

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Валерий Викторович Плоткин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

С помощью численных экспериментов рассматриваются возможности применения метода декомпозиции расчетной области при решении прямых задач магнитотеллурического зондирования.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, метод Треффца, декомпозиция расчетной области

## APPLICATION OF CALCULATION REGION DECOMPOSITION IN SOLVING MAGNETOTELLURIC SOUNDING PROBLEMS

*Valery V. Plotkin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Scientist, e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Using numerical experiments, possibilities of application the decomposition method of the calculation region in solving direct problems of the magnetotelluric sounding are considered.

**Key words:** the magnetotelluric sounding, the Trefftz method, the calculation region decomposition

Одним из методов изучения глубинных структур электропроводности Земли является магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) [1, 2]. Из-за сложного геоэлектрического строения геологической среды часто возникает необходимость использования 3D-моделей среды. Для расчетов поля в ней можно воспользоваться, в частности, методом Треффца [3, 4]. Взятая модель среды представляется набором параллелепипедов, в которых она однородна. Понятно, что с уменьшением размеров параллелепипедов и увеличением их количества точность расчетов будет возрастать. Однако при этом существенно увеличиваются и необходимые для расчетов вычислительные мощности. Один из вариантов преодоления возникающих трудностей связан с применением метода декомпозиции расчетной области на подобласти [5]. Расчеты поля в подобласти меньших размеров требуют меньших вычислительных ресурсов. Основанием этого подхода является затухание в проводящей среде аномальных полей, создаваемых 3D-неоднородностями, с увеличением расстояния от них. Вполне можно говорить о локальности влияния 3D-неоднородностей. Размеры области влияния, по всей видимости, определяются параметрами скин-слоя в среде вблизи вторичного источника поля.

В данной работе предполагается рассмотреть возможность решения прямой задачи МТЗ, используя декомпозицию всей расчетной области на субдомены (подобласти) - ограниченные по горизонтали участки полигона, включающие по вертикали все слои в расчетной области.

Алгоритм решения задачи основан на применении метода итераций. В каждом субдомене по методу Треффца рассчитывается электромагнитное поле, которое запоминается в соответствующих точках всей (глобальной) сетки расчетной области. Смещая субдомен по горизонтали, повторяем расчеты, пока не будет определено электромагнитное поле во всей расчетной области и в итоге получены результаты данной итерации. Подобные итерации повторяются, пока не будут выполнены условия сходимости вычислительного процесса.

Смещения субдоменов в итерациях проводятся с использованием их наложения друг на друга по горизонтали. В зависимости от степени наложения меняется количество субдоменов и полное время решения задачи, сходимость процесса и его скорость. В последовательных итерациях используются разные схемы смещений субдоменов - сначала, например, ряд смещений вдоль одной из горизонтальных осей, а затем такой же ряд смещений после перехода по другой горизонтальной оси. В качестве первого субдомена можно взять любой, находящийся в углах полигона. В итоге так можно выбрать 8 разных схем смещений субдоменов.

Приведем граничные условия задачи определения поля в субдоменах. На нижней грани это условия затухания поля в подстилающей среде. На боковых гранях поставлены условия периодичности поля (3D-неоднородность внутри субдомена), более подробно эти условия и их применимость описаны в [4]. На верхней грани субдомена задаются горизонтальные компоненты магнитного поля. Указанные условия полностью определяют единственное решение задачи в субдомене.

Для первой итерации необходимо задать компоненты магнитного поля на поверхности полигона. В качестве такого поля мы используем решение задачи МТЗ для горизонтально-слоистой среды, в частности, фоновой или полученной усреднением исходной модели среды по горизонтальным координатам.

Сходимость вычислительного процесса после проведенных итераций устанавливается по изменениям поля на земной поверхности или кривых МТЗ в нескольких пунктах на полигоне. Поле на земной поверхности, полученное после данной итерации, мы определяем с помощью усреднения результатов всех предшествующих итераций.

Для апробации нашего подхода мы провели численное моделирование с фоновой средой из двух слоев с удельными сопротивлениями 49.4 и 18.2 Ом·м, мощностями 10.3 и 11.6 км (сверху вниз) и подстилающей средой 5 Ом·м. Верхние слои содержат латеральные неоднородности, распределение которых и тестируемая модель 3D-среды показаны на рис. 1. Ось  $OX$  направлена на север, ось  $OY$  - на восток и ось  $OZ$  - вертикально вниз. Размеры полигона по осям  $OX$  и  $OY$  составляют 17.3 км и 21.7 км соответственно.

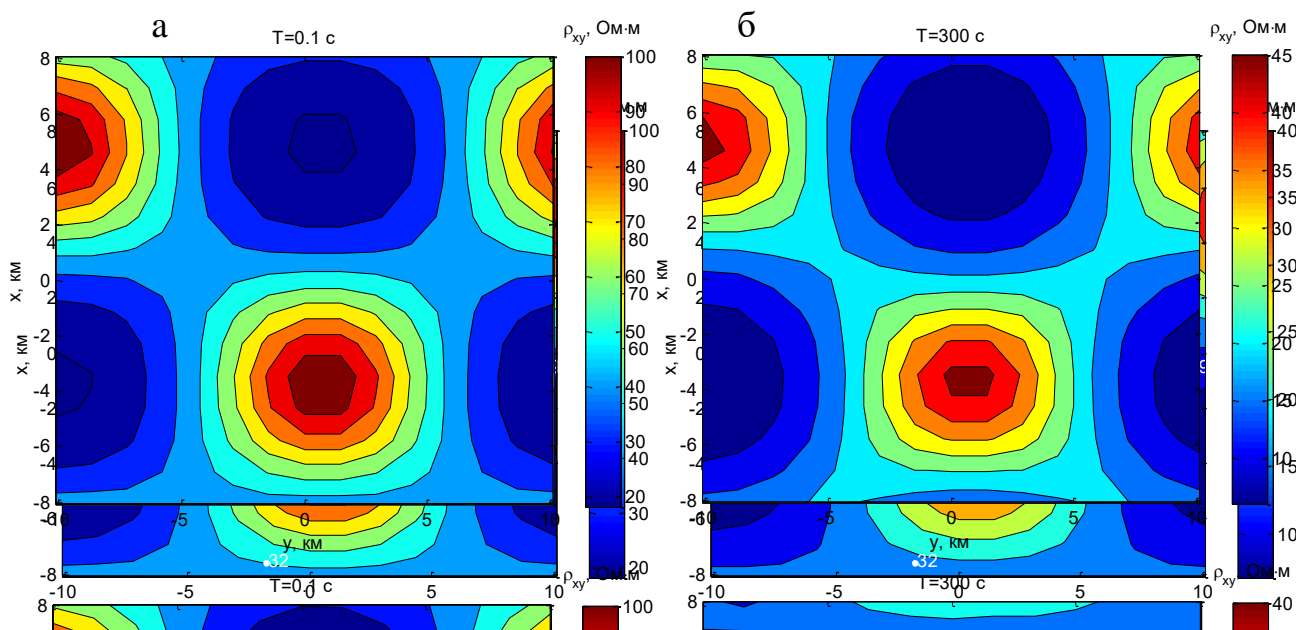


Рис. 1. Латеральное распределение удельных сопротивлений в тестируемой модели 3D-среды (расположение пунктов МТЗ показано белым цветом)

Fig. 1. Lateral resistivity distribution in the 3D medium model under test (MTS locations shown in white)

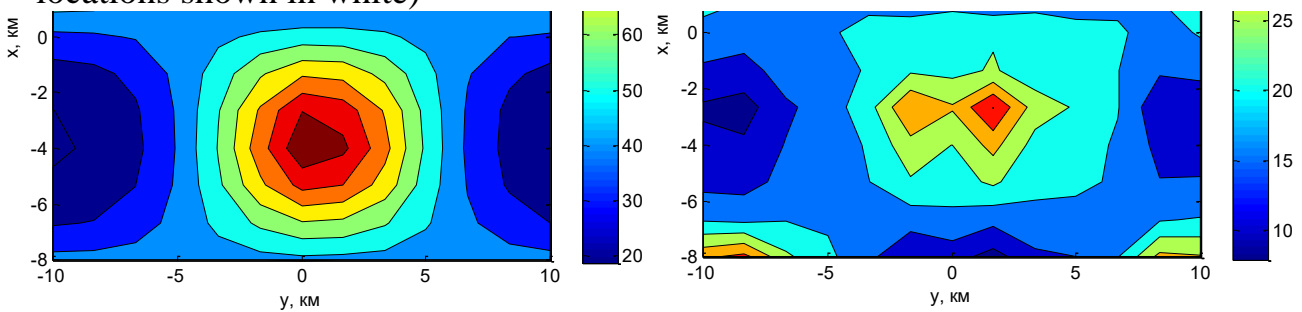


Рис. 2. Распределения кажущихся сопротивлений  $\rho_{xy}$  для двух периодов по расчетам без (а, б) и с применением (в, г) декомпозиции расчетной области

Fig. 2. Distribution of apparent resistivities  $\rho_{xy}$  for two periods according to calculations without (а, б) and using (в, г) decomposition of the calculation region

Были проведены расчеты поля для указанной модели среды на одной и той же сетке без применения и с использованием декомпозиции расчетной области. Для

сравнения результатов после 8 итераций на рис. 2 показаны полученные латеральные распределения  $\rho_{xy}$ , а на рис. 3 кривые кажущихся сопротивлений. Глобальная сетка взята с разбиением области по горизонтальным осям координат на  $13 \times 13$  параллелепипедов (это позволяет выполнять оба варианта расчетов на одном и том же компьютере). Субдомены содержат по  $5 \times 5$  упомянутых параллелепипедов. Данное разбиение применяется в каждом из слоев 3D-модели среды. При декомпозиции расчетной области выполняются смещения субдомена на 2 параллелепипеда (соответственно наложение их друг на друга составляет 3 параллелепипеда).

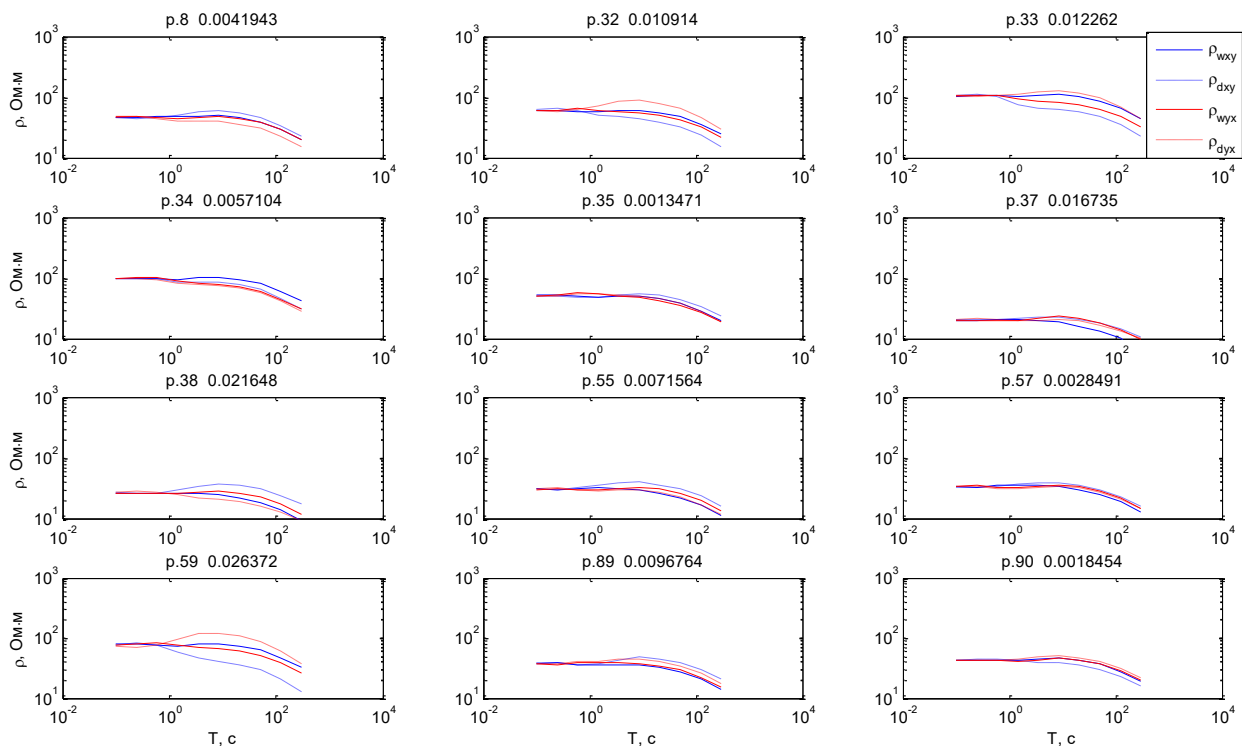


Рис. 3. Кривые кажущихся сопротивлений в пунктах МТЗ по расчетам без ( $\rho_{wxy}$ ,  $\rho_{wyx}$ ) и с применением ( $\rho_{dxy}$ ,  $\rho_{dyx}$ ) декомпозиции расчетной области (указаны номера пунктов и относительная погрешность расчетов)

Время счета варианта без декомпозиции на субдомены с использованием разреженных матриц в Матлабе составило 5 часов, без разреженных матриц 23 минуты. Наконец, без разреженных матриц, но с применением декомпозиции расчетной области время счета 15 минут на 8 итераций. Следует подчеркнуть, что вариант декомпозиции расчетной области позволяет на компьютере с той же памятью при расчетах существенно увеличить ее размеры по горизонтали. На рис. 4. отражена сходимость итераций при декомпозиции расчетной области. Представлены изменения (в относительных единицах) различных компонент

поля во всех точках полигона на земной поверхности при обеих независимых поляризациях первичной волны. Можно утверждать, что процесс сходится, но его скорость зависит от соотношения параметров субдоменов и их смещений с размерами области влияния 3D-неоднородности в заданной модели среды. Для сравнения на рис. 5 представлены изменения сходимости итераций и распределения кажущихся сопротивлений при расчетах с другими параметрами субдоменов и их смещений. С увеличением размерности субдомена время счета увеличивается. При размере субдомена 11x11 и смещении на 2 шага расчетное время 265 минут.

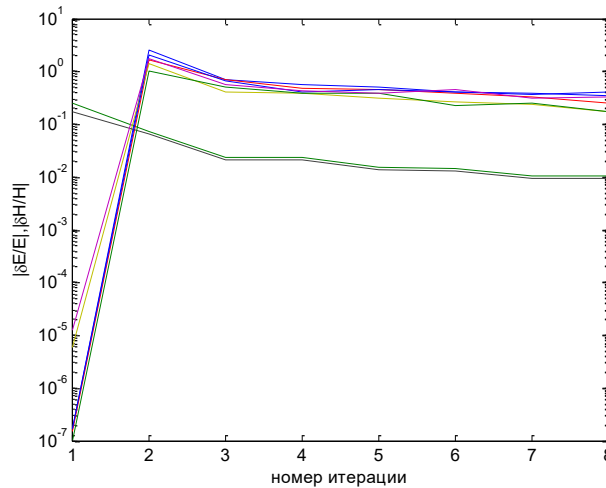


Рис. 4. Относительная погрешность расчетов различных компонент поля для 2-х поляризаций первичной волны в зависимости от номера итераций

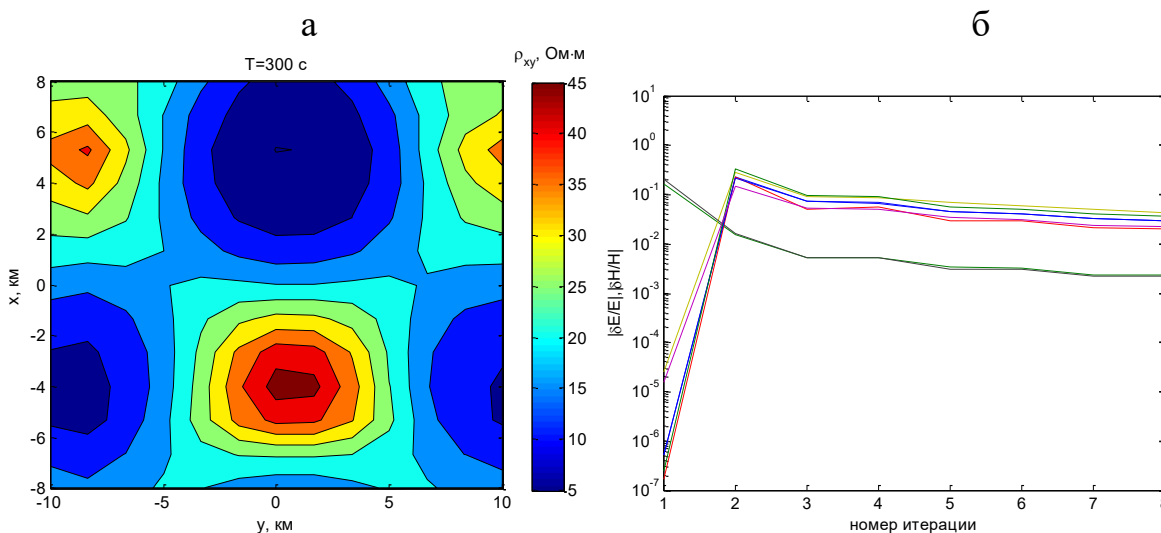


Рис. 5. Относительная погрешность расчетов различных компонент поля для двух поляризаций первичной волны в зависимости от номера итераций (а) и распределение кажущихся сопротивлений  $\rho_{xy}$  (б) с применением декомпозиции расчетной области, субдомен 11x11, смещение на 2 шага

Как видно из распределений, приведенных на рис. 2, для периода  $T=0.1$  с карты кажущихся сопротивлений совпадают с хорошей точностью. Это также видно по поведению кривых кажущихся сопротивлений на коротких периодах во всех выбранных пунктах МТЗ, приведенных на рис. 3. Однако для периода  $T=300$  с можно говорить о совпадении распределений и кривых кажущихся сопротивлений лишь в общих чертах. Это связано с соотношением параметров субдоменов и их смещений с размером области влияния 3D-неоднородности. В частности, с увеличением размерности субдомена до  $11 \times 11$  при смещении в 2 шага сходство карт кажущихся сопротивлений для периода  $T=300$  с лучше (сравни рис. 2б и рис. 5б), существенно уменьшаются и погрешности в расчетах кривых кажущихся сопротивлений (рис 6).

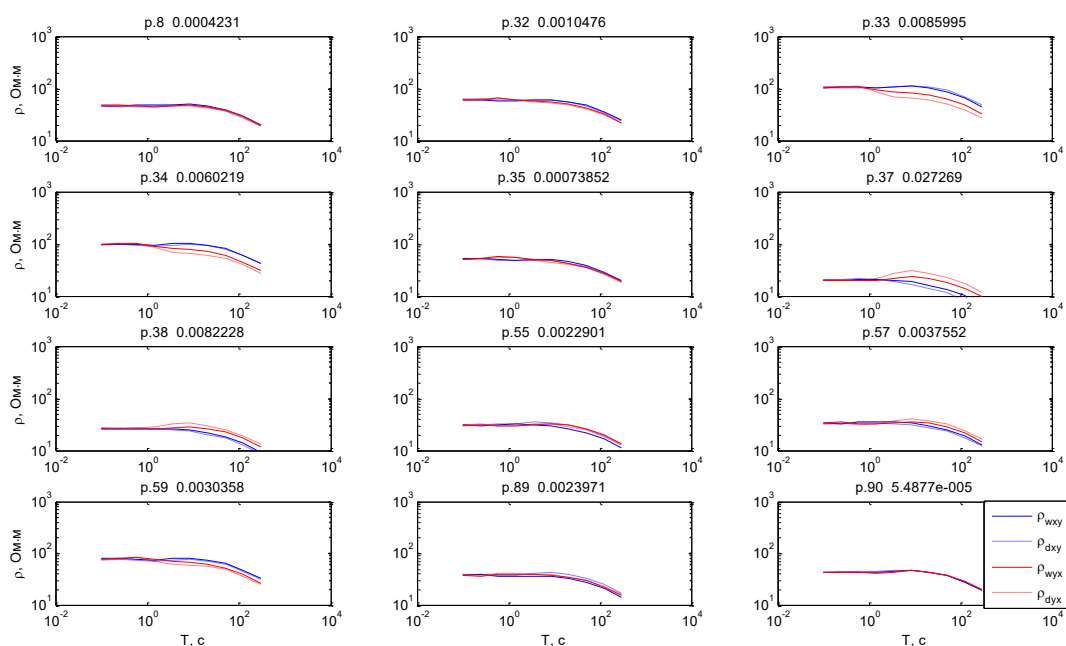


Рис. 6. Кривые кажущихся сопротивлений в пунктах МТЗ по расчетам без ( $\rho_{wxy}$ ,  $\rho_{wyx}$ ) и с применением ( $\rho_{dxy}$ ,  $\rho_{dyx}$ ) декомпозиции расчетной области (указаны номера пунктов и относительная погрешность расчетов), субдомен  $11 \times 11$ , смещение на 2 шага

### Заключение

Таким образом, применяя метод декомпозиции расчетной области, можно свести решение прямой задачи МТЗ для полигона больших размеров к расчетам нескольких задач меньшей размерности. Это уменьшает требования к памяти компьютера, но требует увеличения времени всех расчетов.

*Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0015.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 668 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. – 320 с.
3. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. – 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 15-26.
4. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 7. – С. 1381-1390.
5. Xiong Z. Domain decomposition for 3D electromagnetic modeling // Earth Planets Space. – 1999. – V. 51. – P. 1013-1018.

## REFERENCES

1. Berdichevskyi M.N., Dmitriev V.I. Modeli i metody magnitotelluriki. – M.: Nauchnyi mir, 2009. – 668 s.
2. Zhdanov M.S. Elektrorazvedka. – M.: Nedra, 1986. – 320 s.
3. Egorov I.V. Metod Treffca dlya resheniya trexmernykh pryamykh i obratnykh zadach geoel-ektriki // Fizika Zemli. – 2011. T. 47. – № 2. – S. 15-26.
4. Plotkin V.V., Gubin D.I. Uchet pripoverhnostnykh neodnorodnostei nad gorizonta-  
l'no sloistym razrezom pri magnitotelluricheskom zondirovanii // Geologiya i geofizika. – 2015. – T. 56. – № 7. – S. 1381-1390.
5. Xiong Z. Domain decomposition for 3D electromagnetic modeling // Earth Planets Space. – 1999. – V. 51. – P. 1013-1018.

© В. В. Плоткин, 2021