Совместная 2D+ инверсия МТ/МВ данных на широтных профилях массивов зондирований KIROVOGRAD и SMOLENSK

Н.В. Баглаенко, Ив.М. Варенцов, И.Н. Лозовский

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк; ivan_varentsov@mail.ru

Аннотация

Обсуждается методика и результаты совместной 2D+ инверсии магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных вдоль широтных профилей сводного массива зондирований KIROVOGRAD+SMOLENSK в пределах западной части Воронежского массива и прилегающей Оршанской впадины. Алгоритм робастной 2D инверсии в кусочно-непрерывных средах с коррелируемыми параметрами применяется к полному ансамблю МТ/МВ данных в составе двух мод импеданса (логарифма кажущегося сопротивления и фазы), компонент типпера W_{zv} (Re, Im) и горизонтального MB отклика M_{vv} (Re, Im).

Особое внимание уделяется учету реальных погрешностей данных и степени их 3D искажений, а также обоснованному выбору итоговых итераций инверсии, обеспечивающих разумный компромисс устойчивости и детальности получаемых моделей среды. 3D искажения подавляются в рамках стратегии 2D+, основанной на анализе параметров трехмерности (skew) и азимутов главных направлений передаточных операторов. Элементы данных с заметными величинами skew и отклонениями главных направлений от профиля инверсии используются с пониженными весами. Погрешности данных, полученные при оценивании передаточных операторов, учитываются с ограничением снизу (наложением error floor) и дополнительным взвешиванием отдельных компонент данных, например, снижением весов кажущихся сопротивлений для борьбы с их статическими смещениями. Анализ невязок данных ведется для каждой инвертируемой компоненты. Использование абсолютных норм невязок (L₂ и робастных) позволяет сравнивать решения при разных стратегиях взвешивания данных. "Сложность" модельных разрезов и псевдоразрезов модельных данных в ходе итераций инверсии контролируется визуально. Итоговые итерации выбираются до резкого возрастания "сложности". Обсуждается построение формализованных оценок "сложности" моделей и данных.

Приоритетно рассматриваются результаты 2D+ инверсии на самых длинных (400-500 км) профилях Кричев - Жиздра (КZ) и Могилев - Киров (МК). Начальные модели включают представления о нормальном 1D разрезе региона. Распределение логарифма сопротивления подбирается в двух окнах: осадочном на глубинах до 3 км и корово-мантийном на глубинах от 3 до 100-200 км. В этих окнах используются разные оценки размеров ожидаемых аномальных структур, стабилизирующие результаты инверсии. Полученные разрезы показывают гладкое и устойчивое распределение сопротивлений осадочного чехла и измененного фундамента в верхнем окне, дающее весьма точное соответствие модельных оценок суммарной продольной проводимости S на глубинах 0-3 км с асимптотическими оценками S по наблюденным эффективным амплитудам импеданса. Представлена изменчивость получаемых коровых проводящих структур в зависимости от априорных оценок их размеров и стратегий взвешивания данных. На каждом профиле робастно построены средние модели по сериям решений инверсии с низкими невязками данных. Они позволяют объективно оценить достоверность разрешения различных частей разрезов.

Коровые проводники на юге Оршанской впадины (профили КZ и МК) локализуются в ее бортовых зонах. Предстоит осмысление их геологической природы. Проводящие структуры Кирово-Барятинской и Курской коровых аномалий на восточных сегментах профилей КZ и МК хорошо соответствуют моделям, ранее построенным в проекте KIROVOGRAD на более коротких профилях. Получены первые результаты инверсии на профиле Себеж – В. Луки – Ржев и еще на трех профилях, лежащих между южными профилями KZ, MK и северным VR. 2D+ инверсия данных массива KIROVOGRAD+SMOLENSK будет продолжена с развитием представленной методики в сопоставлении с другими методами интерпретации.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, Воронежский массив, осадочные бассейны, профильная интерпретация, многокомпонентная 2D инверсия, учет 3D искажений



фаз с цветом минимальной фазы) и МВ откликов (черные действительные векторы индукции, зеленые оси максимальной амплитуды горизонтального оператора относительно п. BAVN западнее Брянска); справа, сверху вниз: - ху и ух компоненты кажущегося сопротивления.

Методика 2D инверсии

Используется общая схема совместной инверсии МТ/МВ данных в кусочно-непрерывных средах (Варенцов, 2002, 2006, 2011; Varentsov, 2015), синтезирующая идеи Тихоновской регуляризации и статистических методов решения обратных задач (Taran-tola, 2005). Ее эффективность определяется рациональным сочетанием широкого набора средств стабилизации решения, защищающих от воздействия внешних и внутренних источников погрешностей разной природы: *рациональной параметризации среды* (выделения нормальной и аномальной структур модели, использования корреляционно связанных параметров); линейного (в соответствии с априорными весовыми матрицами) и нелинейного (подбор log-параметров по log-амплитудам данных) масштабирования параметров и данных;

тихоновской регуляризации с адаптивным уменьшением параметра регуляризации в зависимости от скорости сходимости итераций инверсии; *робастной метрики функционалов* (Хьюбер, 1984) для защиты от редких, но больших отскоков с адаптивностью к медианным статистикам невязок; стабилизированной прямой факторизации ньютоновских систем, работающей адаптивно в зависимости от уровня функционала невязки данных; линейных ограничений "здравого смысла", отсекающих экзотические модели при выборе ньютоновского скалярного шага.

Адаптивный характер реализации большинства из этих средств определяет надежность сходимости и высокую разрешающую способность 2D реализации предложенного подхода. Он получил широкое опробование на синтетических (Варенцов, 2002, 2006; Varentsov et al., 2007; Varentsov, 2015а) и реальных (Варенцов и др., 2012, 2013; Varentsov, 2015b) наборах многокомпонентных МТ/МВ данных. На синтетических тестах продемонстрирована сопоставимо высокая точность 2D инверсии отдельно по данным импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика и преимущества схем их совместной инверсии. Наиболее сложный синтетический набор данных, имитирующий реальную геоэлектрическую среду с аномалиями в осадочном чехле, земной коре и верхней мантии исследован в работах (Varentsov et al., 2007; Varentsov, 2015a).

Ансамбли инвертируемых данных

Подавление приповерхностных искажений кажущихся сопротивлений достигается широким и приоритетным использованием МВ данных (типпера и горизонтального магнитного оператора) и импедансных фаз. Оправдано использование фазовых данных, извлекаемых из фазового тензора импеданса (Caldwell et al., 2004). Данные и их погрешности, подлежащие инверсии, отбираются после преобразования передаточных операторов к направлению профиля. Погрешности ограничиваются снизу пороговыми величинами (error floors). Допустимо введение весовых множителей для отдельных компонент данных, увеличивающих или уменьшающих их погрешности. Так может быть снижено влияние приповерхностно искаженных кажущихся сопротивлений. Также коэффициенты коррекции статических искажений в отдельных точках зондирования могут робастно определяться в ходе инверсии (Варенцов, 2002; Varentsov, 2015а).

Режим 2D+ инверсии

В данном режиме погрешности дополнительно увеличиваются пропорционально факторам 3D искаженности (выражаемым оценками трехмерности skew) и неадекватной двумерности (неперпендикулярности линии профиля оценкам простирания) для всех инвертируемых передаточных операторов. Приоритет в ходе инверсии получают элементы данных с хорошей двумерностью и лишь по мере их подбора начинают учитываться 3D-искаженные элементы.

Начальная модель инверсии и априорные предположения

Схема параметризации модели инверсии подробно описана в работах (Варенцов, 2002; Varentsov, 2015а) и состоит из 1D периферийных разрезов и центральных 2D окон сканирования среды. Окна разбиваются на ячейки инверсии. Оптимизируются сопротивления ячеек инверсии и слоев периферийных разрезов. Для каждого оптимизируемого параметра задаются начальные значения, ожидаемый масштаб изменений и ограничения "здравого смысла". Изменения параметров в окнах сканирования корреляционно связаны (Tarantola, Nercessian, 1984; Bapeнцов, 2002; Varentsov, 2015а) и контролируются ожидаемыми размерами (горизонтальными и вертикальными) проявляющихся в них структур. Естественен перебор альтернативных априорных моделей, но они не должны быть слишком сложными, дабы не затруднять сходимость итераций многокомпонентной инверсии.

Выбор оптимальной итерации инверсии

Итерационный процесс нелинейной ньютоновской инверсии идет с последовательным уменьшением параметра регуляризации. На поздних итерациях решение может стать заметно неустойчивым. Необходим контроль точности и устойчивости решения в ходе итерационного процесса для выбора квазиоптимальной итерации. "Сложность" модели



Рис. 2. Геоэлектрические модели (Омм, Ig-масштаб) на различных итерациях для одного из решений задачи 8-компонентной инверсии МТ/МВ данных на профиле МК: вверху – начальная модель (00), далее вниз – результаты на итерациях 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 95; на вертикальной оси разные масштабы для глубин 0-4 км и 4-200 км. ***

Рис. 3. Квазиоптимальная модель (Омм, Ід-масштаб), выбранная на 60-й итерации; на вертикальной оси разные масштабы для глубин 0-3 км и 3-100 км; на разрез наложена оценка мощности фундамента, выше показаны кривые продольной проводимости осадков (звездочки – наблюденные, пунктир – модельные; красным показана суммарная продольная проводимость коры).

	RO _{HP}	f _{HP}	RO _{EP}	f _{EP}	ReW	ImW	ReM	lmM
00	.824/.951	10.7/12.1	.792/.882	24.1/21.8	.148/.161	.075/.073	.190/.209	,060.076
20	.220/.245	7.02/8.16	.319/.408	12.5/13.1	.134/.125	.063/,062	.149/.159	.080/.094
40	.110/.143	5.36/6.28	.331/.436	10.6/10.2	,078/.079	.040/.043	.087/.104	.055/.073
50	.082/.107	4.92/6.09	367/449	10 4/10 1	068/ 074	038/ 041	068/ 084	049/ 059

Габл. 1. Абсолютные невязки компонент данных для решения обратной задачи, показанного на рис. 2: слева - $Q_{2/3}$, справа - L_2 ; для кажущегося сопротивления даны нормы невязок lgданных; красным выделены невязки

MK1 P

Эффекты неустойчивости приводят к усложнению структуры модели и псевдоразрезов модельных данных с появлением мозаики мелких деталей. Простейший путь визуальный контроль изменений модели по ходу итераций и сопоставление структурной сложности псевдоразрезов наблюденных и модельных данных. Для количественного контроля сложности реализуется подход, основанный на подсчете числа экстремумов, превышающих по амплитуде серию заданных уровней, в моделях и псевдоразрезах данных, успешно опробованный в методе квази-3D инверсии MB данных (Kovacikova, Varentsov, 2016).

Невязки данных

В ходе многокомпонентной инверсии с различными стратегиями взвешивания данных относительные характеристики невязок данных не являются эффективными, поскольку зависят от вводимых весов. Целесообразно анализировать абсолютные нормы невязок логарифмов кажущегося сопротивления, импедансных фаз, компонент типпера и горизонтального МВ отклика. Важно в таком анализе дополнить традиционные L₂ нормы робастными альтернативами на основе порядковых статистик невязок – например, квантилей Q_{2/3} и Q_{3/4}.

Анализ серии сопоставимых по качеству результатов инверсии

Вариация состава инвертируемых данных, весов их компонент и изменения параметров стабилизации инверсии обычно порождает серию решений с сопоставимым качеством, выраженным в невязках данных и оценках сложности моделей. Выбор наилучшего решения из этого ряда может быть затруднителен. В таком случае целесообразно выполнить робастное осреднеение кластера сопоставимых решений. Его результат даст не только надежно усредненную геоэлектрическую структуру, но и характеристику ее изменчивости. Результат осреднения (возможно, после некоторого упрощения) может стать начальной моделью нового этапа инверсии с уточненными весами данных и параметрами стабилизации.

2D+ инверсия MT/MB данных на профилях массивов зондирований KIROVOGRAD и SMOLENSK

Результаты 2D+ инверсии на северных широтных профилях массива KIROVOGRAD в сопоставлении с другими методами представлены в работах (Варенцов и др., 2012, 2013; Алексанова и др., 2013; Varentsov, 2015b). В рамках проекта SMOLENSK (Варенцов и др., 2021) эти профили продлены на запад за пределы Воронежского массива и Оршанской впадины. Они показаны на рис. 1, с юга на север: Кричев-Жиздра (КZ), Могилев-Киров (МК) и Орша-Барятино (ОВ). На сводных профилях сохраняется квази-2D характер МТ и МВ откликов.

Представляются результаты совместной 8-компонентной инверсии двух мод импеданса (кажущихся сопротивления и фаз фазового тензора, периоды 8-4096 с), компонент типпера Wzy (Re и Im, периоды 16-4096 с) и горизонтального магнитного оператора Муу (Re и Im, периоды 32-4096 с). Горизонтальные MB отклики взяты отн. базового пункта BAVN западнее Брянска (рис. 1). На рис. 2 показана сходимость моделей инверсии в ходе ее итераций для одного из лучших решений на профиле MK, а в табл. 1 – изменения частных абсолютных невязок. Эти данные позволяют выбрать в качестве квазиоптимальной модели результат 60-й итерации (рис. 3). Сопоставление псевдоразрезов модельных и наблюденных данных приведено на рис. 4. На данном профиле получено более 20 решений, различающихся весами данных и параметрами стабилизации и начальных моделей. Из них отобрано 9 решений, сопоставимых по качеству с показанным на рис. 3. Результат робастного осреднения отобранных решений дан на рис. 5, а невязки данных – в табл. 2.

Аналогичная методика применена на профиле KZ – на рис. 6 показана одна из квазиоптимальных моделей, а в табл. 3 – невязки данных. Результаты, полученные на двух близких профилях, достаточно похожи: адекватно отражены проводящие осадки, подтверждена структура Кирово-Барятинской коровой аномалии на восточных частях профилей, выявлены сходные (до уровня 1000 См) коровые аномалии на западном борту Оршанской впадины и отмечены размытые и малоконтрастные коровые проводники на ее восточном борту. Предстоит дальнейшее уточнение результатов 2D+ инверсии на профилях KZ, MK, OB и более северных профилях проекта SMOLENSK, а также геологическое истолкование выявленных аномалий.

Заключение

Представлена методика совместной 8-компонентной 2D+ инверсии МТ/МВ данных и принципы выбора квазиоптимальных моделей в ходе итераций инверсии, показаны возможности робастного осреднения серии решений обратных задач сопоставимого качества. Представлены результаты применения данной методики на двух сводных профилях массивов зондирований KIROVOGRAD и SMOLENSK. Выявлены новые коровые проводящие структуры на бортах Оршанской впадины.



Благодарности

Исследования выполнялись в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН №0144-2019-0021. Авторы благодарны участникам Рабочих групп KIROVOGRAD и SMOLENSK за участие в сборе данных и полезные обсуждения.

Литература

Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. № 2. С. 32-38. Варенцов Ив.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли. 2002. № 11. С. 11-33.

Варенцов Ив.М. Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Разведка и охрана недр. № 8. 2006. С. 66–71.

Варенцов Ив.М. Прагматическая 2D инверсия синхронных ансамблей МТ/МВ откликов // Материалы V Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. Т. 2. СПб.: СПбГУ. 2011. С. 17-21.

Варенцов Ив.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос. 2013. 118 с.

Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Ионичева А.П. и др. Массив МТ зондирований SMOLENSK: изучение глубинной структуры области тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы // Геофизика. 2021. № 1. С. 46-56

Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофиз. журн. 2012. Т. 34(4). С. 90-107.

Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир. 1984. 304 с.

Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158 (2). P. 457-469.

Kovacikova S., Varentsov Iv.M., KIROVOGRAD WG. Quasi-3D inversion of horizontal MV responses: methodical developments and applications for the KIROVOGRAD sounding array // XXIII EM Induction Workshop. 2016. Chiang Mai, Thailand. 4p. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. Philadelphia: SIAM. 2005. 342 p.

Tarantola A., Nercessian A. 3D inversion without blocks // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1984. V. 50. P. 1618–1627.

Varentsov Iv.M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior, V. 40 (2nd Edition) / ed.: Spichak V.V. Amsterdam: Elsevier, 2015a. P. 191-229. Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior, V. 40 (2nd Edition) / ed.: Spichak V.V. Amsterdam: Elsevier, 2015b. P. 271-299. Varentsov Iv., Baglaenko N., Sokolova E. 2D inversion resolution in the EMTESZ-Pomerania project: data simulation approach // Protokoll uber das 22 Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung" (Eds. O. Ritter, H. Brasse). Dtsch. Geophys. Ges. Potsdam. Germany. 2007. P. 143-150.

Табл. 2. Абсолютные невязки компонент данных на профиле МК для результата осреднения 9 решений (СР) и квазиоптимального решения, показанного на рис. 3.

	RO _{HP}	f _{HP}	RO _{EP}	f _{EP}	ReW	lmW	ReM	ImM
СР	.083/.103	4.86/5.92	.411/.467	9.76/9.76	.059/.070	.035/.039	.062/.079	.044/.054
60	.070/.092	4.84/5.88	.395/.458	10.2/9.95	.063/.069	.038/.040	.063/.079	.045/.054

Табл. 3. Абсолютные невязки компонент данных на профиле КZ для результата осреднения 12 решений (СР) и одного из квазиоптимальных решений, показанного на рис. 6.

	RO _{HP}	f _{HP}	RO _{EP}	f _{EP}	ReW	lmW	ReM	ImM
Ср	.077/.087	4.25/5.10	.285/.343	8.41/8.18	.087/.101	.041/.045	.042/.073	.056/.067
72	.066/.083	4.16/4.98	.301/.348	8.62/8.37	.084/.101	.040/.044	.037/.069	.054/.066



Рис. 6. Квазиоптимальная модель (Омм, Igмасштаб) для одного из лучших решений на профиле КZ

(вверху)

и модель (внизу), полученная в результате робастного осреднения 12 решений, сопоставимых по качеству; на вертикальной оси разные масштабы для глубин 0-3 км и 3-100 км; на разрез наложена оценка мощности фун-дамента, выше показаны кривые продольной проводи-мости осадков (звездочки – наблюденные, пунктир – модельные; красным показана суммарная продольная проводимость коры.