

УДК 550.837.211

*Н.С. Голубцова*<sup>^1</sup>, *М. Израиль*<sup>^2</sup>, *П.Ю. Пушкарев*<sup>^1</sup>, *М.Ю. Смирнов*<sup>^3</sup>,  
*Е.Ю. Соколова*<sup>^4</sup>

## ПЕРВЫЙ ОПЫТ ТРЁХМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ГАРВАЛЬСКИХ ГИМАЛАЯХ<sup>1</sup>

**Аннотация.** Крупнейшая горная система Гималаев сформировалась при поддвиге Индостанской тектонической плиты под Евразийскую и характеризуется повышенной сейсмической активностью. Изучение модели сейсмогенерации требует проведения комплекса глубинных геофизических исследований. МТ/МВ зондирования выполнены в Гарвальских Гималаях (северная Индия). 2D инверсия МТ данных показала их высокую информативность по отношению к региональным коровым структурам. Однако анализ МВ откликов выявил 3D эффекты, по-видимому, обусловившие некоторые артефакты профильной инверсии МТ данных. Результаты 2D инверсии по профилю Рурки-Ганготри по программе Ив. М. Варенцова верифицированы региональными сейсмологическими данными. Представлена прогнозная 3D геоэлектрическая модель региона, составленная с помощью программы R. Mackie, а также предварительные результаты 3D инверсии данных зондирования с использованием кодов W. Siripunvaraporn и G. Egbert, A. Kelbert.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, трёхмерная инверсия, Гималаи/

### Об авторах:

<sup>^1</sup> Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва.

<sup>^2</sup> Индийский институт технологий Рурки, Индия.

<sup>^3</sup> Университет Оулу, Финляндия.

<sup>^4</sup> Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва.

*N.S. Golubtsova, M. Israel, P.Yu. Pushkarev, M.Yu. Smirnov, E.Yu. Sokolova*

## FIRST EXPERIENCE OF THREE-DIMENSIONAL INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURIC DATA, OBTAINED IN GARHWAL HIMALAYA

**Abstract.** The largest mountain system of Himalaya created by the subduction of Indian tectonic plate beneath Eurasian is characterized by high seismic activity. MT/MV soundings were performed in Garhwal Himalaya (Northern India). 2D MT data inversion results demonstrated good resolution of the regional crustal structures. However, MV responses analysis revealed 3D effects, probably causing some artifacts of profile MT data inversion results. We present the results of 2D inversion using Iv.M. Varentsov's program along Roorki-Gangotri profile in comparison with seismologic data, as well as 3D resistivity forecast model of the region, obtained using R. Mackie's program, and preliminary results of 3D inversion obtained using program of W. Siripunvaraporn program and program by G. Egbert u A. Kelbert.

**Keywords:** magnetotelluric sounding, 3D inversion, Himalaya.

Гималаи представляют собой крупнейшую горную систему, формирующуюся в ходе коллизии тектонических плит с погружением Индостанской плиты под Евразийскую и об-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-05-92661\_Инд и 13-05-9269\_Инд, а также DST (Индия)

разованием гигантских надвигов. Гарвальские Гималаи расположены на севере Индии, в штате Уттаракханд. С целью изучения их глубинного строения и сейсмологического прогноза применяется комплекс геофизических исследований, включающий магнитотеллурические и магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования. Большая их часть выполнена Индийским институтом технологий Рурки. Основу сети наблюдений составляет профиль от города Рурки до ледника Ганготри (рис. 1). Ежегодно выполняется несколько новых зондирований, постепенно создаётся площадная сеть наблюдений.

Точки МТ/МВ зондирований показаны на рис. 1 серыми кружками с номерами. Профиль Рурки-Ганготри начинается в Индо-Гангской равнине (Indo-Gangetic Plain, IGP) и на своём пути пересекает несколько геологических структур, надвинутых друг на друга с северо-востока. Первая, Сивалик (Siwalik), представляет собой предгорье Гималаев и ограничена с юга Гималайским фронтальным надвигом (Himalayan Frontal Thrust, HFT), а с севера – Главным граничным надвигом (Main Boundary Thrust, MBT). И в предгорном прогибе Индо-Гангской равнины, и в Сивалике верхние несколько километров сложены неогеновой молассой. Далее на северо-восток, вплоть до зоны Главного Центрального надвига (Main Central Thrust, МСТ), которая в районе профиля ограничена двумя взбросами МСТ\_1 и МСТ\_2, расположены Низкие Гималаи (Lesser Himalaya), в основном сложенные эпизонально-метаморфизованным верхним докембрием. Заканчивается профиль в Высоких Гималаях (High Himalaya), образованных главным образом докембрийскими кристаллическим сланцами и гнейсами, а также неогеновыми гранитоидами.

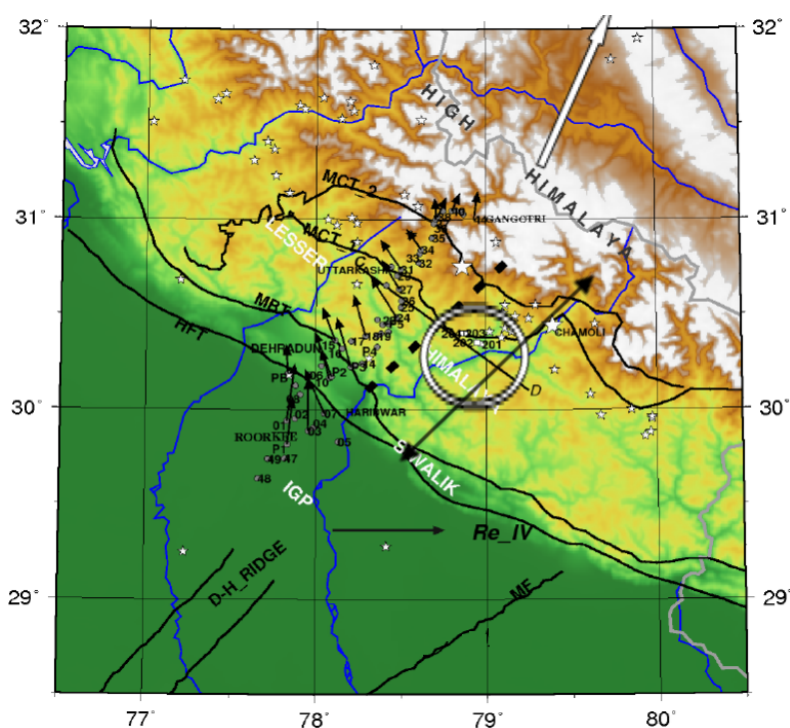


Рис. 30. Точки МТЗ на физической карте изучаемого района. Обозначения рассмотрены в тексте

Малыми звёздами на рис. 1 показаны эпицентры землетрясений Гималайского сейсмического пояса (в данном регионе – Гарвальского сейсмического коридора) с магнитудами  $M_b > 3$ , а большими звёздами – эпицентры последних крупнейших землетрясений – Чамоли (Chamoli,  $M_b = 6.3$ , 1999 г.) и Уттаркаши ( $M_b = 6.8$ , 1991 г.). Чёрная линия со стрелками на концах отвечает профилю сейсмотомографии, результаты с которого использовались при комплексной интерпретации.

В результате 2D инверсии МТ/МВ данных по профилю Рурки-Ганготри с помощью программы Ив.М. Варенцова [1] был построен геоэлектрический разрез до глубины 50 км (рис. 2). На разрез из полосы 75 км вокруг профиля спроецированы гипоцентры землетрясений  $M_b > 3$  (большие звёзды) и локальная сейсмичность (малые звёзды). Здесь же представлена геоэлектрическая интерпретация положения основных структурно-тектонических линий: пунктиром показаны предположительные поверхности надвигов НФТ, МВТ, МСТ1, МСТ2. Они выполаживаются с глубиной и смыкаются с обозначенным сплошной линией Главным гималайским надвигом (Main Himalayan Thrust, МНТ), который является кровлей погружающейся Индостанской плиты.

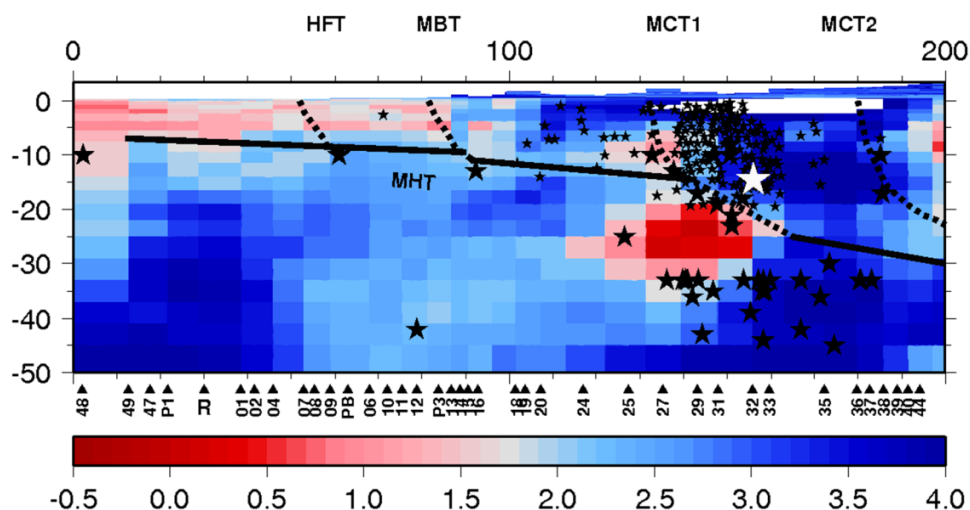


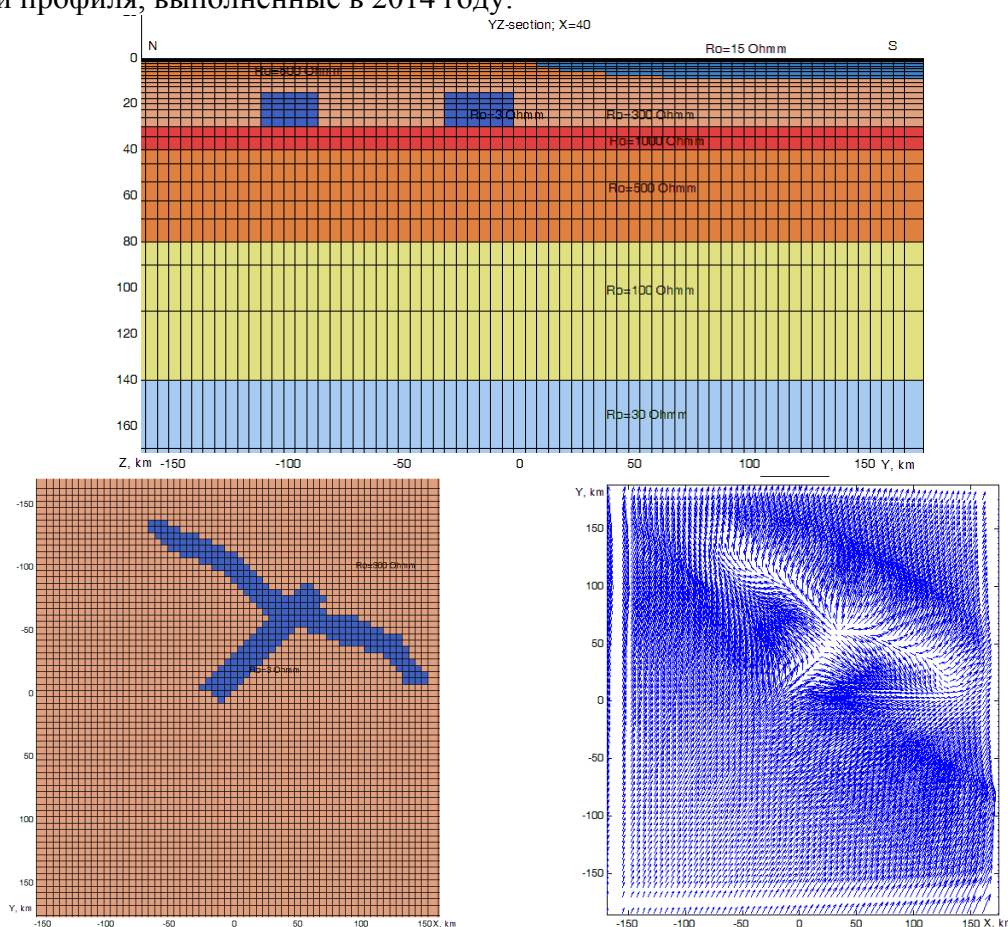
Рис. 31. Геоэлектрический разрез по профилю Рурки-Ганготри (с юго-запада на северо-восток). Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Обозначения рассмотрены в тексте

Наиболее яркие аномалии пониженного сопротивления и повышенной сейсмичности приурочены к области МСТ1, где предполагается увеличение угла погружения МНТ (т. н. рамповая структура). Зоны повышенной сейсмичности в теле надвига и в нижней коре разделены среднекоревым проводником. Его положение совпадает с зоной пониженных скоростей в образах сейсмотомографии [2, 3], что свидетельствует о единой флюидной природе этих аномалий и верифицирует профильные результаты обоих методов при изучении региональных глубинных структур Гималаев на материалах Гарвала.

Однако в геоэлектрическом образе зоны подвига Индийской плиты, полученном по результатам МТ инверсии по линии Рурки-Ганготри, содержатся и артефакты, обусловленные влиянием проводящих структур вне профиля и требующие дополнительного анализа. Вернёмся к рис. 1. На нём в пунктах МВ наблюдений показаны индукционные стрелки (в конвенции Визе) на периоде 725 с в масштабе, заданном единичным вектором  $Re_{IV}$ . В центре профиля стрелки смотрят почти поперёк линии профиля, демонстрируя, что к юго-востоку от профиля располагается мощный проводник. Он проявляется понижением сопротивления на средне-нижнекоревых глубинах под Малыми Гималаями в 2D модели (рис. 2). О существовании этой проводящей структуры – Транс-Гималайского проводника (Trans-Himalayan Conductor, ТНС), выделенного по результатам более ранних МТ/МВ исследований, – было впервые сказано в [4]. На рис. 1 предположительное положение его оси показано пунктирной линией. Геологические структуры, перпендикулярные оси Гималаев, в регионе известны, к ним относятся показанные на рис. 1 хребет Дели-Харидвар (Dehli-Haridwar Ridge, D-H Ridge) и Морадабадский разлом (Moradabad Fault, MF).

Очевидно, что региональную геоэлектрическую модель Гарвала необходимо строить в трёхмерном варианте. Прежде всего для этого требуется наращивать сеть

наблюдений. Линии С-D на рис. 1 отвечает запланированный новый профиль МТ зондирований. В области, выделенной окружностью, белыми квадратами показаны первые 4 точки профиля, выполненные в 2014 году.



**Рис. 32.** Прогнозная геоэлектрическая модель Гарвальских Гималаев. Вверху – разрез модели в плоскости  $x = 40$  км (с севера на юг), внизу слева – карта на глубине  $z = 15$  км, справа – карта индукционных стрелок, рассчитанных на периоде 1000 секунд

Также начата работа по построению 3D моделей с использованием программ решения прямых и обратных задач. С помощью программы R. Maskie [5] изучен ряд моделей разной сложности, последняя из которых представлена на рис. 3. Она включает в себя слой осадков, мощность которого меняется по площади от 0 до 9 км, подстилаемый слоистым разрезом с характерными для Индийской плиты параметрами, а также два коровых проводника: МСТ1 и ТНС. Модельные МТ/МВ данные отражают основные особенности наблюдаемых данных на профиле Рурки-Ганготри.

3D инверсия выполнена с помощью двух программ, при этом использовались 4 компоненты тензора импеданса, стартовой моделью являлся слоистый разрез, тот же, что и в рассмотренной выше прогнозной модели. В качестве примера результатов, полученных по программе W. Siripunvaraporn [6], на рис. 4 показана карта сопротивления на глубине 22 км. Детальность модели невысока, однако достаточно отчетливо выделяются два квазилинейных проводящих объекта СЗ и СВ простираний (предполагаемые проводники МСТ1 и ТНС соответственно). По программе G. Egbert и A. Kelbert [7] первый результат получился ещё более сглаженным (рис. 5), но положение максимумов проводимости коррелирует с представленным на рис. 4. Первые результаты 3D инверсии будут уточняться с использованием расширенных наборов данных и более оптимальных параметров программ инверсии.

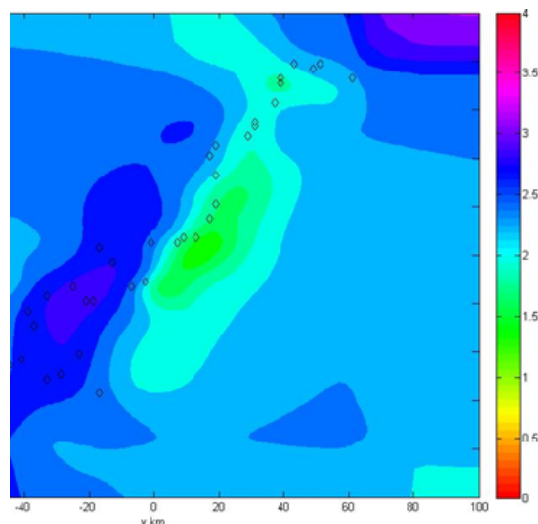


Рис. 33. Карта сопротивления на глубине 22 км, полученная при 3D инверсии по программе [3]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Ромбами показаны точки наблюдения

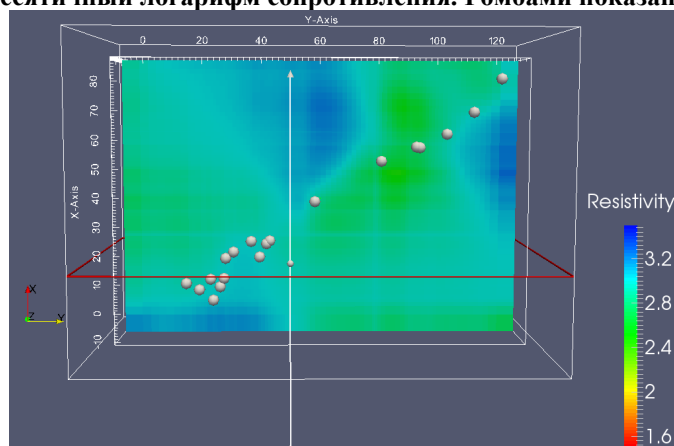


Рис. 34. Карта сопротивления на глубине 20 км, полученная при 3D инверсии по программе [4]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Кружками показаны точки наблюдения

Авторы признательны П. Гупте, Ив.М. Варенцову, А.В. Кошурникову, М.В. Череватовой и Т.А. Егоровой за их вклад в МТ/МВ исследования Гарвальских Гималаев.

### Библиографический список

1. *Varentsov Iv.M.* Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40, Ed. V.V. Spichak). Elsevier, 2007. – P. 189–222.
2. *Caldwell W.B., Klemperer S.L., Rai S.S., Lawrence J.F., Ashish.* Characterizing the Main Himalaya Thrust in the Garhwal Himalaya, India with receiver function CCP stacking. E.P.S. Lett., 2013, 367. – P. 15–27.
3. *Mukhopadhyay S., Sharma J.* Crustal scale detachment in the Himalayas: a reappraisal. Geophys. J. Int., 2010, 183. – P. 850–860.
4. *Arora B.R., Mahashabde M.V.* A transverse conductive structure in the northwest Himalaya. PEPI, 1987, 45. – P. 119–127.
5. *Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example. Radio Science, 1994, 29. – P. 923–935.
6. *Siripunvaraporn W., Egbert G., Lenbury Y., Uyeshima M.* Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. Physics of the Earth and planetary interiors, 2005, 150. – P. 3–14.
7. *Egbert G. and Kelbert A.* Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophysical Journal International, 2012, 189. – P. 251–267.

