

Памяти Валериана Митрофановича Никифорова

Построение и анализ массива MB 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 and Geophysics, Vietnam AST, Hanoi

АННОТАЦИЯ

Обсуждается проблематика построения и анализа сводного массива магнитовариационных (MB) 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 MB 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, секущего 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 10 000 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. Нижнекоровые 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 MB отклики обладают повышенной чувствительностью к субгоризонтальным квазилинейным коровым проводникам и иммунитетом к искажающему влиянию приповерхностных структур. Поэтому MB данные становятся ключевыми для стабилизации процедур инверсии многокомпонентных ансамблей и важнейшим средством визуального выделения каналов корового течения. Обсуждается методика многокомпонентного оценивания MB 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 MB операторов – индукционные векторы и эллипсы экстремальных амплитуд горизонтального отклика. Рассматриваются перспективы совместной 3D инверсии площадных массивов MB данных.

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

ВВЕДЕНИЕ

За последние 15 лет сотрудники ЦГЭМИ ИФЗ РАН в кооперации с учеными ИО РАН, ТОИ ДВО РАН, Института геологии и геофизики Китайской АН, Института морской геологии и геофизики Вьетнамской 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 геодинамически активного региона.

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 (рисунок 1а). Данные

технологии в полной мере реализованы для длиннопериодных (LMT) зондирований с аппаратурой LEMI и GEOMAG, обеспечивающих помехоподавляющее оценивание импеданса, типпера и горизонтального MB 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 зондирований расширена на юг Тибета и в провинцию Юннань (Li et al., 2019, 2020). Для новых профилей синхронная обработка LMT данных еще идет.

Юго-западным продолжением китайских профилей EHS-2 и -3 стали 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 г. (рисунок 16). Сводный профиль EHS-Ind+EHS-3 обеспечил 2000-км пересечение структур погружающегося Индийского крона, Гималаев и всего Тибета.

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

ПРОБЛЕМАТИКА СИНХРОННОГО ОЦЕНИВАНИЯ MT/MB ОТКЛИКОВ

Большинство рассматриваемых синхронных MT/MB зондирований выполнена в труднодоступной малонаселенной местности, но все же подвержена заметному влиянию электромагнитных шумов разной природы, связанных со спецификой горных наблюдений 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 рисунке 2 приведен характерный пример драматического искажения (на периодах до 300-500 с) одноточечных (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 MB 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 LZN, PHU и SHL. Готовится его замена на трехточечную RRMC схему, включающую горизонтальные магнитные наблюдения в полевом, базовом и дополнительном удаленном пунктах.

ЗНАЧИМОСТЬ MB ДАННЫХ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕГИОНА

Использование MB данных существенно повышает информативность MT зондирований в исследуемом регионе. Они практически не подвержены гальваническим искажениям, связанным с горным рельефом, проводящими разломами и осадками межгорных впадин. Горизонтальные MB 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 MB данных подтверждена в ходе интерпретации 8-компонентного ансамбля MT/MB данных на профиле EHS-3 (рисунок 1а). Использована методика 2D+ инверсии (Варенцов, 2002; Varentsov, 2015a), учитывающая 3D искаженность данных. Построенная модель (Варенцов, Бай, 2015) позволяет отдельно выделить (рисунок 3а) субгоризонтальные проводящие структуры, связанные с частичным плавлением в гранитном слое, нижнекоровые 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 MB отклика (рисунок 3б).

ЗНАЧИМОСТЬ MB ДАННЫХ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕГИОНА

Первичные оценки горизонтальных MB откликов строились относительно обсерваторских базовых пунктов, обеспечивающих устойчивое получение синхронных записей с умеренным уров-

нем помех. В Тибете использовалась обсерватория LZN, в СВ Индии – SHL и LZN, на севере Вьетнама – PHU и LZN. Такой выбор позволил для всех зондирований получить горизонтальные МВ отклики относительно LZN. Однако данная обсерватория расположена на севере Тибетского плато в области существенных коромантийных проводящих аномалий, поэтому на этапе интерпретации надо пересчитать эти данные к базе, расположенной за пределами доминирующих проводящих структур. Наилучшим выбором стала обсерватория SHL на Индийском кратоне восточнее осадочного бассейна Брахмапутры (рисунок 16). На рисунке 4 для периода 2048 с показаны инварианты горизонтального МВ отклика, пересчитанные к SHL и дополненные действительными векторами индукции. На карте максимальных амплитуд (Varentsov, 2015b) севернее разлома BNS и далее на ЮЮВ вдоль разлома RRF до Тонкинского залива слитно выделяется интенсивная положительная аномалия (>1.8), предположительно отражающая нижнекоровую зону течения. Длинные оси эллипсов показывают детали простирания зоны, а векторы индукции согласованно направлены перпендикулярно ее оси. Для детализации данной аномалии идет работа по сгущению 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 регионе поддержаны серией двухсторонних международных грантов РФФИ. Авторы благодарны сотрудникам геомагнитных обсерваторий международной сети INTERMAGNET и национальных сетей Вьетнама, Индии и Китая.

ЛИТЕРАТУРА

Варенцов ИвМ, 2002 Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах. *Физика Земли*, № 11, с 11-33

Варенцов ИвМ, Бай Д, 2015 Геоэлектрическая

модель тектоносферы Восточного Тибета по данным глубинных и разведочных МТ/МВ зондирований. Материалы VI Международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Бишкек: ИС РАН, с 169-177

Варенцов ИвМ, Лозовский ИИ, 2016 Комплексирование разведочной и длиннопериодной аппаратуры при проведении синхронных МТ/МВ зондирований литосферы. *Вопросы естествознания*, № 1(9), с 74-79

Никифоров ВМ, Варенцов ИвМ, Шкабарня ГИ и др., 2020 МТ исследования Северного Вьетнама в длиннопериодном диапазоне ($10 < T < 20000$ с). *Геология и Геофизика*, 61(9), с 1266-1288. doi:10.15372/GiG2019144

Никифоров ВМ, Шкабарня ГИ, Жуковин АЮ и др., 2016 Системы вертикальных нарушений геоэлектрического разреза тектоносферы в нефтегазоносных областях Сахалина (Россия) и Тонкинском залива (Вьетнам). *Тихоокеанская геология*, 35(6), с 3-15

Никифоров ВМ, Шкабарня ГИ, Каплун ВБ и др., 2018 Электропроводящие элементы сверхглубинных флюидно-разломных систем как индикаторы сейсмически активных зон восточной окраины Евразийского континента (по данным МТ зондирований). *ДАН*, 480(6), с 730-738

Bai D, Unsworth M, Meju M et al., 2010 Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by MT imaging. *Nature Geoscience Let.*, 3, pp 358–362. doi:10.1038/NGEO830

Li X, Bai D, Ma X, Chen Y, Varentsov IvM, et al., 2019 Electrical resistivity structure of the Xiaojiang strike-slip fault system (SW China) and its tectonic implications. *J. Asian Earth Sci.*, 176, pp 57-67. doi:10.1016/j.jseaes.2019.01.031

Li X, Ma X, Chen Y, Xue S, Varentsov IvM, Bai D, 2020 A plume-modified lithospheric barrier to the southeastward flow of partially molten Tibetan crust inferred from MT data. *Earth Planet. Sci. Let.*, 548:116493

Varentsov IvM, 2015a Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets. In: Spichak VV (ed) *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior*, V. 40 (2nd ed). Elsevier, Amsterdam, pp 191-229. doi:10.1016/C2014-0-01934-X

Varentsov IvM, 2015b Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion. In: Spichak VV (ed) *EM sounding of the Earth's Interior*, V. 40 (2nd ed). Elsevier, Amsterdam, pp 271-299. doi:10.1016/C2014-0-01934-X

Varentsov IvM, Ivanov PV, Lozovsky IN et al., 2019 Geoelectric models along the profile crossing the

Indian Craton, Himalaya and Eastern Tibet resulted from simultaneous MT/MV soundings. In: Zhamaletdinov AA, Rebetsky YuL (eds) The study of continental lithosphere electrical conductivity, temperature and rheology. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences, ch. 10, pp 72-82. doi:10.1007/978-3-030-35906-5_10

Xiao P, Bai D, Varentsov IvM et al., 2010 Study on long-period MT sounding: The LMT transfer functions in eastern Tibetan Plateau. Seismology and Geology, 32(1), pp 38-50. In Chinese.

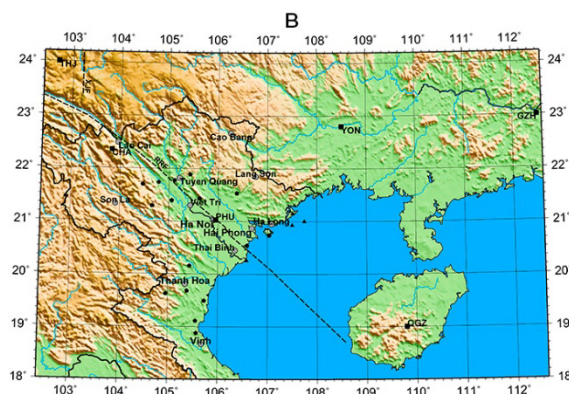
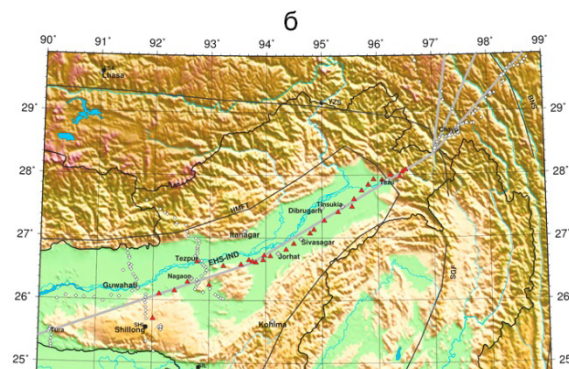
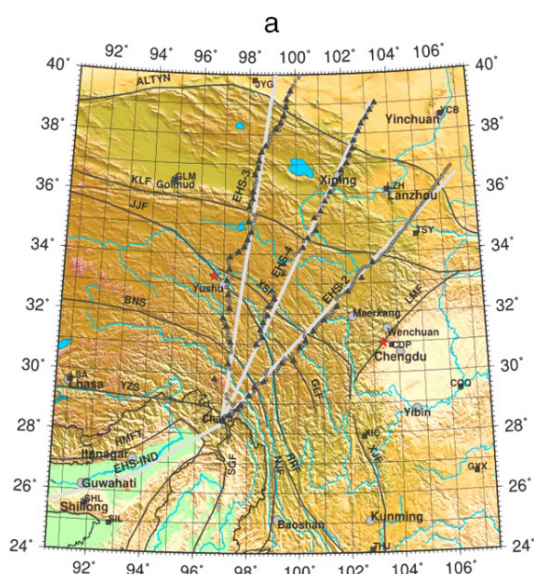


Рисунок 1. Синхронные MT/MB зондирования в Индокитае на фоне рельефа и важнейших тектонических линий (Bai et al., 2010): **а** – китайские (проект EHS3D в Восточном Тибете, 2007-21 г.): треугольники – длиннопериодные (LMT), кружки – разведочные (BMT); **б** – индийско-российские в долине р. Брахмапутры (2016-18 г.): треугольники – LMT, кружки – BMT; **в** – вьетнамо-российские на севере Вьетнама (2012-19 г.): ромбы – LMT; квадраты на всех картах – геомагнитные обсерватории.

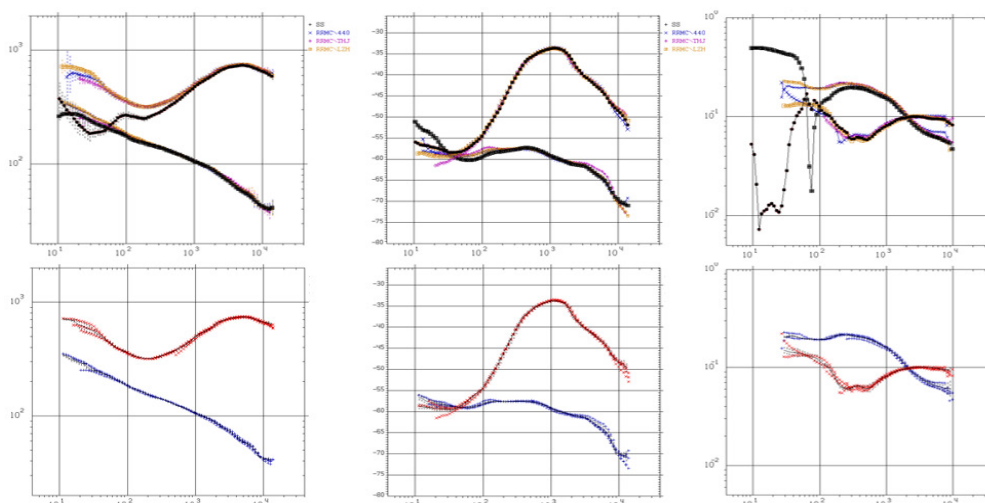


Рисунок 2. Результаты mRRMC оценивания компонент импеданса и типпера в п. 4N32 на севере профиля EHS-4 (рисунок 1а), слева направо: главные компоненты кажущегося сопротивления (Ом·м, lg-масштаб), главные фазы импеданса (град.) и амплитуды двух компонент типпера ;верху – отдельные SS оценки (жирные черные, сильно искаженные для периодов до 1000 с) и RRMCI оценки

для разных удаленных пунктов, внизу – итоги их робастного осреднения (сплошные линии с доверительными интервалами) и осредняемые данные (крестики) – mRRMC технология (Varentsov, 2015b) с использованием трех синхронных пунктов наблюдения позволяет получить практически неискаженные кривые во всем диапазоне периодов LMT зондирования (10-10000 с).

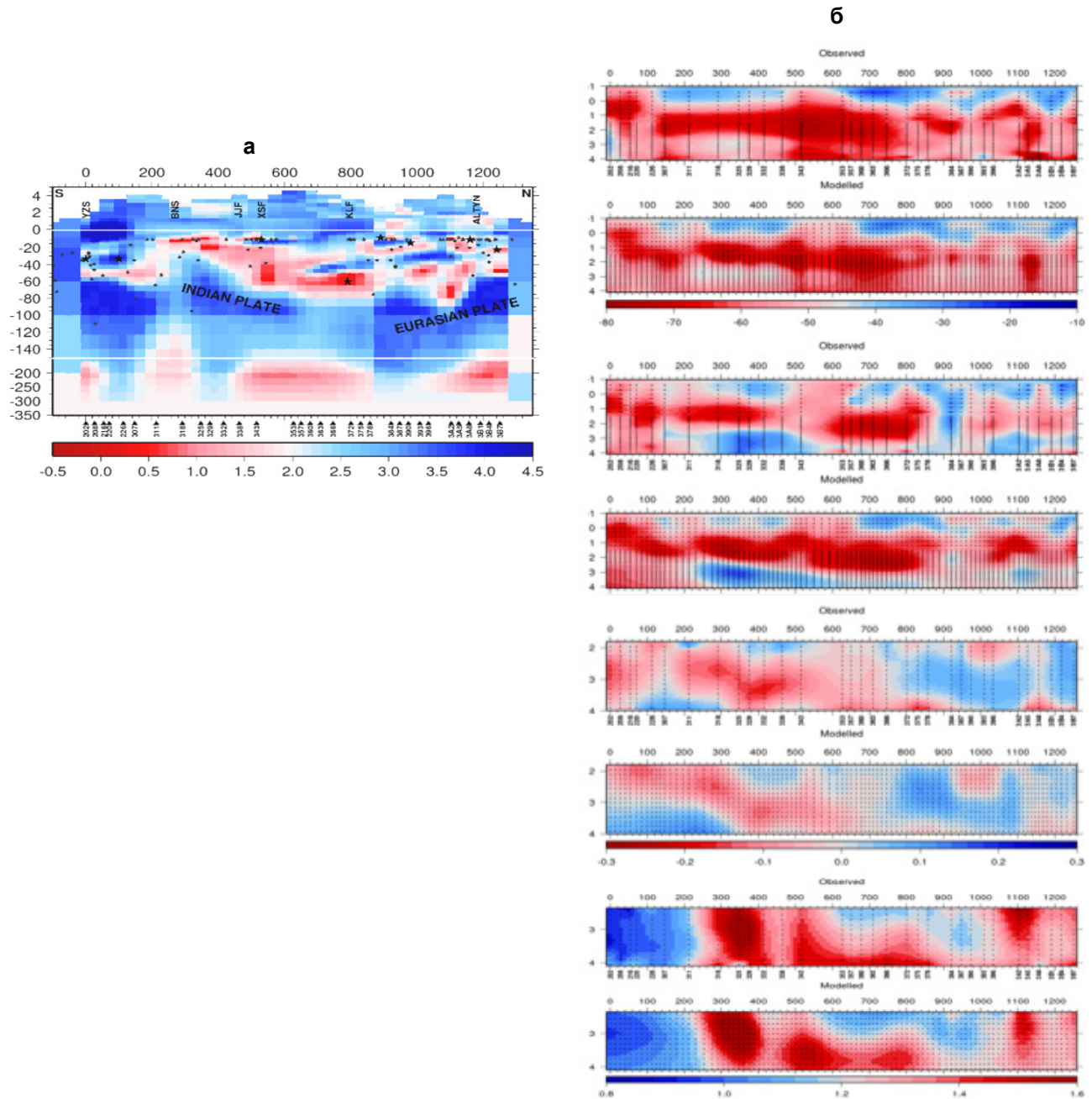


Рисунок 3. Результаты 8-компонентной 2D+ инверсии MT/MB данных на тибетском профиле EHS-3 (Варенцов, Бай, 2015): **а** - глубинная геоэлектрическая модель (Ом·м, lg-масштаб, звездочки - проекции эпицентров сильных землетрясений); **б** – сопоставление псевдоразрезов модельных и наблюдаемых данных для важнейших компонент, сверху вниз: $Ph Z_{HR}$, $Ph Z_{ER}$, $Im W_{zx}$ и $Mod M_{xx}$; робастные нормы ($Q_{2/3}$) 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).

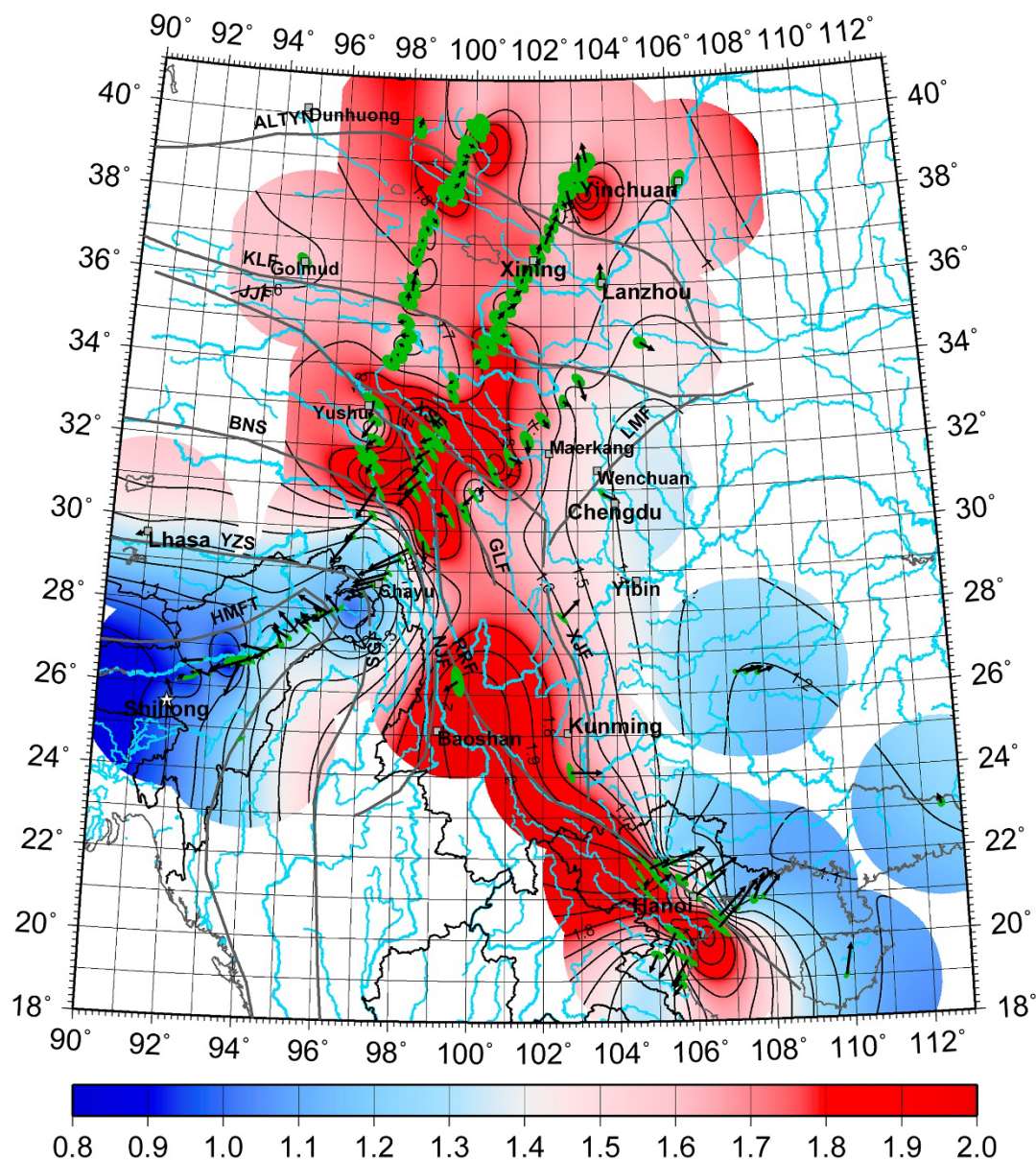


Рисунок 4. Карта максимальной амплитуды горизонтального МВ оператора относительно обсерватории SHL в СВ Индии (белая звездочка) для расширенной территории, включающей Северный Вьетнам; на карту наложены эллипсы (зеленые) экстремальных амплитуд его аномальной части (повернутые на 90°, чтобы указывать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