

УДК 550.837

О СИНХРОННОЙ ИНВЕРСИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ 1D-ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

С.Д. Журавлев^{1,3}, П.Ю. Пушкарев², С.А. Буденный^{1,3}

¹ ООО «Инжиниринговый центр МФТИ». 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4; e-mail: geophysuni@gmail.com, budennyi.sa@cet-mipt.ru

² МГУ имени М.В. Ломоносова. 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

³ Московский физико-технический институт. 141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

Аннотация. В статье рассмотрен эффект от использования синхронной инверсии на точности результатов инверсии электроразведочных данных в разрезе 1D-задач, предложен подход к формированию единого целевого функционала для методов ЧЗ и МТЗ. Алгоритм протестирован на двух геоэлектрических моделях в двух различных постановках задач. Первая постановка предполагает фиксацию мощности слоев и отсутствие ограничений на УЭС, вторая – введение общего коэффициента регуляризации на мощности и УЭС, но отсутствие жестких ограничений. В каждой постановке применение синхронной инверсии привело к увеличению точности полученных моделей относительно результатов отдельных инверсий по каждому из методов.

Ключевые слова. Синхронная инверсия, 1D-электроразведка, целевой функционал, повышение точности.

ON JOINT INVERSION APPROACH IN 1D GEOELECTRICAL PROBLEMS

S.D. Zhuravlev^{1,3}, P.Yu. Pushkarev², S.A. Budennyi^{1,3}

¹ JSC Center for engineering and technology of MIPT. Dolgoprudny, Nauchny per., 4, Moscow region, Russia, 141700; e-mail: geophysuni@gmail.com, budennyi.sa@cet-mipt.ru

² Moscow State University. Moscow, Leninskiye gory, 1, Russia, 119234; e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

³ Moscow Institute of Physics and Technology. 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation

Abstract. The article demonstrates an effect of inversion accuracy in joint inversion approach for 1D geoelectric problems and shows case for formulation of joint target function for CSEM and MT methods. The algorithm is verified on two models with different problem formulation for each. The first one assumes fixation of layers thickness and the second – usage of general regularization coefficient without any hard boundaries on thicknesses and resistivities. The application of joint inversion approach provides better accuracy of models regarding to real ones than results of separate inversions in every case.

Key words. Joint inversion, 1D geoelectric, target function, accuracy increasing.

ВВЕДЕНИЕ. Методики применения несейсмических методов в нефтегазовой геофизике находятся в стадии активного развития ввиду меньшей стоимости относительно сейсморазведочных работ, меньшего времени, необходимого на их проведение, и скорости камерального этапа с интерпретацией полученных результатов. При перечисленных положительных качествах точность, с которой удается восстановить параметры среды, например структурные границы или петрофизические параметры, зачастую уступает точности сейсморазведки.

Одним из подходов к повышению точности инверсии является комплексирование методов. Под комплексированием может подразумеваться как последовательное решение обратных задач для набора методов и использование результатов инверсии одного в качестве априорной информации для другого, так и синхронное решение обратных задач, т.е. минимизация единого функционала невязки для набора методов, что в англоязычной литературе носит название *joint inversion*. В настоящей работе будут рассмотрены преимущества применения метода синхронной инверсии.

В ряде работ [Куликов и др., 2017; Mackie et al., 2007; Sasaki, 2011] показан положительный эффект от применения синхронной 2D- и 3D-инверсий данных различных методов электроразведки. Акцент в них делается на определении геометрических границ или УЭС изолированных объектов, что является некой аппроксимацией рудных задач. Видно, что решения обратных задач в 2D- и 3D-случаях представляют собой модели с гладкими границами и плавным изменением свойств во всех направлениях. В нефтегазовой отрасли, имеющей дело преимущественно со слоистой средой, по-прежнему остаются важными 1D-задачи и определение жестких границ этих слоев.

В данной статье рассмотрен эффект от применения алгоритма синхронной инверсии для слоистых моделей в разрезе определения параметров всех слоев в совокупности на примере синтетических данных методов частотного зондирования (ЧЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). В качестве моделей использовались результаты (рис. 1), полученные в работе [Куликов и др., 1999]. Для опробования методики реализован программный код для отдельной и синхронной инверсии на основе алгоритма Нелдера – Мида [Nelder and Mead, 1965].

Постановка задачи

Решение обратной задачи начинается с постановки прямой задачи, т.е. определения оператора расчета физических полей от заданных моделей сред.

Применяемые в работе методы МТЗ и ЧЗ являются частотными методами электромагнитных зондирований и описываются уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}, \\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{H} – вектор магнитного поля, \mathbf{E} – вектор электрического поля, ρ – УЭС среды, i – комплексная единица, ω – круговая частота, μ_0 – магнитная постоянная.

Для метода МТЗ вводится понятие импеданса:

$$Z = \frac{E_x}{H_y}, \quad (2)$$

где E_x и H_y – электрическая x и магнитная y компоненты, соответственно. Такая формулировка позволяет избавиться от учета источника, который в случае МТЗ неизвестен. В одномерной постановке задача вычисления импеданса на кровле слоев сводится к рекуррентной формуле его пересчета с нижней границы [Ваньян, 1965]:

$$Z(z_{m-1}) = \frac{i\omega\mu_0}{k_m} \operatorname{cth} \left(-k_m h_m + \operatorname{arcth} \left(\frac{k_m}{i\omega\mu_0} Z(z_m) \right) \right), \quad (3)$$

где $Z(z_m)$ – импеданс на подошве этого слоя, k_m – волновое число слоя, h_m – мощность.

В случае с частотным зондированием в данной работе используется горизонтальная x -компонента электрического поля:

$$E_x(\omega) = \frac{pi\omega\mu_0}{2\pi} \left(\int_0^\infty \frac{m}{n_0 + n_1/R_1} J_0(mr) dm + \frac{1}{k_1^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x}{r} \int_0^\infty \left(\frac{1}{k_0^2/(k_1^2 n_0) + R_1/n_1} - \frac{k_1^2}{n_0 + n_1/R_G} \right) J_1(mr) dm \right) \right), \quad (4)$$

где p – произведение длины источника и силы тока в нем, r – расстояние между источником и точкой наблюдения, m – пространственная частота, k – волновое число, n – функции Бесселя, R_1 и R_G – индуктивные и гальванические импедансы. Для численного решения прямой задачи ЧЗ в работе используется код, разработанный в рамках проекта *emrmod* [Werthmüller, 2017]. Параметры установки для рассматриваемого эксперимента: экваториальная установка АВ- E_x с разносом – 6 км и источником в виде точечного диполя.

Для удобства представления результатов в работе используются графики кажущихся сопротивлений, которые являются трансформантами от импеданса для МТЗ и амплитуды поля для ЧЗ:

$$\rho = \frac{|Z^2|}{\omega\mu_0} \quad (5)$$

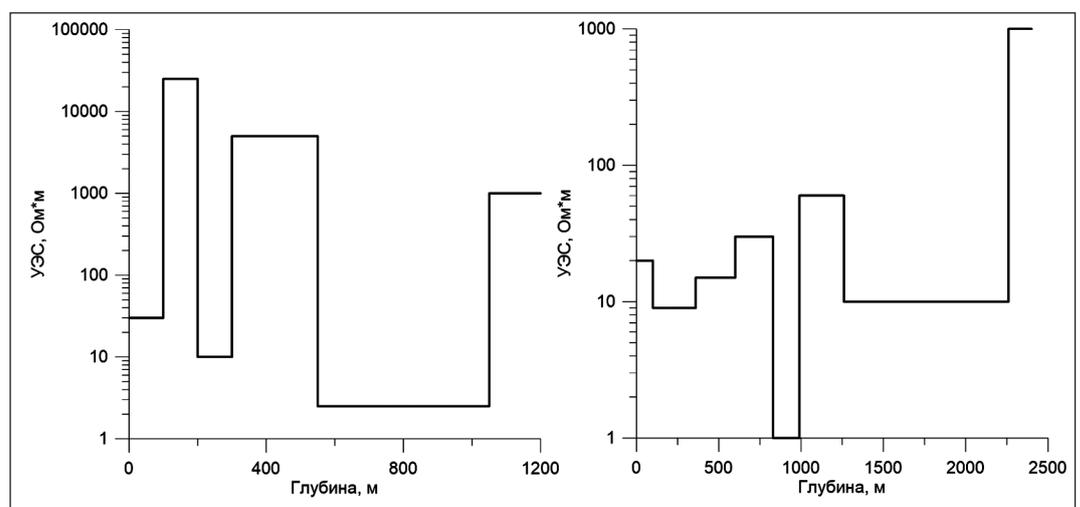
для МТЗ и

$$\rho(E_x) = E_x \frac{2\pi}{p^{AB}} \frac{r^3}{3\cos^2\varphi - 2} \quad (6)$$

для ЧЗ.

Кривые кажущегося сопротивления определим на периодах T от 10^{-5} до 10^4 сек.

Рис. 1
Модель 1D-среды
(слева Московская
синеклиза,
справа Рязано-
Саратовский прогиб)



Обратные задачи состоят в нахождении таких моделей, при которых функционал невязки будет минимальным. Для изолированного решения обратных задач в качестве функционала невязки используется выражение вида:

$$F = F_D + \alpha \operatorname{Reg}, \quad (7)$$

где F_D – невязка данных, Reg – невязка подобранной модели с априорной, α – коэффициент регуляризации.

Невязки, составляющие функционал, представляют собой выражения:

$$F_D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{x}_i - x_i}{\bar{x}_i} \right)^2}, \quad Reg = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \left(\frac{\bar{m}_j - m_j}{\bar{m}_j} \right)^2}, \quad (8)$$

где \bar{x}_i – измеренное значение каж. УЭС, x_i – подобранное на текущей итерации, n – количество периодов, \bar{m}_j – априорное значение параметра модели (УЭС или мощность слоя), m_j – подобранное, l – размерность модели (для шестислойной модели $l = 11$ – шесть значений УЭС и пять значений мощности, нижний слой считается бесконечно мощным).

Синхронная инверсия подразумевает учет данных всех используемых методов, поэтому функционал для нее должен содержать члены, отвечающие отдельно за каждый метод. В работе применяется функционал вида:

$$F = w_1 F_{MT} + w_2 F_{CSEM} + \alpha Reg, \quad (9)$$

где F_{MT} – целевой функционал для МТЗ, F_{CSEM} – целевой функционал для ЧЗ, w_1 и w_2 – весовые коэффициенты, необходимые для учета вклада методов, обладающих различной чувствительностью. Веса определяются динамически на каждой итерации. Первый коэффициент вычисляется как отношение:

$$w_1 = \frac{F_1}{F_2}, \quad (10)$$

где F_1 – наименьшая невязка среди обоих методов, F_2 – наибольшая, второй коэффициент: $w_2 = (1 - w_1)$. Наибольший из весов присваивается методу с наибольшей невязкой. Такая логика выбора весов позволяет избежать попадания общего решения в локальный минимум одного из методов и получать модель, которая в равной степени удовлетворяла бы данным обоих методов [Athanasiou E.N. et al., 2007].

Таким образом, минимизируя функционал (9), мы рассчитываем найти модель среды, которая одновременно удовлетворяла бы данным обоих методов. Как было сказано выше, для минимизации функционала невязки использовался метод Нелдера – Мида [Nelder and Mead, 1965], состоящий в формировании симплекса с количеством вершин $n + 1$, где n – размерность модели, и его деформированием в направлении минимума целевого функционала. Применительно к рассматриваемым задачам симплекс представляет собой многогранник, одна точка которого располагается в точке $V_0 = (h_{01}, h_{02}, \dots, h_{0n-1}, \rho_{01}, \rho_{02}, \dots, \rho_{0n})$ – стартовой модели, а другие вершины определяются автоматически путем поочередного увеличения каждого из изначальных значений на 5%.

В дальнейшем целевой функционал может быть усовершенствован, например, корректировкой стартовой модели, которая может браться как наилучший результат отдельных инверсий или как комбинация УЭС и мощностей результирующих моделей разных методов, однако в данной работе предлагается использовать обозначенное представление как наиболее универсальное для оценки общей применимости методики.

Параметры моделирования и результаты

Ниже приведены примеры расчетов для обеих моделей, представленных выше. Параметры инверсии одинаковые для каждого случая – 250 итераций, параметр регуляризации – 0,2.

Московская синеклиза

Параметры геоэлектрической модели Московской синеклизы (ее юго-западной части), полученные в результате обобщения опыта проведения здесь электромагнитных зондирований [Куликов и др., 1999], приведены в табл. 1. В этой модели первый слой представлен моренными образованиями четвертичного возраста, а также известково-глинистыми и песчаными отложениями С1. Вторым слоем сложен в основном карбонатными породами Д3 с прослоями гипсов и ангидритов, обладающих очень высокими сопротивлениями. Ниже по разрезу залегают глины Д3. Четвертый слой образован плотными известняками Д3, также с прослоями гипсов и ангидритов, а пятый – терригенными отложениями Д2, в основном песками и песчаниками, насыщенными высокоминерализованными (до 200 г/л) водами. Высокоомный фундамент сложен кристаллическими породами архейско-протерозойского возраста.

Таблица 1

Модель среды Московской синеклизы

№ слоя	УЭС, Ом*м	Мощность, м
1	30	100
2	25000	100
3	10	100
4	5000	250
5	2.5	500
6	1000	–

Ниже приведены результаты расчета прямой задачи для каждого метода с наложенным 10%-ным случайным шумом для имитации полевых данных – кривая с выбросами и после их сглаживания гладкая кривая – для последующей инверсии (рис. 2). Здесь и далее для сглаживания применялся фильтр Савицкого – Голя [Savitzky and Golay, 1964].

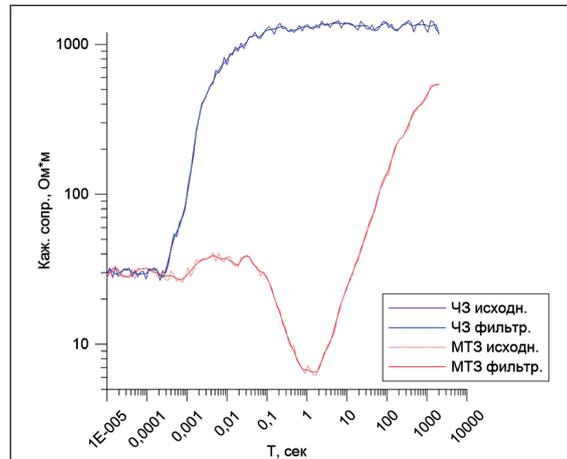


Рис. 2

Кривые кажущегося УЭС для методов ЧЗ и МТЗ до и после сглаживания

Значения априорных параметров для инверсии приведены ниже (табл. 2), мощности слоев задавались равными реальной модели, УЭС соответствовали общему тренду модели, но отличались по абсолютным значениям.

Таблица 2

Априорная модель Московской синеклизы

№ слоя	УЭС, Ом*м	Мощность, м
1	30	100
2	10000	100
3	5	100
4	7000	250
5	10	500
6	1200	–

Обратные задачи решались для двух вариантов – с наложением ограничений на мощности слоев путем введения штрафной функции, увеличивающей общую невязку, если мощность слоев в решении отличается более чем на 10% от априорной модели, и без жестких ограничений, но с общим параметром регуляризации. Первый вариант эквивалентен производственным задачам, где известен структурный каркас, например, по данным сейсмоки и необходимо произвести электрофациальное расчленение разреза. Вторая задача близка к построению априорных моделей на малоизученных площадях.

На рисунках ниже представлены результаты решения обратных задач для каждого из методов отдельно и синхронно с введением ограничений на мощность слоев.

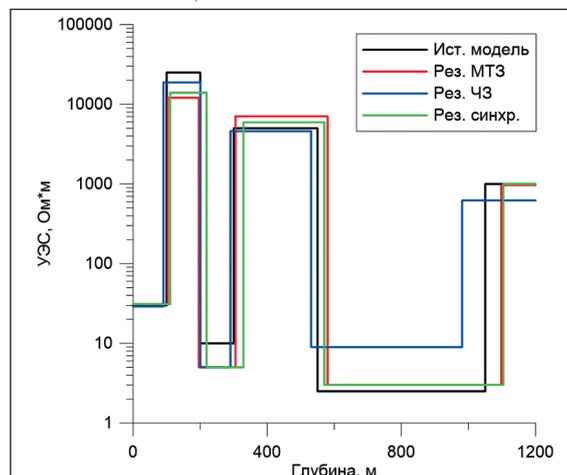


Рис. 3

Результаты инверсии (черная линия – истинная модель, красная – результат инверсии МТЗ, синяя – результат инверсии ЧЗ, зеленая – результат синхронной инверсии)

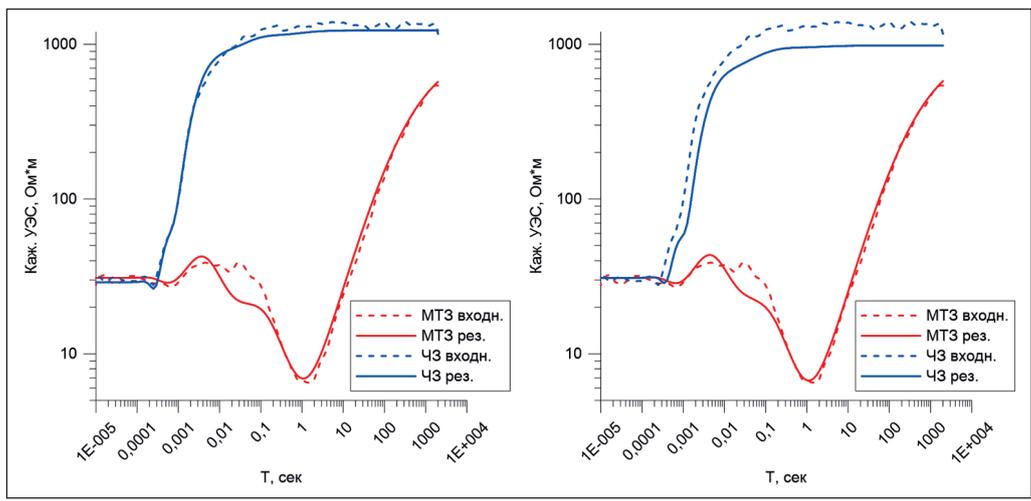


Рис. 4
Сходимость данных при отдельной (слева) и синхронной (справа) инверсиях

Здесь и далее на графиках сходимости данных пунктирные кривые представляют входные данные, которые подаются на инверсию, подобранные кривые обозначены сплошными линиями.

Модели, полученные в ходе инверсии, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результатирующие модели

МТЗ		ЧЗ		Синхр.	
УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м
31	103	29	90	31	110
12103	93	18713	110	13977	109
5	109	5	90	5	110
7047	275	4606	241	5953	241
3	518	9	450	3	534
967	–	620	–	1002	–

Ошибки подбора моделей для каждого случая составили 16, 36 и 15% для МТЗ, ЧЗ и синхронной инверсии, соответственно. Ошибка здесь и далее оценивалась как среднее относительное отклонение по УЭС и мощности для каждого слоя между результатом инверсии и истинной моделью.

Без ограничений на мощность слоев были получены следующие результаты.

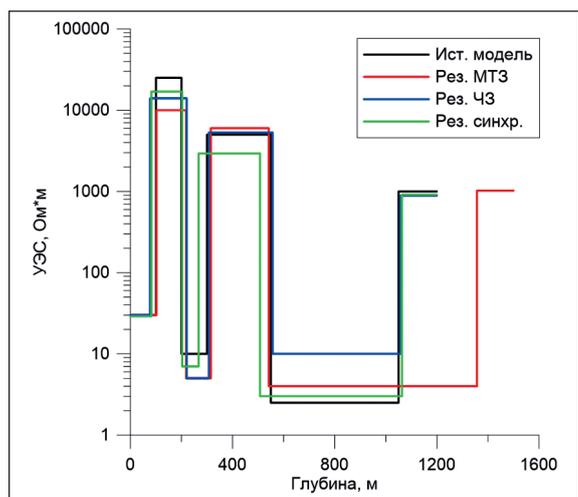


Рис. 5

Результаты инверсии (черная линия – истинная модель, красная – результат инверсии МТЗ, синяя – результат инверсии ЧЗ, зеленая – результат синхронной инверсии)

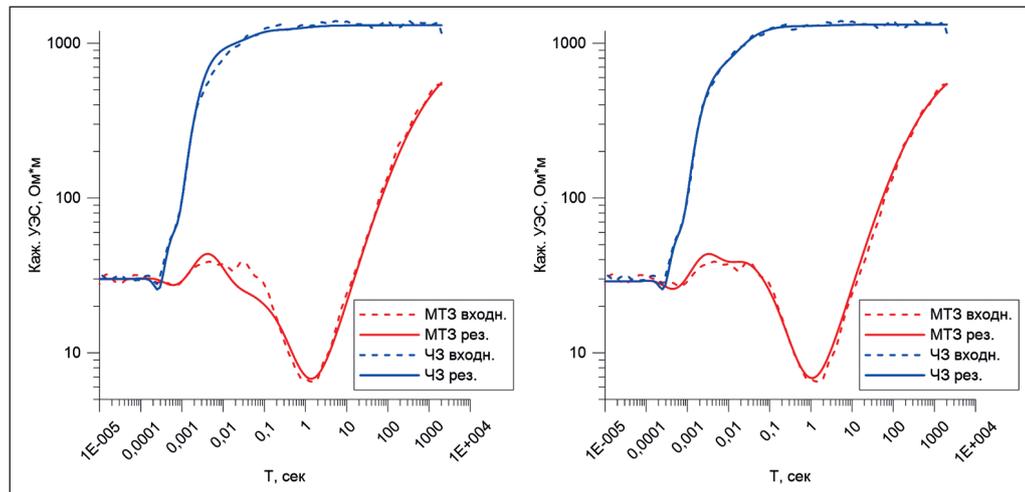


Рис. 6
Сходимость данных при отдельной (слева) и синхронной (справа) инверсиях

Результатирующие модели
Таблица 4

МТЗ		ЧЗ		Синхр.	
УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м
30	102	30	77	29	82
10000	116	14017	143	16952	121
5	97	5	87	7	64
6000	227	5303	250	2933	241
4	815	10	500	3	555
1024	–	890	–	909	–

Ошибки восстановления моделей составили 26, 43 и 19% для МТЗ, ЧЗ и синхронной инверсии, соответственно.

Рязано-Саратовский прогиб

Для модели Рязано-Саратовского прогиба проводились аналогичные эксперименты: расчет кривых УЭС для методов ЧЗ и МТЗ, их зашумление, сглаживание и отдельная и синхронная инверсии.

Геоэлектрическая модель Рязано-Саратовского прогиба (точнее, его юго-восточной части), построенная в результате интерпретации электромагнитных зондирований в этом регионе [Куликов и др., 1999], приведена в табл. 5. В ней первый слой отвечает терригенному комплексу J2, второй – глинам и известнякам C2, а третий – аргиллитам с прослоями песчаников C2. Ниже залегают известняки C1-C2, глины C1, известняки с прослоями аргиллитов D3-C1 и терригенно-карбонатная толща D2-D3. В основании разреза находится высокоомный фундамент.

Таблица 5
Модель среды Рязано-Саратовского прогиба

№ слоя	УЭС, Ом*м	Мощность, м
1	20	100
2	9	260
3	15	240
4	30	230
5	1	160
6	60	270
7	10	1000
8	1000	–

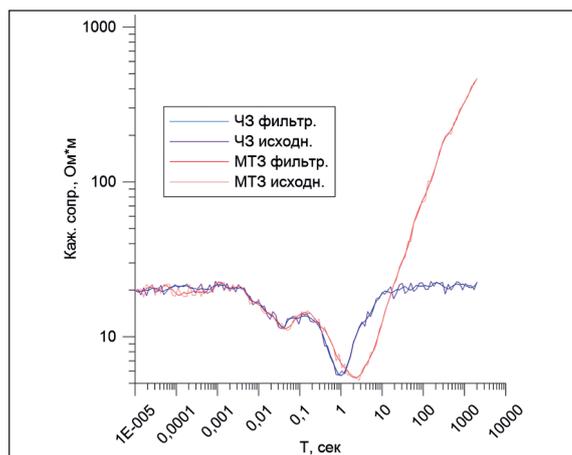


Рис. 7
Кривые кажущегося УЭС для методов ЧЗ и МТЗ до и после сглаживания

В качестве априорных значений брались следующие параметры среды:

Таблица 6
Априорная модель Рязано-Саратовского прогиба

№ слоя	УЭС, Ом*м	Мощность, м
1	30	100
2	10	260
3	20	240
4	30	230
5	2	160
6	50	270
7	5	1000
8	1200	–

Результаты решения обратных задач с учетом введения ограничений на мощности слоев представлены ниже.

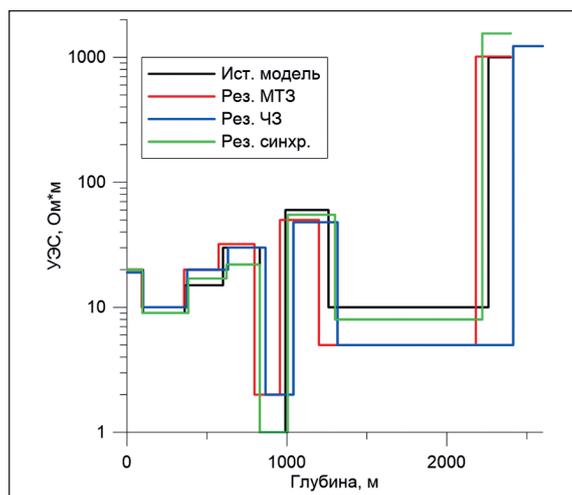


Рис. 8
Результаты инверсии (черная линия – истинная модель, красная – результат инверсии МТЗ, синяя – результат инверсии ЧЗ, зеленая – результат синхронной инверсии)

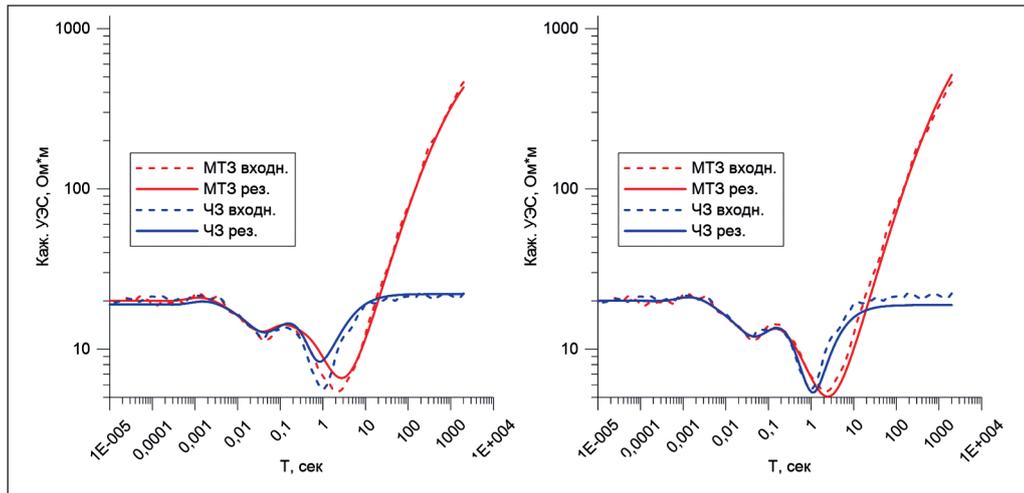


Рис. 9
Сходимость данных при отдельной (слева) и синхронной (справа) инверсиях

Таблица 7

Результатирующие модели

MT3		ЧЗ		Синхр.	
УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м
20	92	19	101	20	97
10	265	10	275	9	286
20	216	20	256	17	239
32	224	30	233	22	207
2	160	2	176	1	176
50	243	48	275	55	296
5	981	5	1099	8	921
1012	–	1229	–	1555	–

Ошибки восстановления моделей составили 16, 17 и 12% для MT3, ЧЗ и синхронной инверсии, соответственно.

Без введения ограничений в ходе инверсии удалось получить следующие результаты.

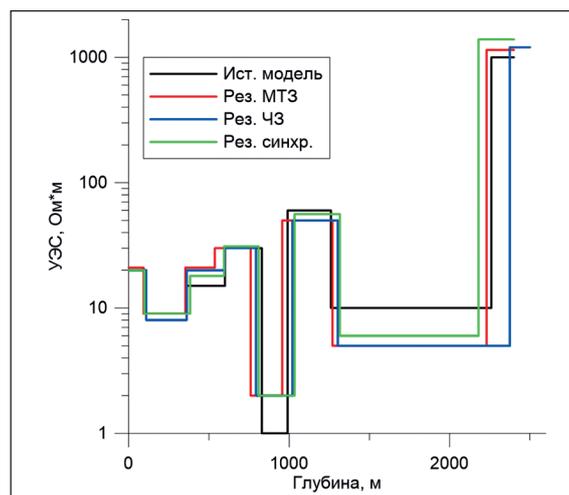


Рис. 10
Результаты инверсии (черная линия – истинная модель, красная – результат инверсии MT3, синяя – результат инверсии ЧЗ, зеленая – результат синхронной инверсии)

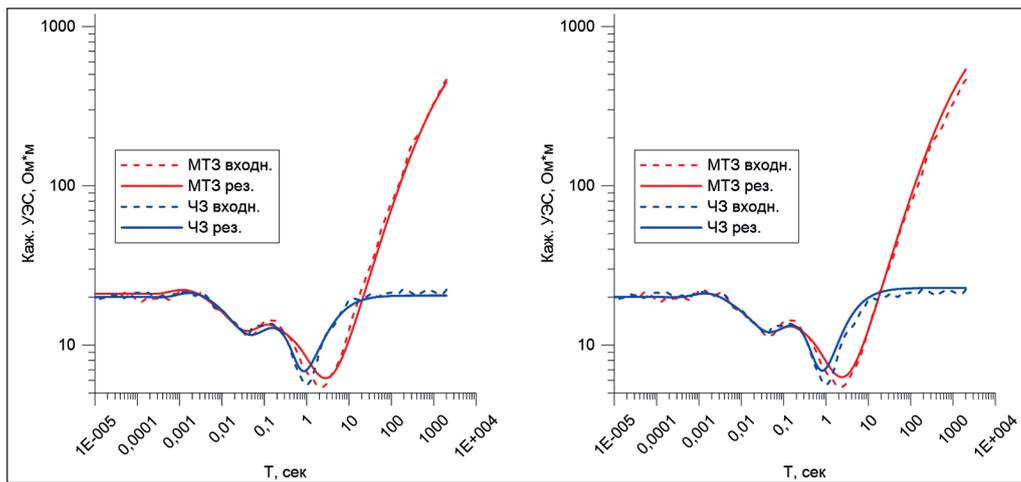


Рис. 11
Сходимость данных при отдельной (слева) и синхронной (справа) инверсиях

Результатирующие модели Таблица 8

МТЗ		ЧЗ		Синхр.	
УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м	УЭС, Ом*м	Н, м
21	93	20	110	20	99
9	260	8	251	9	283
21	184	20	236	18	213
30	223	30	197	31	214
2	197	2	227	2	224
50	313	50	282	56	283
5	960	5	1072	6	864
1146	–	1203	–	1389	–

Ошибки восстановления моделей составили 19, 20 и 16% для МТЗ, ЧЗ и синхронной инверсии, соответственно.

Выводы. Данная работа наглядно демонстрирует эффективность применения синхронной инверсии для решения задач геоэлектрики на примере моделей Московской синеклизы и Рязано-Саратовского прогиба. Основной вклад от синхронной инверсии данных двух методов заключается в том, что в зонах, где чувствительность одного метода уменьшается, т.е. фактически измеренные данные слабо зависят от параметров среды, целевой функционал стремится минимизировать часть, отвечающую за невязку другого метода, приводя тем самым итоговую модель к значениям, более близким к истинной модели.

Методы частотного и магнитотеллурического зондирования обладают различной чувствительностью, что хорошо видно на графиках, иллюстрирующих модели, полученные по независимым инверсиям – по данным ЧЗ с установкой АВ-Ех, т.е. гальванической составляющей, устойчиво определяются Т и S, соответственно, высокоомных и проводящих слоев, а по данным МТЗ, представляющим собой индукционный метод, – Н и S, где Н – глубины до проводников. Наличие в разрезе высокоомных экранов снижает чувствительность гальванической компоненты, поэтому, например, метод ЧЗ для модели Московской синеклизы дает результаты ниже экрана, идентичные стартовой модели. Для модели Рязано-Саратовского прогиба отдельно по МТЗ менее устойчиво определяются сопротивления высокоомных слоев, а по ЧЗ – глубины до проводников, чем при совместной инверсии. Применение же синхронной инверсии, как было показано ранее, позволяет исключить или уменьшить влияние отдельных особенностей методов, улучшив результирующую модель на несколько процентов относительно наилучшего метода в отдельности для каждого из рассмотренных случаев.

Данный пример демонстрирует возможность применения синхронной инверсии на довольно простом случае, т.к. при инверсии определяется один и тот же набор параметров, однако даже в нем остаются задачи для дальнейших исследований.

Одной из таких задач является обоснование выбора общего целевого функционала. Так, например, в данном алгоритме применяются весовые коэффициенты, которые определяются как отношение значений функционалов невязок на каждом шаге итерации, для того чтобы итоговая модель максимально удовлетворяла данным каждого из методов. С другой стороны, на данном этапе не ясно, может ли это привести к дополнительным ошибкам, связанным с тем, что итоговым решением станет некая усредненная модель, которая будет хуже, чем

полученная отдельно по более точному в определенных условиях методу. Сам же целевой функционал в работе представляется в виде линейной комбинации независимых функционалов, что может быть не самым надежным способом, особенно при минимизации функций, зависящих от одних и тех же параметров.

Другой задачей является поиск оптимального метода формирования входных параметров. Вполне возможно, что стартовая модель для синхронной инверсии может быть определена как комбинация наиболее надежных параметров моделей, полученных при отдельных инверсиях по каждому из методов, входящих в совместный функционал, однако метрика надежности этих параметров является темой отдельного исследования.

Эти и другие вопросы предстоит решить в дальнейших исследованиях, однако приведенные в работе примеры наглядно демонстрируют актуальность и эффективность применения синхронной инверсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965.
2. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите // Известия вузов (Геология и разведка). 1999. №. 3. С. 106.
3. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиоманнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. 2017. Т. 223.
4. Athanasiou E.N. et al. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types // Journal of applied geophysics. 2007. Т. 62. №. 2. P. 124–140.
5. Mackie R., Watts M.D., Rodi W. Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007. Society of Exploration Geophysicists, 2007. P. 574–578.
6. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *The computer journal*. 1965. Т. 7. №. 4. P. 308–313.
7. Sasaki Y. Anisotropic, joint 3D inversion of marine CSEM and MT data // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists. 2011. P. 547–551.
8. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*. 1964. Т. 36. №. 8. P. 1627–1639.
9. Werthmüller D. An open-source full 3D electromagnetic modeler for 1D VTI media in Python: empymod // Geophysics. 2017. Т. 82. №. 6. P. WB9–WB19.

REFERENCES

1. Vanyan LL. Fundamentals of electromagnetic sounding. Moscow: Nedra, 1965 (in Russian).
2. Kulikov VA, Pushkarev PY, Yakovlev AG, Yakovlev AD. The experience of frequency sounding on Russian plate. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 1999; (3): 106 (in Russian).
3. Kulikov VA, Kaminsky AE, Yakovlev AG. Combined inversion of electric resistivity tomography and magnetotelluric sounding for solving tasks of ore geophysics. *Journal of Mining Institute*. 2017. V. 223 (in Russian).
4. Athanasiou EN et al. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of applied geophysics*. 2007; 62(2): 124–140.
5. Mackie R, Watts MD, Rodi W. Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007. Society of Exploration Geophysicists, 2007. P. 574–578.
6. Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *The computer journal*. 1965; 7(4): 308–313.
7. Sasaki Y. Anisotropic, joint 3D inversion of marine CSEM and MT data. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2011. P. 547–551.
8. Savitzky A, Golay MJE. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*. 1964; 36(8): 1627–1639.
9. Werthmüller D. An open-source full 3D electromagnetic modeler for 1D VTI media in Python: empymod. *Geophysics*. 2017; 82(6): WB9–WB19.

Положительная рецензия 24.07.2020

ОБ АВТОРАХ



ЖУРАВЛЕВ
Сергей Дмитриевич

Инженер ООО «Инжиниринговый центр МФТИ». Бакалавр геологии Новосибирского государственного университета (2011–2015), магистр геологии Новосибирского государственного университета (2015–2017). Аспирант Московского физико-технического института (2018 – настоящее время).



ПУШКАРЕВ
Павел Юрьевич

Профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ им. М.В. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г.



БУДЕННЫЙ
Семен Андреевич

Руководитель департамента цифровых технологий в промышленности ООО «Инжиниринговый центр МФТИ». Бакалавр физики Новосибирского государственного университета (2007–2011). Магистр физики Высшей школы промышленной физики и химии, г. Париж (2011–2014).

Кандидат физико-математических наук Московского физико-технического института (2014–2019).