

В. В. Плоткин^{1}*

Применение метаэвристического метода инверсии кривых магнитотеллурического зондирования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для изучения неоднородных глубинных структур электропроводности Земли. Сведения о них получаются в ходе решения обратной задачи, которая, как и любая такая задача, является неустойчивой. Под неустойчивостью обратной задачи понимают тот факт, что изменения отклика среды могут быть весьма малыми даже при ее существенных изменениях. Наличие шумов и аппаратных ограничений в экспериментах МТЗ сказывается на величине погрешностей измерений и увеличивает область эквивалентности решений обратной задачи. При численных расчетах тестовой обратной задачи, когда модель среды известна, возможны алгоритмы точного ее решения, так как область эквивалентности при численных расчетах связана с ошибками вычислений, гораздо меньшими погрешностей измерений. В этой связи рассматривается применение для инверсии кривых МТЗ метода MRFO (Manta Ray Foraging Optimization) - метаэвристического алгоритма, основанного на математических моделях природных явлений и биологических систем.

Ключевые слова: магнитотеллурика, зондирование, обратная задача, метаэвристический алгоритм

V. V. Plotkin^{1}*

Applying Metaheuristic Method for Inversion of Magnetotelluric Sounding Curves

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Magnetotelluric sounding (MTS) is used to study heterogeneous deep structures of the Earth's electrical conductivity. Information about them is obtained during the solution of the reverse problem, which, like any such problem, is unstable. The instability of the inverse problem is understood as the fact that changes in the response of the medium can be very small even with its significant changes. The presence of noise and hardware limitations in MTS experiments affects the value of measurement errors and increases the area of equivalence of inverse problem solutions. With numerical calculations of the test inverse problem, when the medium model is known, algorithms for its exact solution are possible, since the equivalence area for numerical calculations is associated with calculation errors much less than measurement errors. In this regard, the use of the MRFO (Manta Ray Foraging Optimization) method, a metaheuristic algorithm based on mathematical models of natural phenomena and biological systems, is being considered for inversion of MTP curves.

Keywords: magnetotelluric, sounding, inverse problem, metaheuristic algorithm

Введение

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) применяется для изучения неоднородных глубинных структур электропроводности Земли [1, 2]. Сведения о них получаются в ходе решения обратной задачи, которая, как и любая такая задача, является неустойчивой. Поэтому возможно появление эквивалентных решений, существенно отличающихся друг от друга, однако соответствующих весьма малым невязкам исходных и модельных кривых МТЗ.

В то же время известно, что решение прямой задачи при заданной модели среды и правильно поставленных условиях на границах изучаемого ее объема является единственным. Отсюда следует, что и регистрируемый отклик среды на воздействие источника электромагнитного поля является уникальным. Тем не менее, под неустойчивостью обратной задачи понимают весьма малые отличия откликов среды даже при ее существенном изменении.

Наличие шумов и аппаратурных ограничений в экспериментах МТЗ сказывается на величине погрешностей измерений и увеличивает область эквивалентности решений обратной задачи. Однако при численных расчетах тестовой обратной задачи, когда модель среды известна, представляют интерес алгоритмы точного ее решения, так как область эквивалентности при численных расчетах связана с ошибками вычислений, гораздо меньшими погрешностей измерений. В данной работе рассматривается один из таких алгоритмов, ранее не применявшихся в практике МТЗ.

Метаэвристический метод инверсии кривых МТЗ

Для решения обратной задачи МТЗ применяют разные методы [1]. Но насколько известно автору, методы на базе метаэвристических алгоритмов, используемые, когда целевые функции имеют множество локальных пиков, ранее в приложении к МТЗ не применялись. Указанные алгоритмы основаны на математических моделях природных явлений и биологических систем.

В работе [3] базой подобного алгоритма выбрано поведение популяции морских скатов манта во время кормления. Поэтому алгоритм назван MRFO (Manta Ray Foraging Optimization). В качестве популяции вводится семейство искомым моделей среды и анализируется коллективное поведение.

Алгоритм включает три варианта оптимизации: коллективное поведение роя особей - поведение самоорганизующихся естественных систем; алгоритм спиральной оптимизации – многоточечного поиска, в котором точки поиска следуют траекториям логарифмической спирали к общему центру, определяемому как текущая наилучшая точка; алгоритм скачков между текущей позицией и ее симметричным отражением относительно лучшей позиции, найденной до сих пор.

Детали алгоритмов более подробно приведены в [3]. Мы использовали программу авторов на языке МатЛаба, доступную через интернет по ссылке:

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73130-manta-ray-foraging-optimization-mrfo>.

Существенно, что в этом методе оптимизации модели среды не нужно задавать стартовую модель, поскольку одновременно производится поиск как локальных минимумов, так и глобального минимума целевого функционала. Требуется указать лишь коридор возможных значений искомых параметров x_k , используемых для описания модели среды.

Метод MRFO применим для оптимизации 1D, 2D и 3D моделей среды по данным одного или нескольких пунктов МТЗ. Для конкретности следует задать нужный вариант расчетов прямой задачи и целевого функционала Φ . В 3D случае расчеты кривых МТЗ выполнялись по методу Треффца [4, 5]. Используемые функционалы Φ суммы всех невязок для модовых [6, 7] или для стандартных [1, 2] кривых рассчитывались по следующим формулам:

$$\Phi = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{11} - \ln \rho_{11}^0}{\ln \rho_{11}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{22} - \ln \rho_{22}^0}{\ln \rho_{22}^0} \right|_k^2 \right),$$

$$\Phi = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{xy} - \ln \rho_{xy}^0}{\ln \rho_{xy}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{yx} - \ln \rho_{yx}^0}{\ln \rho_{yx}^0} \right|_k^2 \right),$$

где K – количество всех учитываемых периодов и пунктов МТЗ, $\rho_{11,22}$, $\rho_{11,22}^0$ – модовые кажущиеся сопротивления для текущей и исходной модели среды соответственно, и $\rho_{xy,yx}$, $\rho_{xy,yx}^0$ – стандартные кажущиеся сопротивления для текущей и исходной модели среды соответственно. Заметим, что модовые кажущиеся сопротивления связаны с импедансными соотношениями между амплитудами волн с правой и левой круговой поляризацией, вводимыми по аналогии со стандартными кажущимися сопротивлениями для импедансных соотношений между декартовыми компонентами поля.

Результаты и их обсуждение

Для примера приведем сначала результаты инверсии кривых МТЗ для простой модели, состоящей из двух слоев - верхнего слоя толщиной 2.4 км и удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 30 Омм и подстилающей среды с УЭС 5 Омм. Инверсия кривых МТЗ выполнялась для моделей среды с разным количеством слоев. Расчеты кажущегося сопротивления слоистой среды проводились по известной формуле [1]. Так как при использовании метода MRFO стартовая модель не нужна, задавались лишь ограничения возможных значений УЭС в диапазоне 1-50 Омм, толщин слоев – 1-50 км. Оказалось, что все найденные модели среды совпадают с исходной моделью, если количество слоев над подстилающей средой увеличивалось от 1 до 4. Менялось лишь количество итераций с тенденцией их увеличения от 100 до 2000 для достижения невязок порядка вычислительных погрешностей $\sim 10^{-16}$. Во всех случаях УЭС подстилающей среды и нижних слоев равно 5 Омм, а УЭС самого верхнего слоя – 30 Омм. Толщина верхнего слоя совпадала с исходной 2.4 км, но толщины нижних слоев изменялись в пределах заданных ограничений в диапазоне 1-50 км. Поскольку их

УЭС также равно 5 Омм, все эти модели полностью совпадают с исходной средой.

При дальнейшем увеличении количества слоев оптимизация методом MRFO приводила уже к эквивалентным моделям среды с малыми невязками исходных и модельных кривых $\sim 10^{-13}$ - $\sim 10^{-10}$. В этих моделях либо УЭС нижних слоев оказывалось близким, но не равным 5 Омм, либо среди них появлялся слой с УЭС близким к 30 Омм.

Приведем также результаты численных экспериментов с 3D моделью среды. В методе Треффца модель представляется набором параллелепипедов, в которых электропроводность однородна. Взятая для расчетов 3D модель среды показана на рис. 1. Эту модель можно описать вектором, координаты которого x_k соответствуют ее параметрам в определенном порядке. Сначала идут параметры $x_k = \ln \sigma_k$, где σ_k - значения электропроводностей в однородных параллелепипедах трех верхних латерально неоднородных слоев. Нумерация параллелепипедов, обозначенных на рис. 1 точками белого цвета, начинается с левого нижнего угла верхнего слоя ρ_1 и продолжается последовательно слева направо и вверх до правого верхнего угла этого слоя. Как видно, каждый слой представлен 25 параллелепипедами.

Далее аналогично нумеруются параллелепипеды в нижележащих слоях ρ_2 и ρ_3 . Всего для модели 3D-среды на рис. 1 получается 75 таких параметров. Затем следуют параметры $x_k = \ln h_k$, где h_k - толщины неоднородных слоев (снизу вверх), параметры $x_k = \ln \sigma_k$, где σ_k - значения электропроводностей двух однородных подстилающих слоев (сверху вниз), и последний параметр $x_k = \ln h_k$, где h_k - толщина верхнего из этих подстилающих слоев (всего 81 параметр). Все параметры 3D-среды положительные, так как $e^{x_k} > 0$.

На рис. 2 для примера приведены рассчитанные методом Треффца для данной 3D модели среды стандартные $\rho_{xy}(\omega)$ и $\rho_{yx}(\omega)$, а также модовые кривые $\rho_{11}(\omega)$ и $\rho_{22}(\omega)$ кажущегося сопротивления в нескольких пунктах МТЗ (их положение показано на рис. 1), которые использовались как входные данные для обратной задачи. Можно отметить, что модовые кривые в отличие от стандартных практически не отличаются друг от друга. Видны смещения стандартных кривых по оси ординат относительно друг друга (гальванические искажения), вызванные возбуждением электростатических полей в латеральных неоднородностях. В то же время на модовых кривых гальванические смещения практически не заметны, что вызвано характером возбуждения электростатического поля в латеральной неоднородности при воздействии на нее волны с круговой поляризацией (направления вращения вектора электрического поля для эффекта не существенны).

Методом MRFO была выполнена инверсия кривых МТЗ. Считалось, что в соответствии с априорной информацией: заданы коридоры возможных значений УЭС и толщин слоев, латеральные неоднородности находятся в трех верхних слоях и локализованы вблизи пунктов МТЗ (п.п. 8, 12-14 и 18, рис. 1). Приведем результаты для случая анализа кривых МТЗ этих пунктов.

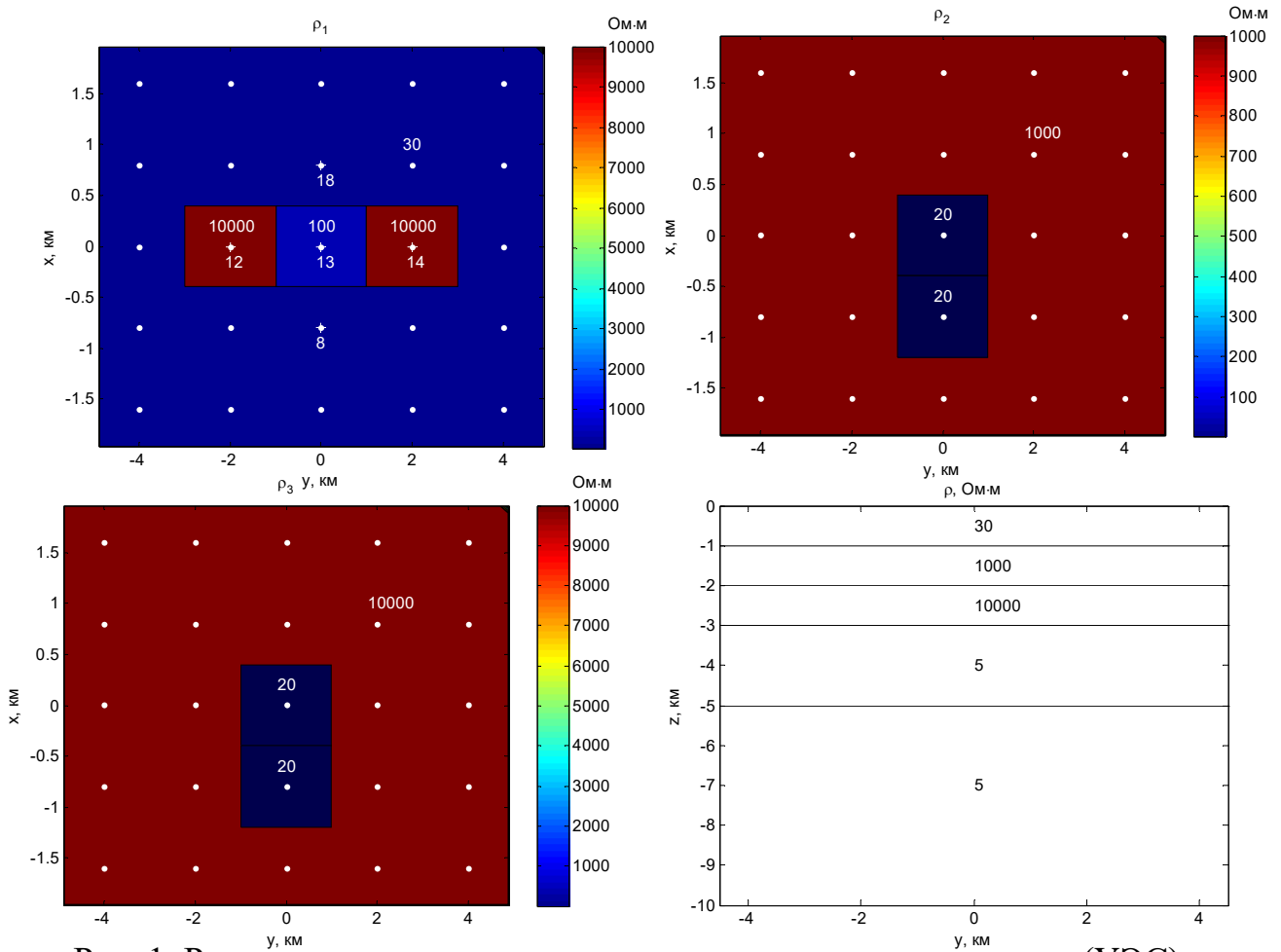


Рис. 1. Распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) в трех верхних латерально неоднородных слоях (центры параллелепипедов показаны точками белого цвета, пункты МТЗ отмечены крестиками, номера пунктов указаны цифрами ниже крестиков) и глубинный геоэлектрический разрез фоновой среды

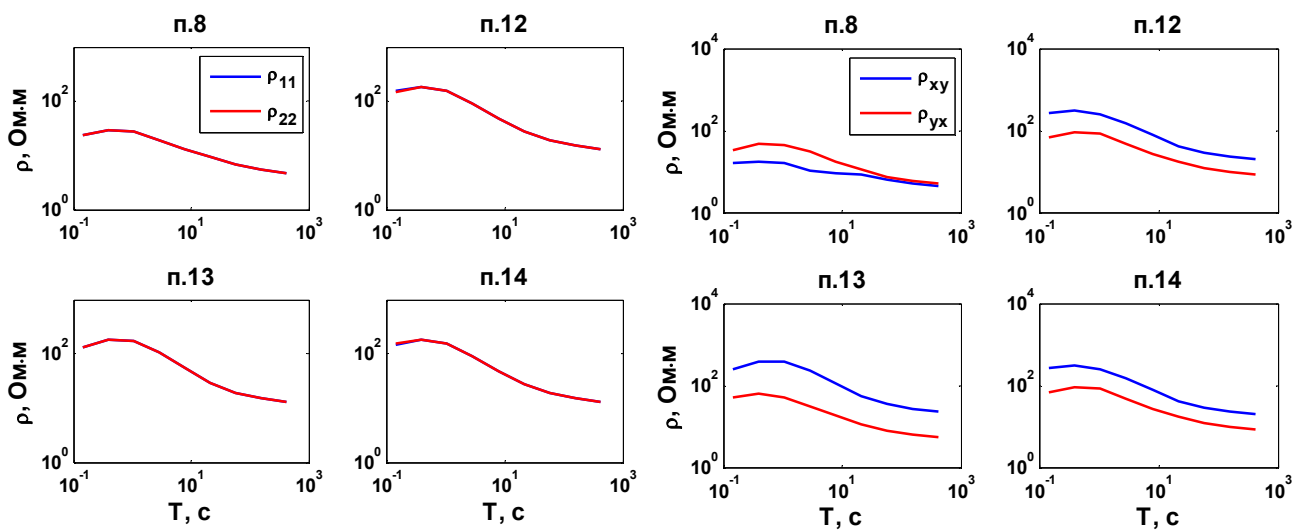


Рис. 2. Модовые (слева) и стандартные (справа) кривые кажущегося сопротивления в некоторых пунктах МТЗ, рассчитанные методом Треффца для модели 3D-среды (рис. 1)

С учетом приведенной априорной информации количество параметров x_k , описывающих 3D модель, сокращается до 23. Это фоновые значения УЭС в 3 слоях, $5 \times 3 = 15$ значений УЭС под 5 пунктами, 3 толщины слоев, значения УЭС в двух подстилающих слоях и 1 толщина верхнего подстилающего слоя; задание 2 подстилающих слоев с равным УЭС вызвано особенностями кода. Значения УЭС задаются последовательно для трех неоднородных слоев - по 6 параметров x_k сверху вниз, далее следуют три толщины слоев и 2 параметра подстилающей среды. При расчетах методом MRFO в целевом функционале Φ учитывались невязки по относительной величине только модовых кривых. Как оказалось, после 200 итераций значения $\Phi \leq 10^{-5}$, а после 500 итераций упали до значений $\Phi \sim 10^{-6}$. На рис. 3 показаны модели среды, полученные методом MRFO через каждые 50 после 200 итераций (при $\Phi \leq 10^{-5}$, кривые красного цвета, для сравнения показана также исходная модель $\Phi=0$).

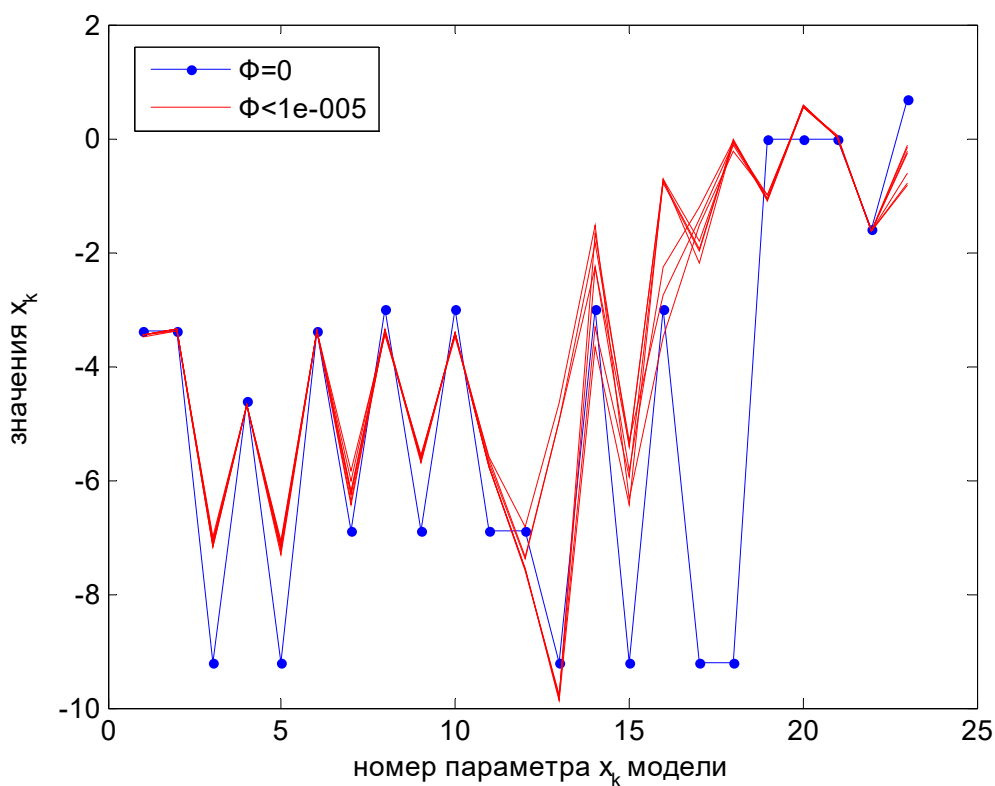


Рис. 3. Модели 3D среды, полученные методом MRFO (кривые красного цвета). Исходная модель среды отображена кривой $\Phi = 0$

Все полученные модели среды заметно отличаются от исходной. С учетом малости достигнутых невязок модельных и входных кривых МТЗ, эти модели можно назвать эквивалентными. Попасть в точку глобального минимума Φ и получить исходную 3D-модель среды в данном случае не удалось. Это обусловлено тем, что процесс закончился в одном из локальных минимумов Φ . Полученные модели могут быть использованы в качестве стартовых для оптимизации другими методами. Тем не менее, видно, что наиболее неустойчивы значения x_k ,

относящие к нижнему латерально неоднородному слою, соответствующие контрастным значениям УЭС ρ_3 в нижнем слое (п.п. 8, 12, 14 и 18, рис. 1). Дело в том, что более глубокие слои влияют на отклик среды с понижением частоты и увеличением толщины скин-слоя. Из-за диффузионного характера поля разрешающая способность МТЗ в отношении контрастных изменений УЭС падает. Это ведет к неустойчивости определения указанных параметров x_k . Определяя границы интервала значений x_k , в котором невязки сравнимы с погрешностями входных (экспериментальных) данных, можно определить область эквивалентных решений обратной задачи.

Заключение

Метод MRFO (Manta Ray Foraging Optimization) применим для инверсии кривых МТЗ и оптимизации 1D, 2D и 3D моделей среды по данным одного или нескольких пунктов МТЗ. При инверсии кривых МТЗ для 1D моделей метод MRFO позволяет определить наименьшее необходимое количество их слоев. Для 3D сред он помогает найти стартовые модели для последующей оптимизации другими методами, а также выявить неустойчиво определяемые в процессе инверсии параметры искомой модели 3D среды и по результатам установить границы области эквивалентных решений обратной задачи.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0025.

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. Zhao W., Zhang Z., Wang L. Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications // Engineering Applications of Artificial Intelligence. - 2020. - V. 87.- P. 103300.
4. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. - 2011. - Т. 47. - № 2. - С. 15-26.
5. 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.
6. Плоткин В.В., Потапов В.В. Оценки холловской проводимости по данным магнитотеллурического зондирования // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 817-828.
7. Plotkin V.V., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Role of Hall Effect in Magnetotelluric Sounding // Problems of Geocosmos-2018: Proceedings of the XII International Conference and School (St. Petersburg, Petrodvorets, October 08-12, 2018), Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – 2020. - P. 19-27.

© В. В. Плоткин, 2023