и решений описанных в [5], получим следующее уравнение:

$$\left(\frac{1}{m^2} - 16\right)(1 + 4m^2)^{\frac{3}{2}} - K\mu_0 r \cdot \frac{dU(t)}{U^2(t)} = 0.$$

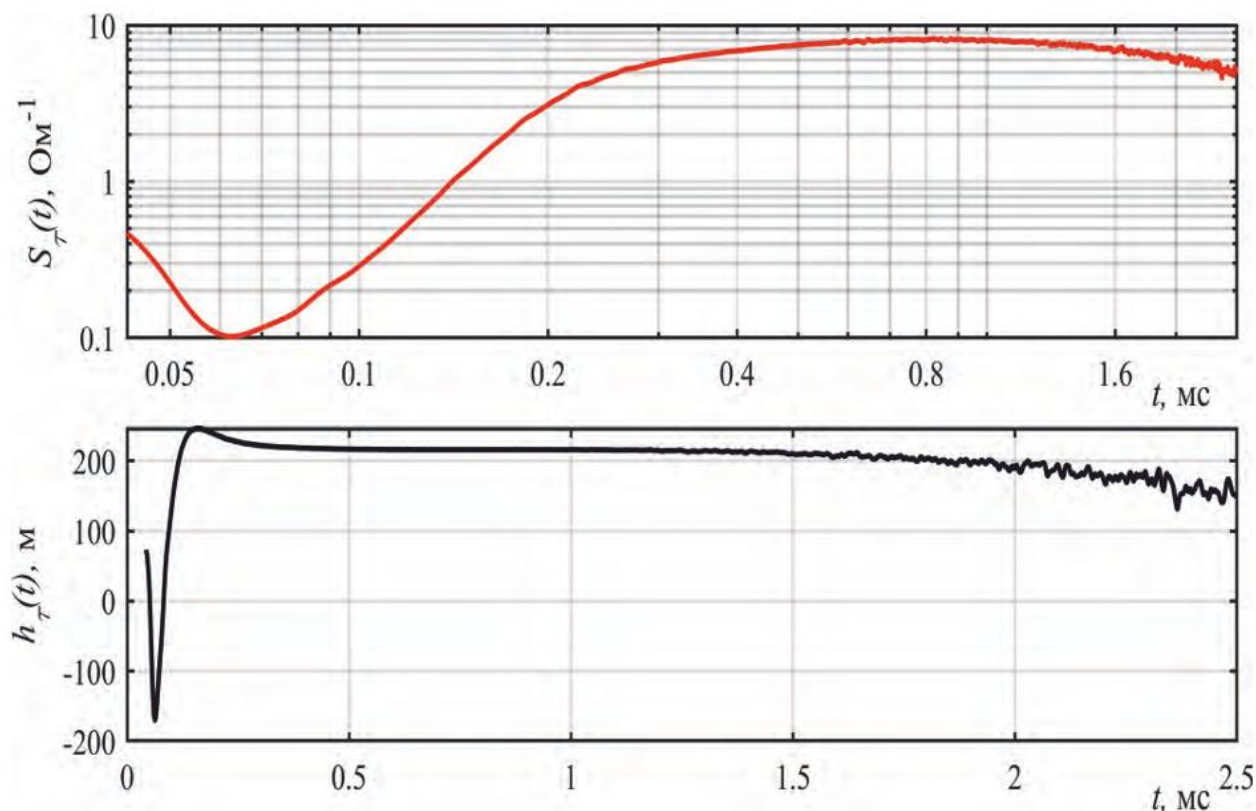
Численно решая его относительно m , получим для каждого момента времени t значение $m(t)$. Зная $m(t)$, находим:

$$\begin{cases} S(t) = \frac{KF(m(t))}{U(t)} \\ h(t) = m(t)r - \frac{t}{\mu_0 S(t)} \end{cases}$$

Методика нахождения зависимости кажущейся продольной проводимости (S) и глубины проникновения пленки Прайса-Шейнманна (h) от времени реализована в программном обеспечении ЭРК ШПС. Найденные значения S и h являются кажущимися и обычно обозначаются как S_t и h_t соответственно. На рис. 5 приведены расчеты проводимости $S_t(t)$ и глубины $h_t(t)$ для исходных данных $U(t)$ полученных на экспериментальной точке «Кентор».

В процессе реализации и тестирования программного обеспечения инженером НС РАН Д.М. Авдюховым было отмечено, что решение обратной задачи по выше приведенной методике дает сбои при резком скачке удельной проводимости. Это проявляется в форме скачков производной становления поля или скачков параметра m . Таким образом улучшение методики может состоять либо в сглаживании производной от функции становления поля, $\frac{dU(t)}{dt}$ либо в сглаживании параметра m . Сглаживание производной $\frac{dU(t)}{dt}$ представляет собой сложную задачу, поскольку сложно предсказать аппроксимирующую ее функцию. Для сглаживания же функции $m=m(x)$ можно выбрать, например, аппроксимирующую функцию в форме

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x^{\frac{1}{2}} + \theta_2 x + \theta_3 x^{\frac{3}{2}},$$



▲ Рис. 5. Графики зависимости кажущейся продольной проводимости $S_\tau(t)$ и глубины проникновения пленки Прайса-Шейнманна от времени $h_\tau(t)$.

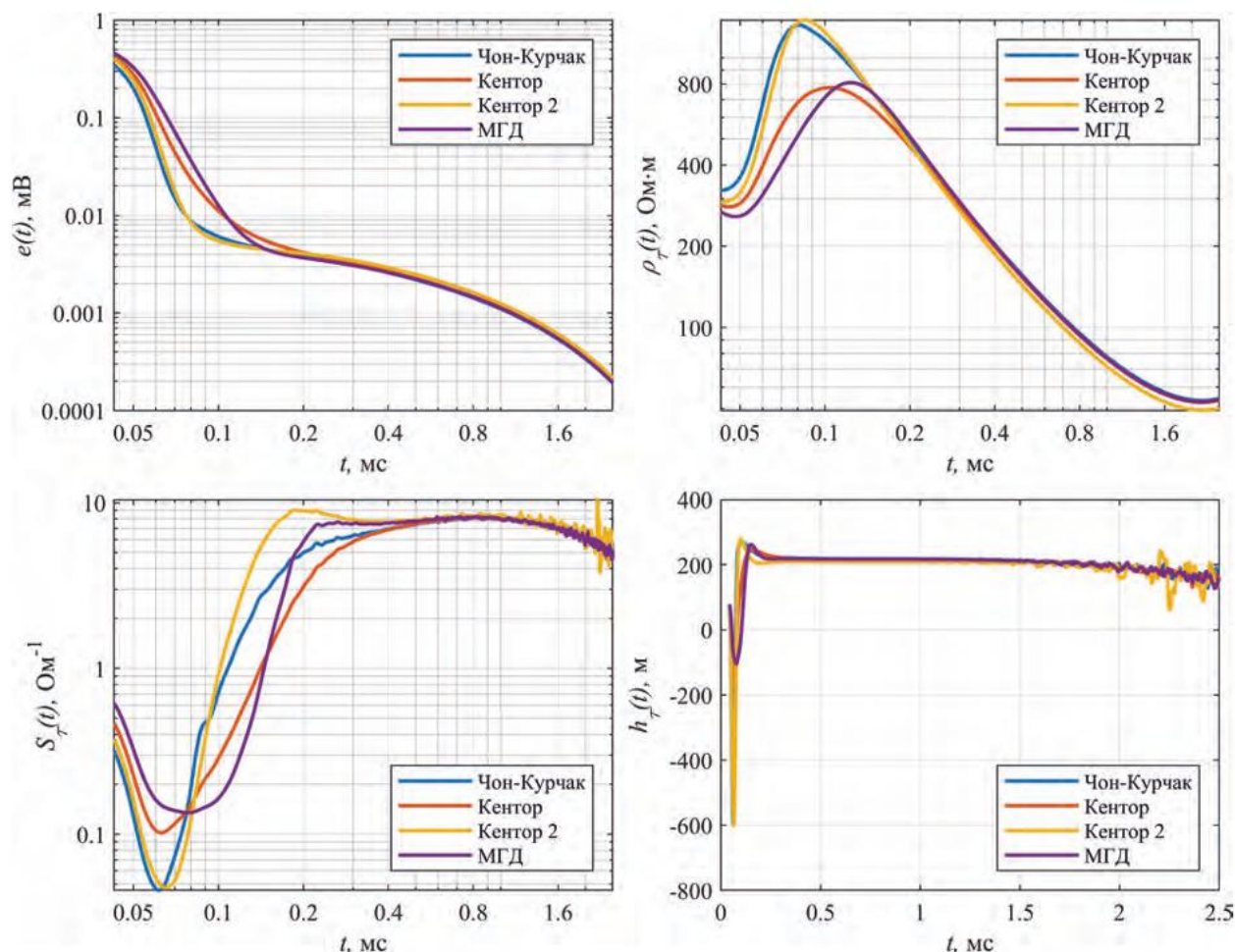
которая при некотором наборе коэффициентов $\{\theta_i\}$ может быть линейной функцией. По-разному сглаживая параметр m , можно добиться разной степени приближения полученной зависимости $S(H)$ к эталонной. При этом нужно помнить, что решения прямой и обратной задачи являются асимптотическими и имеют погрешности в приближении ближней зоны.

Апробация методики в условиях полевого эксперимента

Описанная выше методика была добавлена в существующее программное обеспечение, предназначенное для обработки данных в условиях полевого эксперимента [6]. Учитывая, что основным назначением ЭРК ШПС является использование его в системе активного электромагнитного мониторинга напряженно-деформационных процессов в

земной коре помимо параметров S_τ и h_τ вычисляется параметр ρ_τ – кажущееся удельное сопротивление среды. Вычисление ρ_τ выполнялось по методике описанной в [7]. Предварительное тестирование работы алгоритмов осуществлялось на модельных разрезах характерных для территории Северного Тянь-Шаня, получаемых путем решения прямой задачи ЗСБ по методу В.А. Сидорова [5].

Полевое тестирование методики проводилось на данных полевых испытаний изготовленного экспериментального образца ЭРК ШПС. Испытания проводились в четырех точках на территории Бишкекского геодинимического полигона (БГП), расположенных друг от друга на расстояниях от 9 до 20 км («МГД», «Кентор», «Кентор 2» и «Чункурчак»). В каждой из точек выполнялась градуировка измерительного канала и проводились эксперименты по зондированию земной



▲ Рис. 6. Графики кривой становления поля - $e(t)$, кажущегося удельного электрического сопротивления $\rho_{\tau}(t)$, кажущейся продольной проводимости - $S_{\tau}(t)$ и глубины проникновения пленки $h_{\tau}(t)$ для четырех измерительных пунктов БГП.

коры широкополосными шумоподобными сигналами. На рис. 6 приведены результаты расчета параметров для 4 измерительных пунктов.

Заключение

Компенсация не идеальности переходной характеристики индукционного датчика сигналов позволяет уменьшить погрешность вычисления кривой становления поля в активных электроразведочных методах с шумоподобными сигналами в области больших времен становления поля.

Первичное решение обратной задачи по методике В.А. Сидорова с предложенным улучшением позволяет оценить интервалы значений параметров геологи-

ческого разреза (мощностей слоев и их удельных проводимостей) для дальнейшего более точного решения обратной задачи методом подбора в установленных интервалах значений параметров геологического разреза.

Для приближенной интерпретации данных в условиях полевого эксперимента планируется реализация алгоритма построения разреза по кривым $S_{\tau}(h_{\tau})$.

Работа проводилась в рамках выполнения Государственного задания по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах» (FMUG-2022-0007) Шифр научной темы: FMUG-2022-0007. Номер государственного учета: 122101000008-9.

Литература

1. Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А. Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57, № 1, С.29-48.

2. Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2, С. 5-19.

3. Ильичев П.В., Лашин О.А. Широкополосный термостабильный измеритель индукции магнитного поля / Патент Российской Федерации на полезную модель № 168302, дата регистрации 30.01.2017 г.

4. Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В., Каринский С.Д., Яковлев А.Г. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. №1. С.52-60.

5. Сидоров В.А., Импульсная индуктивная электроразведка. Издательство «Недра», 1985.

6. Бобровский В.В., Ильичёв П.В. Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами // Вестник КРСУ. Бишкек: 2019. Т. 19, № 12. С. 77-83.

7. Жданов М. С., Электроразведка: учебник для вузов. М.:Недра, 1986.

Подробнее об авторах



Бобровский
Владимир Владимирович

научный сотрудник
лаборатории
перспективных
аппаратурных разработок,
Федеральное
государственное бюджетное
учреждение науки
Научная станция РАН
в г. Бишкек, Кыргызская
Республика.



Ильичев
Павел Вадимович

старший научный
сотрудник лаборатории
перспективных
аппаратурных разработок,
Федеральное
государственное бюджетное
учреждение науки
Научная станция РАН
в г. Бишкек, Кыргызская
Республика.



Александров
Павел Николаевич

доктор ф.-м. наук,
главный научный сотрудник,
Центр геоэлектромагнитных
исследований Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Института Физики
Земли им. О.Ю. Шмидта
РАН, Российская Федерация,
г. Троицк.