

Построение и анализ массива МВ откликов EHS3D в активных областях Индокитая

Ив.М. Варенцов¹, И.Н. Лозовский¹, Д.А. Грачева¹, П.В. Иванов¹, Т.А. Родина¹, Г.Н. Шкабарня², D. Bai³, X. Li³, D. Walia⁴, D.H. Cuong⁵

¹ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, ivan_varentsov@mail.ru ²ТОИ ДВО РАН, Владивосток ³Institute of Geology and Geophysics, Chinese AS, Beijing
⁴North-Eastern Hill University, Shillong, India ⁵Institute of Marine Geology, Vietnamese AST, Hanoi

Аннотация

Обсуждается проблематика построения и анализа сводного массива магнитовариационных (МВ) откликов по материалам глубинных зондирований, покрывших за последние 15 лет значительную часть территории Индокитая: китайских в Восточном Тибете и провинциях Сычуань и Юннань, индийских и индийско-российских в Восточных Гималаях и долине р. Брахмапутры, российско-вьетнамских на севере Вьетнама. В рамках серии двухсторонних грантов РФФИ проведена многоточечная обработка синхронных наблюдений в сотнях полевых пунктов с учетом данных ряда геомагнитных обсерваторий региона. Получены надежные оценки импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика в диапазоне периодов от первых десятков секунд до 3-4 часов.

Совместная 2D+ инверсия многокомпонентного ансамбля данных вдоль самого западного профиля наблюдений EHS-3, сечущего на протяжении более 1200 км весь Тибето-Гималайский регион, выявила яркие проводящие аномалии на нескольких уровнях в пределах гранитного слоя коры, в нижней коре и на астеносферных глубинах. Наиболее яркие аномалии электропроводности (с продольной проводимостью до 10000 См) лежат в нижней коре и верхней части литосферной мантии. Их природу связывают с высоким тепловым потоком и притоком проводящих флюидов из погружающихся под Тибет Индийской и Евразийской плит. Нижнекоревые квазилинейные проводящие аномалии могут отражать предполагаемые каналы корового течения из центра Тибета в Индокитай.

Пространственный анализ и интерпретация импедансных данных указывают на достаточно сложную – мозаичную структуру этих аномалий в плане. Такая структура может быть следствием интерференции импедансных откликов разной глубинности и влиянием относительно локальных вертикальных токовых систем. Длиннопериодные МВ отклики обладают повышенной чувствительностью к субгоризонтальным квазилинейным коровым проводникам (максимальная амплитуда горизонтального МВ оператора обеспечивает их прямое картирование) и иммунитетом к искажающему влиянию приповерхностных структур. Поэтому МВ данные становятся ключевыми для стабилизации процедур инверсии многокомпонентных ансамблей и важнейшим средством визуального выделения каналов корового течения.

Обсуждается методика многокомпонентного оценивания МВ данных в специфических условиях региона исследований, проблема интеграции оценок горизонтального оператора, полученных относительно разных базовых пунктов, в единый массив и стратегия выбора для него оптимального положения общей базы. Представлены карты, объединяющие инвариантные параметры МВ операторов – индукционные векторы и эллипсы экстремальных амплитуд горизонтального отклика, для периодов от первых сотен секунд до 3-4 часов. Рассматриваются перспективы совместной 3D инверсии площадных массивов МВ данных.

Ключевые слова: Индокитай, Тибет, Гималаи, синхронные магнитовариационные зондирования, типпер, горизонтальный магнитный отклик, каналы корового течения

Массивы синхронных МТ/МВ зондирований на территории Тибета и Индокитая

За последние 15 лет сотрудники ЦГЭМИ ИФЗ РАН в кооперации с учеными ИО РАН, ТОИ ДО РАН, Института геологии и геофизики Китайской АН, Института морской геологии Вьетнамского АНТ и индийского Университета Шиллонга накопили большой объем МТ/МВ данных по Восточному Тибету, СВ Индии и северу Вьетнама для изучения глубинной структуры и динамики крайне сложного геодинамического активного региона.

Профили проекта EHS3D в Восточном Тибете

С 2006 г. в китайско-российском сотрудничестве реализуются технологии синхронных МТ/МВ зондирований на региональных профилях проекта EHS3D. Первые результаты получены на профилях EHS-2, -3 и -4 (рис. 1а). Данные технологии в полной мере реализованы для длиннопериодных (LMT) зондирований с аппаратурой LEM и GEOMAG, обеспечивающих помехоподавляющее оценивание импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика для периодов до 3-4 часов (Xiao et al., 2010; Варенцов, Бай, 2015; Варенцов, Лозовский, 2016). LMT зондирования дополнены более плотными разведочными (BMT) зондированиями, дающими кондиционные импедансные данные. В последние годы область зондирования расширена на юг Тибета и в провинцию Юннань (Li et al., 2019, 2020). Для новых профилей синхронная обработка LMT данных еще идет.

Профиль EHS3D-Ind в долине Брахмапутры

Юго-западным продолжением китайских профилей EHS-2 и -3 стала LMT зондирования с аппаратурой KMS на профиле EHS3D-Ind (Varentsov et al., 2019), выполненные в индийско-российской кооперации с Университетом Шиллонга в долине р. Брахмапутры в 2016-18 (рис. 1б). Сводный профиль EHS-Ind + EHS-3 обеспечил 2000-км пересечение структур погружающегося Индийского крона, Гималаев и всего Тибета.

МТ зондирования в Северном Вьетнаме

В 2012-19 г. в рамках вьетнамско-российской кооперации выполнены синхронные LMT зондирования с аппаратурой LEM на севере Вьетнама (Никифоров и др., 2016, 2018, 2020) вплоть до островов Тонкинского залива (рис. 1в). Они дали важную информацию о структуре сочленения платформенной области ЮЗ Китая с геодинамически активной областью Индокитая.

Проблематика синхронного оценивания МТ/МВ откликов

Большинство рассматриваемых синхронных МТ/МВ зондирований выполнена в труднодоступной малонаселенной местности, но, тем не менее, подвержена заметному влиянию ЭМ шумов разной природы, связанных со спецификой горных ландшафтов и дальним влиянием промышленных помех в горных областях с низкой приповерхностной продольной проводимостью. Во всех пунктах LMT зондирования обработка данных велась по мульти-RRMC методике (Varentsov, 2015b; Варенцов, Лозовский, 2016) с использованием 3-4 удаленных синхронных наблюдений в полевых пунктах и ближних обсерваториях. На рис. 2 приведен характерный пример драматического искажения (на периодах до 300-500 с) односточечных (SS) оценок импеданса и типпера в п. 4N32 на севере профиля EHS-4. Все RRMC оценки существенно подавляют данные искажения, а их робастное осреднение вместе с неискаженной частью SS оценки дает качественный итоговый результат.

Оценивание горизонтальных МВ откликов все еще ведется по двухточечной MC схеме (Varentsov, 2015b) в предположении минимального уровня шумов в базовой точке. Это не оптимально при широком использовании базовых точек в геомагнитных обсерваториях, лежащих в окрестности крупных городов – таких, как LZH, PHU и SHL. Готовится его замена на трехточечную RRMC схему, включающую горизонтальные магнитные наблюдения в полевом, базовом и дополнительном удаленном пунктах.

Значимость МВ данных для понимания геоэлектрической структуры региона

Использование МВ данных существенно повышает информативность МТ зондирований в исследуемом регионе. Они практически не подвержены гальваническим искажениям, связанным с горным рельефом, проводящими разломами и осадками межгорных впадин. Горизонтальные МВ отклики минимально искажены влиянием удаленных токовых систем, а их максимальные амплитуды обеспечивают прямое картирование протяженных субгоризонтальных квазилинейных проводящих структур литосферы (Varentsov, 2015b), что особенно важно для прослеживания предполагаемых структур корового течения с Тибета в Индокитай. При интерпретации одних лишь импедансных данных образы глубинных проводящих структур либо размываются (Bai et al., 2010), либо приобретают мозаичный вид (Li et al., 2019, 2020).

Информативность МВ данных подтверждена в ходе интерпретации 8-компонентного ансамбля МТ/МВ данных на профиле EHS-3 (рис. 1а). Использована методика 2D+ инверсии (Варенцов, 2002; Varentsov, 2015a), учитывающая 3D искаженность данных. Построенная модель (Варенцов, Бай, 2015) позволяет раздельно выделить (рис. 3, слева) субгоризонтальные проводящие структуры, связанные с частичным плавлением в гранитном слое, нижнекоревые флюидизированные проводники над погружающимися Индийской и Евразийской плитами и проводящие линзы в верхней мантии на астеносферных глубинах. Достигнуто вполне удовлетворительное соответствие модельных и наблюдаемых данных для импедансных фаз, компонент типпера и горизонтального МВ отклика (рис. 3, справа).

Построение сводного массива горизонтальных МВ откликов для Тибета и Индокитая

Первичные оценки горизонтальных МВ откликов строились относительно обсерваторских базовых пунктов, обеспечивающих устойчивое получение синхронных записей с умеренным уровнем помех. Для зондирований в Тибете использовалась обсерватория LZH, в СВ Индии – SHL и LZH, на севере Вьетнама – PHU и LZH. Такой выбор баз позволил практически для всех зондирований получить горизонтальные МВ отклики относительно LZH. Однако данная обсерватория расположена на севере Тибетского плато в области существенных коровомантийных проводящих аномалий, поэтому на этапе интерпретации целесообразно пересчитать эти данные к базе, расположенной за пределами доминирующих проводящих структур. Наилучшим выбором интерпретационной базы представляется обсерватория SHL на Индийском кратоне восточнее осадочного бассейна Брахмапутры (рис. 1б). На рис. 4 для периода 2048 с показаны инварианты горизонтального МВ отклика, пересчитанные к базе в SHL, дополненные действительными векторами индукции. На карте максимальных амплитуд (Varentsov, 2015b) севернее разлома BNS и далее на ЮЮВ вдоль разлома RRF до Тонкинского залива четко выделяется интенсивная положительная аномалия (>1.8), предположительно отражающая нижнекоревую зону течения. Длинные оси эллипсов показывают детали простирающейся этой зоны, а векторы индукции согласованно направлены перпендикулярно ее оси. Для детализации данной аномалии идет работа по слушению сети МВ наблюдений в провинциях Сычуань и Юннань.

Заключение

Показаны преимущества mRRMC технологии синхронного оценивания МТ/МВ передаточных операторов в специфических условиях Индокитая. Выполнена интеграция МВ данных, полученных в Восточном Тибете, СВ Индии и на севере Вьетнама и показана их информативность при трассировании проводящих каналов корового течения с центра Тибета в Индокитай.

Благодарности

Российские исследования выполнялись в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН №0144-2019-0021 и поддержаны текущим российско-китайским грантом РФФИ №21-55-53041. Предшествующие исследования в данном регионе были поддержаны серией двухсторонних международных грантов РФФИ. Авторы благодарны сотрудникам геомагнитных обсерваторий международной сети INTERMAGNET и национальных сетей Вьетнама, Индии и Китая.

Литература

- Варенцов Ив.М. Общедоступный подход к решению обратных задач магнитотеллурии в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли. 2002. № 11. С. 11-33.
Варенцов Ив.М., Бай Д. Геоэлектрическая модель тектоноосферы Восточного Тибета по данным глубинных и разведочных МТ/МВ зондирований // Проблемы геодинамики и геологии в интратектонических ороеген. Материалы VI Международного симпозиума (Ред. А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев). Бишкек: ИС РАН. 2015. С. 169-177.
Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н. Комплексирование разведочной и длиннопериодной аппаратуры при проведении синхронных МТ/МВ зондирований литосферы // Вопросы естествознания. 2016. № 1(9). С. 74-79.
Никифоров В.М., Варенцов Ив.М., Шкабарня Г.Н. и др. МТ исследования Северного Вьетнама в длиннопериодном диапазоне (10^T-20000 с) // Геология и Геофизика. 2020. Т. 61(9). С. 1266-1288. doi:10.15372/GIG2019144.
Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Жуковин А.Ю. и др. Системы вертикальных нарушений геоэлектрического разреза тектоноосферы в нефтегазоносных областях Сахалина (Россия) и Тонкинском залива (Вьетнам) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35(6). С. 3-15.
Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Капун В.Б. и др. Электропроводящие элементы сверхглубинных флюидо-разломных систем как индикаторы сейсмически активных зон восточной окраины Евразийского континента (по данным МТ зондирований) // ДАН. 2018. Т. 480. № 6. С. 730-738.
Bai D., Unsworth M., Meju M. et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by MT imaging // Nature Geoscience Let. 2010. doi:10.1038/NGeo0830.
Li X., Bai D., Ma X., Chen Y., Varentsov Iv.M. et al. Electrical resistivity structure of the Xiaojiang strike-slip fault system (SW China) and its tectonic implications // J. Asian Earth Sci. 2019. V. 176. P. 57-67. doi:10.1016/j.jseas.2019.01.031.
Li X., Ma X., Chen Y., Xue S., Varentsov Iv.M., Bai D. A plume-modified lithospheric barrier to the southeastward flow of partially molten Tibetan crust inferred from magnetotelluric data // Earth Planet. Sci. Lett. 2020. V. 548. P. 116493.
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. doi:10.1016/C2014-0-01934-X.
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. doi:10.1016/C2014-0-01934-X.
Varentsov Iv.M., Ivanov P.V., Lozovsky I.N. et al. Geoelectric models along the profile crossing the Indian Craton, Himalaya and Eastern Tibet resulted from simultaneous MT/MV soundings // The study of continental lithosphere electrical conductivity, temperature and rheology / Eds. A.A. Zhamaldin, Yu.L. Rebsky. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences, Ch. 10. 2019. P. 72-82. doi:10.1007/978-3-030-35906-5_10.
Xiao P., Bai D., Varentsov Iv.M. et al. Study on long-period MT sounding: The LMT transfer functions in eastern Tibetan Plateau // Seismology and Geology. 2010. V. 32(1). P. 38-50. In Chinese.

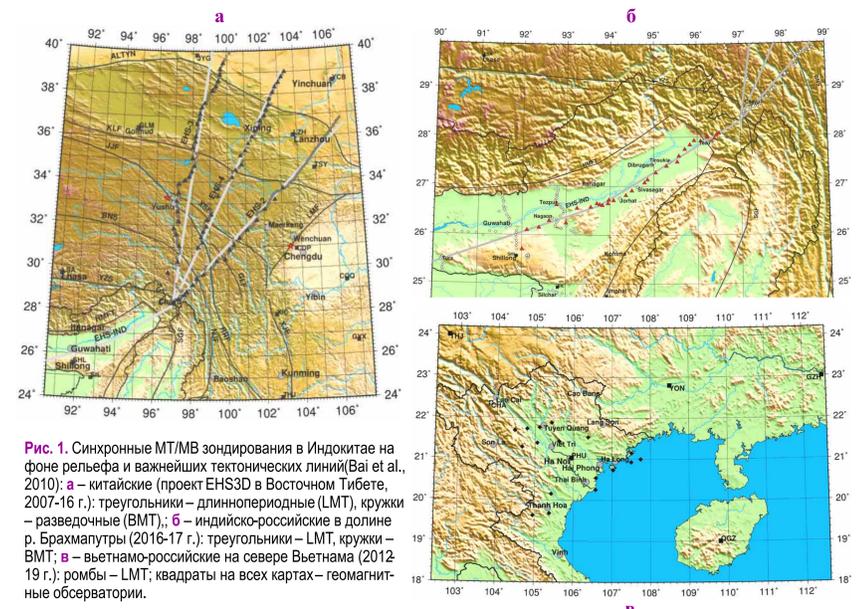


Рис. 1. Синхронные МТ/МВ зондирования в Индокитае на фоне рельефа и важнейших тектонических линий (Bai et al., 2010): а – китайские (проект EHS3D в Восточном Тибете, 2007-16 г.); треугольники – длиннопериодные (LMT), кружки – разведочные (BMT); б – индийско-российские в долине р. Брахмапутры (2016-17 г.); треугольники – LMT, кружки – BMT; в – вьетнамско-российские на севере Вьетнама (2012-19 г.); ромбы – LMT; квадраты на всех картах – геомагнитные обсерватории.

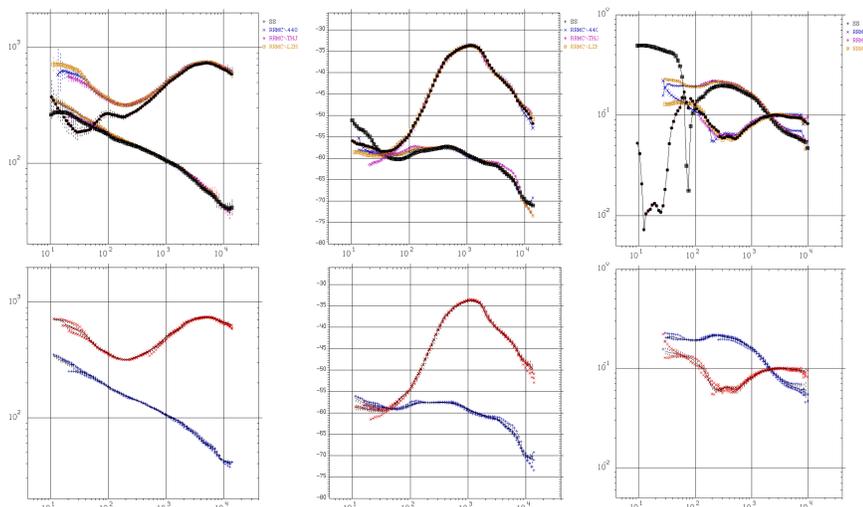


Рис. 2. Результаты mRRMC оценивания компонент импеданса и типпера в п. 4N32 на севере профиля EHS-4 (рис. 1а), слева направо: главные компоненты кажущегося сопротивления (Ом·м, lg-масштаб), фазы импеданса (град.) и типпера; сверху – отдельные SS (жирные черные, сильно искаженные для периодов до 1000 с) и RRMC оценки, внизу – итоги их робастного осреднения (сплошные линии с доверительными интервалами) и осредняемые данные (крестики) – mRRMC технология (Varentsov, 2015b) с использованием трех удаленных синхронных пунктов наблюдения позволяет получить практически неискаженные кривые во всем диапазоне периодов LMT зондирований (10-10000 с).

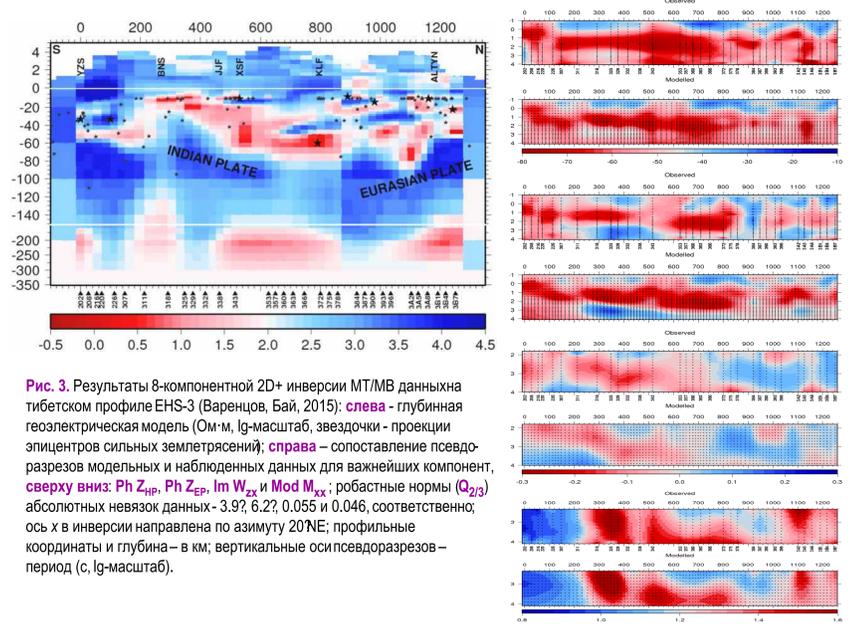


Рис. 3. Результаты 8-компонентной 2D+ инверсии МТ/МВ данных на тибетском профиле EHS-3 (Варенцов, Бай, 2015): слева - глубинная геоэлектрическая модель (Ом·м, lg-масштаб, звездочки - проекции эллипсов сильных землетрясений); справа – сопоставление псевдоразрезов модельных и наблюдаемых данных для важнейших компонент, сверху вниз: $Ph Z_{Er}$, $Ph Z_{Ei}$, $Im W_z$ и $Mod M_x$; робастные нормы (Q_2) абсолютных невязок данных - 3.9?, 6.2?, 0.055 и 0.046, соответственно; ось x в инверсии направлена по азимуту 20°NE; профильные координаты и глубина – в км; вертикальные оси псевдоразрезов – период (с, lg-масштаб).

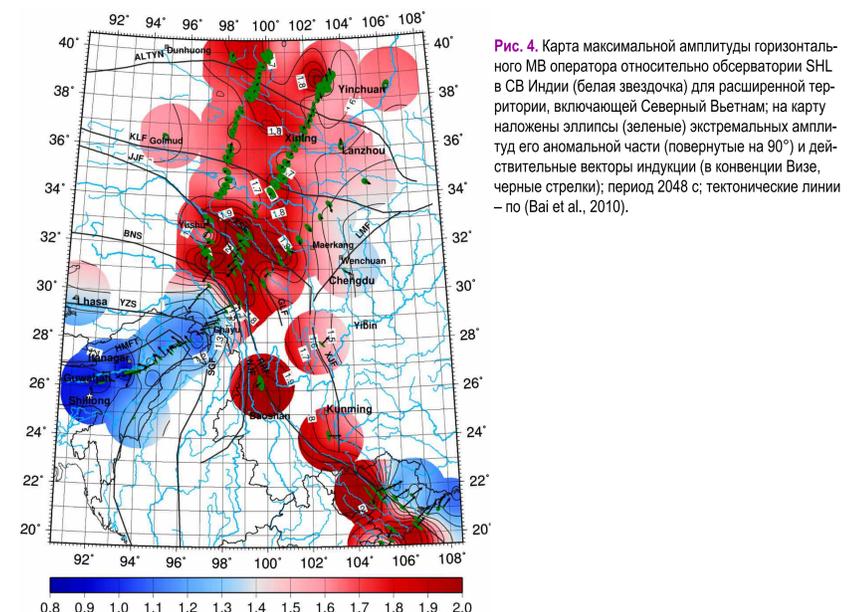


Рис. 4. Карта максимальной амплитуды горизонтального МВ оператора относительно обсерватории SHL в СВ Индии (белая звездочка) для расширенной территории, включающей Северный Вьетнам; на карту наложены эллипсы (зеленые) экстремальных амплитуд его аномальной части (поворотные на 90°) и действительные векторы индукции (в конвенции Визе, черные стрелки); период 2048 с; тектонические линии – по (Bai et al., 2010).