

## МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ВЬЕТНАМА В ДЛИННОПЕРИОДНОМ ДИАПАЗОНЕ ( $10 < T < 20\,000$ с)

**В.М. Никифоров<sup>1</sup>, И.М. Варенцов<sup>2</sup>, Г.Н. Шкабарня<sup>1</sup>, В.Б. Каплун<sup>3</sup>,  
А.Ю. Жуковин<sup>1</sup>, До Хуы Куонг<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

<sup>2</sup> ЦГЭМИ Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 108840, Троицк, а/я 30, Россия

<sup>3</sup> Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

<sup>4</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

Рассмотрены результаты магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в интервале периодов  $10 < T < 20\,000$  с на территории Северного Вьетнама. Показана относительно простая структура магнитовариационных откликов, которая в основном отражает квазидвумерную электропроводящую структуру земной коры. Импедансные отклики формируются как суперпозиция откликов, сложных локальных приповерхностных и квазидвумерных региональных глубинных структур. На основании разделения локальных и региональных эффектов построена глубинная геоэлектрическая модель тектоносферы региона, главными элементами которой являются субвертикальные сквозьлитосферные электропроводящие разломы и высокоомные нарушения проводящей астеносферы. Эти элементы, обеспечивая перетекание теллурических токов, индуцированных в глубинных электропроводящих системах, в осадочный чехол, формируют зоны аномальных кривых кажущегося сопротивления с монотонным ростом по мере увеличения периодов вплоть до  $20\,000$  с. Совокупность таких элементов геоэлектрической модели названа нами «сверхглубинная флюидно-разломная система» (СГФРС).

В результате моделирования на территории Северного Вьетнама выявлено положение трех ортогонально пересекающихся СГФРС северо-восточного и юго-восточного простирания. Показано, что проводящие (флюидонасыщенные) сквозьлитосферные разломы, выходящие в основание осадочной толщи, контролируют расположение залежей нефтегазовых и рудных месторождений.

Предложен метод разделения локальных и региональных магнитотеллурических эффектов, позволяющий надежно определить главные направления регионально двумерной структуры и конфигурацию кривых кажущегося сопротивления в главных направлениях.

*Магнитотеллурическое зондирование, тектоносфера, геоэлектрическая модель, астеносфера, глубинный разлом, глубинный флюид, нефтегазовое месторождение, Вьетнам.*

## LONG-PERIOD ( $10 < T < 20,000$ s) MAGNETOTELLURIC STUDIES IN NORTHERN VIETNAM

**V.M. Nikiforov, I.M. Varentsov, G.N. Shkabarnya, V.B. Kaplun, A.Yu. Zhukovin, and Do Huy Cuong**

We consider results of magnetotelluric and magnetovariational soundings in the period range  $10 < T < 20\,000$  s in the North Vietnam area. The simple structure of magnetovariational responses is shown, which generally reflects the electrically conductive quasi-two-dimensional structure of the Earth's crust. Impedance responses form as a superposition of responses of local complex subsurface and quasi-two-dimensional regional deep-seated structures. Separation of local and regional effects made it possible to construct a geoelectrical depth model of the regional tectonosphere, whose main elements are electrically conductive subvertical trans-lithospheric faults and high-resistivity disturbances of the conductive asthenosphere. These elements, favoring the flow of telluric currents induced in deep-seated electrically conductive systems into the sedimentary cover, form zones of abnormal apparent-resistivity curves. The apparent resistivity monotonously increases with increasing the period up to  $20\,000$  s. We called the combination of such elements of the geoelectrical model a ultradeep fluid-fault system (UDFFS).

The modeling has established the location of three orthogonally intersecting UDFFS of NE and SE strikes in the North Vietnam area. It shows that conductive (fluid-saturated) translithospheric faults extending to the base of the sedimentary sequence control the location of petroleum fields and ore deposits.

A method for separating local and regional magnetotelluric effects is proposed. It permits one to determine reliably the main strikes of a regional two-dimensional structure and the configuration of the apparent-resistivity curves along them.

*Magnetotelluric sounding, tectonosphere, geoelectrical model, asthenosphere, deep fault, mantle fluid, petroleum field, Vietnam*

## ВВЕДЕНИЕ

Северный Вьетнам расположен в зоне соприкосновения тектонических плит, разных по возрасту, степени метаморфизма, характеру магматизма. Главной структурой региона является впадина р. Красная. Считается, что она образовалась в результате сложного сдвига и наложена на континентальное основание [Phuong, 1991; Phach, 2001]. В северной части она перекрывает блоки Китайской плиты: докембрийский блок Янцзы, протягивающийся более чем на 2000 км от Шанхая до р. Красная, и фанерозойский Бакбо-Гуанси-Цзансийский пояс [Nielsen et al., 1999]. На юге и юго-западе ее перекрывает фанерозойский Вьетнамо-Лаосский подвижный пояс — элемент Индокитайской плиты. Заложение и развитие впадины р. Красная проходило под влиянием глубинных разломов северо-западного направления. В море эта впадина располагается поперек осевой линии Южно-Китайского моря. В продольном направлении впадины отмечается уступное изменение мощностей. По материалам ГСЗ и гравirazведки установлен общий характер строения земной коры. Она меняется от континентальной мощностью 35—36 км на северо-западе до утоненной континентальной (25—28 км) на юго-востоке. Большинство исследователей относят впадину р. Красная к рифтогенной структуре. Недостаточная изученность глубинного строения региона не способствует решению вопросов фундаментального и прикладного характера, влияющих на выработку эффективных направлений поисковых работ (особенно нефтегазопоисковых) и рационального природопользования густонаселенной территории.

Для восполнения этого пробела в 1996—1997 гг. вьетнамскими и французскими исследователями были выполнены глубинные магнитотеллурические зондирования (МТЗ) по профилю (8 точек), пересекающему разломную зону р. Красная в центральной части Ханойской впадины [Doan et al., 2001]. Позднее вьетнамскими учеными были проведены работы МТЗ с применением высокочастотной аппаратуры [Minh et al., 2011]. Анализ данных этих работ показал, что в высокочастотном диапазоне ( $10^3$ —1 Гц, реже до 0.1 Гц) характер откликов электромагнитного поля устойчиво сохраняется или закономерно меняется по площади исследования, а данные интерпретации в целом хорошо отражают геоэлектрическую структуру верхней части изучаемого разреза. В низкочастотном диапазоне ( $T > 10$  с) устойчивость характера электромагнитных откликов теряется. Интерпретация этих данных приводит к противоречивым результатам, не позволяющим сформировать закономерно меняющуюся глубинную тектоническую структуру в районе исследований.

Целью настоящей работы является оценка эффективности магнитотеллурических методов в комплексе геолого-геофизических исследований, установление особенностей электромагнитных процессов в низкочастотном диапазоне в сложнопостроенной геологической и, соответственно, гетерогенной геоэлектрической среде, разработка методов разделения локальных и региональных магнитотеллурических эффектов, изучение особенностей отображения элементов горизонтально-неоднородной геоэлектрической модели в импедансных и магнитных откликах.

## МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ВАРИАЦИЙ КОМПОНЕНТ МТ-ПОЛЯ

Магнитотеллурические исследования на территории Северного Вьетнама в рамках совместных российско-вьетнамских программ научного сотрудничества в 2012—2013 и 2016—2017 гг. были проведены в 20 пунктах, расположенных по трем профилям северо-восточного направления (рис. 1). Регистрация МТ-поля осуществлялась с применением трехкомпонентного магнитометра LEMI-025 [Korepanov et al., 2007] и цифрового измерителя теллурического поля конструкции ТОИ ДВО РАН на пунктах CBU, COT1, TRA, BOR. На пунктах COT2, NGV, NIC регистрировались только горизонтальные электрические компоненты. На остальных пунктах регистрация электрических и магнитных компонент МТ-поля производилась с применением магнитотеллурической станции LEMI-417.

Перед началом каждого полевого сезона соответствие реальных характеристик измерительной аппаратуры их паспортным данным проверялось на магнитной обсерватории VLA (Владивосток). Длина измерительных электрических линий составляла 400–700 м, что чаще всего обеспечивало уровень сигнала, достаточный для надежной регистрации. Однако в пунктах, выполненных в зонах выходов низкоомных разломов (HLG, YNB, TRS, PYN, CBU), уровень сигнала был сопоставим с уровнем шумов, что сказалось на качестве их импедансных оценок. Измерительные электрические линии разматывались в направлениях север—юг (ось  $x$ ) и запад—восток (ось  $y$ ). В отдельных пунктах прокладывались дополнительные измерительные линии под углом  $45^\circ$  по отношению к основным. Магнитные компоненты во всех пунктах регистрировались в единой системе: ось  $x$  — север—юг, ось  $y$  — запад—восток, ось  $z$  — вертикально вниз.

Из-за сложности рельефа и широкого развития сетей стационарных и полустационарных электрокоммуникаций не всегда представлялась возможность прокладки электрических измерительных линий строго в азимутах выбранных осей, иногда отклонения достигали  $10^\circ$ . Эти отклонения затем учитывались в процессе обработки данных. В числе неблагоприятных факторов, снижавших качество записи

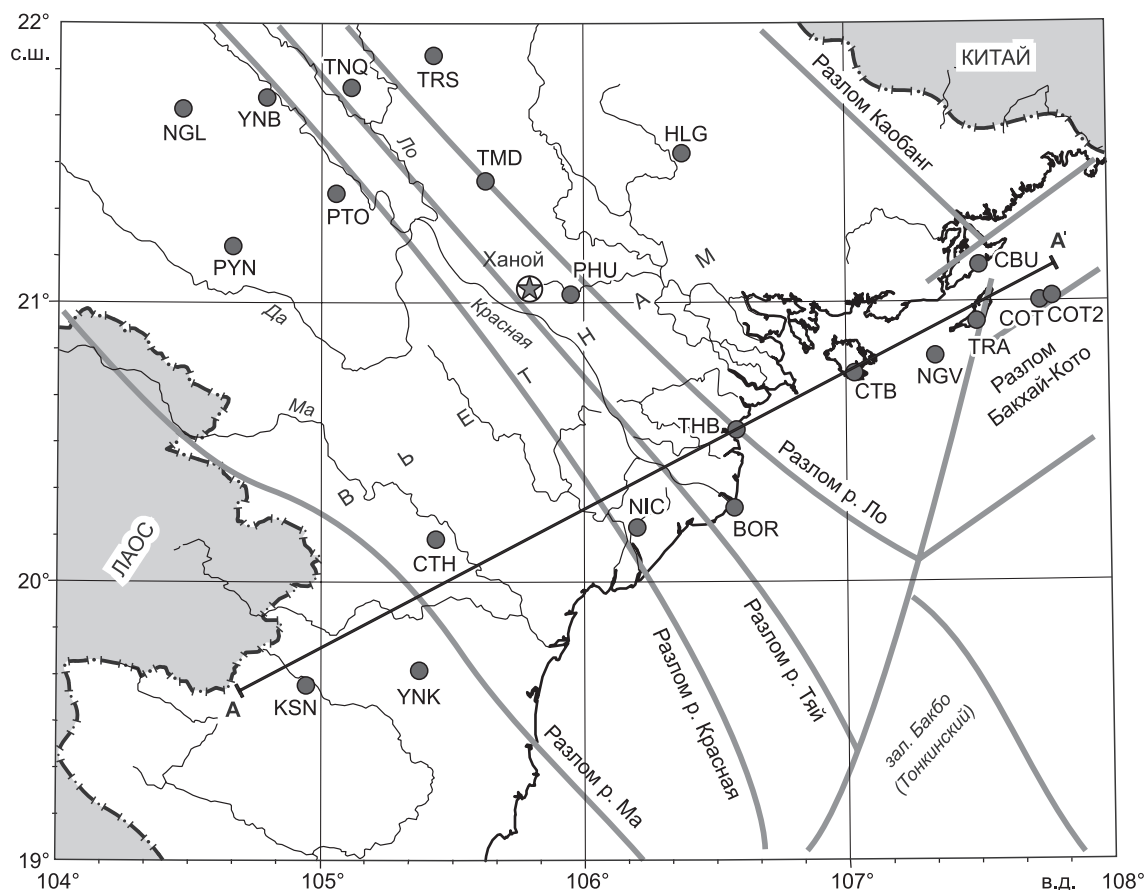


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения МТ-поля по совместным российско-вьетнамским программам 2012—2017 гг. и основных разломов Северного Вьетнама.

Сплошной линией обозначен профиль построения геоэлектрического разреза А—А'.

МТ-поля, можно отметить регулярные порывы измерительных линий местным населением, а также градиентный характер хода естественного потенциала (ЕП), особенно в пунктах, выполненных на местности с большим перепадом высот и резким изменением режима приповерхностных вод в условиях тропических дождей. Частота дискретизации магнитных и электрических вариаций составляла 1 Гц. Моменты дискретизации синхронизированы по GPS с всемирным временем UTC. Длительность сеансов непрерывной регистрации МТ-поля составляла от 3 до 10 сут., что обеспечило расширенный диапазон обрабатываемых периодов до 15 000—20 000 с. Все сеансы регистрации МТ-поля сопровождались синхронной регистрацией магнитных компонент на магнитной обсерватории PHU (Ханой), расположенной в центре исследуемой площади.

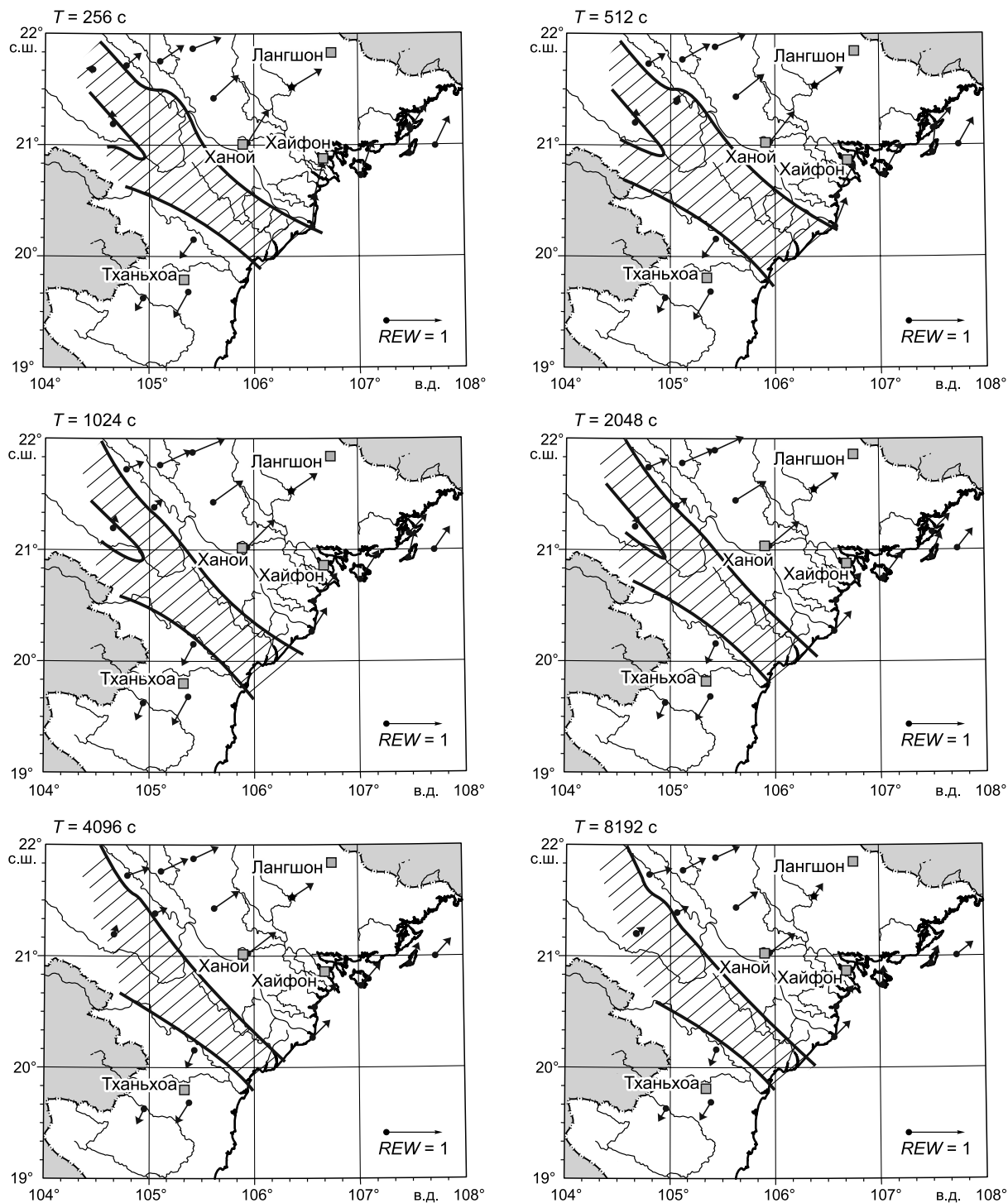
#### ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТНЫХ ОТКЛИКОВ

Синхронная помехоподавляющая обработка собранных в 2012—2017 гг. данных с опорой на близлежащие геомагнитные обсерватории направлена на получение передаточных операторов ЭМ-поля высокого качества. Исходя из общих положений о более простой структуре магнитовариационных (МВ) откликов, первоочередной задачей ставилось получение магнитных типперов  $[W]$ , определяемых из соотношения Визе—Паркинсона  $H_z = [W] \cdot H_\tau$  и горизонтальных магнитных тензоров  $[M(r/r_6)]$ , определяемых из соотношений  $H_\tau(r) = [M(r/r_6)] \cdot H_\tau(r_6)$ , где  $H_\tau$  — горизонтальное магнитное поле в полевой точке  $O(r)$  и базовой точке  $B(r_6)$ .

Во всех пунктах, где регистрировались компоненты вариаций магнитного поля, исходный материал, дополненный временными рядами в четырех геомагнитных обсерваториях (DLT и PHU — Вьетнам, TNH и LZH — Юго-Западный Китай), оказался вполне пригодным для получения МВ откликов.

По собранным таким образом данным выполнена оценка типпера и горизонтального магнитного тензора относительно различных базовых пунктов по методике многоточечной обработки синхронных МТ/МВ данных, разработанной в ЦГЭМИ ИФЗ РАН [Варенцов, 2002, 2016; Варенцов и др., 2003; Varentsov, 2015]. Во всех пунктах зондирования, включая магнитную обсерваторию PHU, получены устойчивые multi-RRMC оценки типпера [Varentsov, 2015] с использованием 2—4 удаленных пунктов.

Для периодов 256—8192 с построены карты действительных типперов  $REW$  Визе—Паркинсона на изученной площади (рис. 2). В ее северо-восточной части, включая обсерваторию PHU, эти векторы



**Рис. 2.** Действительные индукционные векторы в пунктах наблюдения компонент магнитного поля.

Штриховкой обозначены зоны смены направлений индукционных векторов. В нижней правой части карт приведена величина единичного вектора  $REW$ .



согласованно ориентированы в северо-восточном направлении во всем представленном диапазоне периодов (стрелки ориентированы в сторону от проводника). В юго-западной части площади на пунктах KSN, YNK, СТН стрелки индукционных векторов направлены диаметрально противоположно. В пунктах NGL, YNB, PYN, расположенных на северо-западе площади, индукционные векторы отличаются низким уровнем модуля, а их направления определяются неточно. Результаты расчета типперов позволяют обозначить полосу смены направления ориентировки индукционных векторов, протягивающуюся более чем на 300 км через всю площадь исследования с северо-запада на юго-восток.

Первичные горизонтальные тензоры определялись относительно обсерватории РНУ. Качество полученных горизонтальных откликов во всех пунктах равномерно высокое. Однако, судя по характеру типперов (см. рис. 2), обсерватория РНУ находится в градиентной зоне аномального магнитного поля, связанного с глубинным электропроводящим телом. В связи с этим горизонтальные МВ отклики, оцененные относительно РНУ, пересчитывались [Varentsov, 2015] относительно пунктов зондирования, максимально удаленных от выявленной аномалий. На рисунке 3 приведены два варианта карты горизонтальных магнитных откликов: относительно пункта СТВ (о. Катба) и HLG (100 км на северо-восток от г. Ханой).

Графически магнитные отклики представлены в виде эллипсов магнитных тензоров. Для наглядности эллипсы развернуты на угол  $90^\circ$ , чтобы они своими длинными осями подчеркивали направление простираения электропроводящих объектов нижнего полупространства. Сопоставляя рисунки 3, а, б можно отметить, что в результате смены базового пункта СТВ на HLG не произошло кардинальной перестройки структуры аномального поля горизонтальных магнитных откликов. Оптимальным по точности и простоте пространственной структуры горизонтальных МВ откликов представляется пересчет относительно пункта HLG. В этом пересчете на всех периодах свыше 256 с изолинии максимальных значений горизонтальных МВ откликов обрисовывают слабоосложненную трапециевидную структуру юго-западного простираения. Из-за недостатка полевых наблюдений в западной части площади, юго-западное крыло аномальной структуры изучено лишь частично. Зона минимальных значений типперов располагается внутри зоны максимальных значений горизонтальных МВ откликов. Такое поведение аномальных вертикальных и горизонтальных полей, очевидно, является свидетельством простой, близкой к двумерной электрической структуре нижнего полупространства, создающей отмеченные аномалии. На это же указывает и характер эллипсов горизонтальных магнитных тензоров, отличающихся большим преобладанием длинных осей над короткими.

### ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ

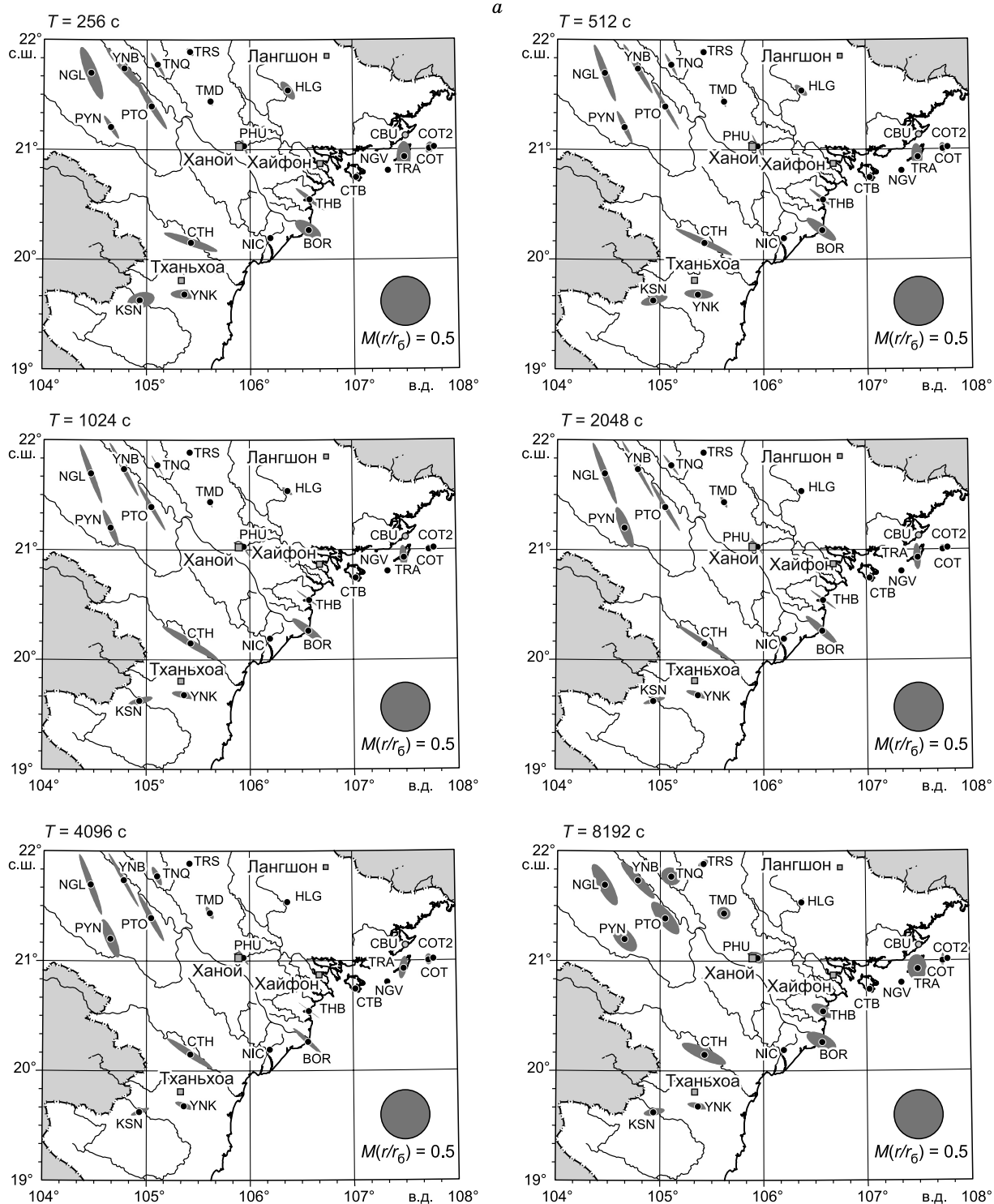
Оценки импеданса в разных пунктах существенно различаются по качеству. Устойчивые multi-RRMC оценки импеданса [Варенцов, 2002, 2016; Варенцов и др., 2003] с использованием 2—4 удаленных пунктов удалось получить лишь в отдельных случаях. Экстремальные инвариантные параметры кажущихся сопротивлений и фаз во многих случаях сильно отличаются, что делает невозможным установление тенденций в их изменениях на территории исследования. Эффективные кажущиеся сопротивления и фазы согласуются лишь в отдельных пунктах: PTO, KSN, YNK, NGL, YNB. Результаты обработки МТ-поля с целью определения компонент тензора импеданса, связывающего электрическое и магнитное поле соотношением  $E_t = [Z] \cdot H_t$ , так же как и результаты, полученные ранее в этом районе вьетнамскими и французскими исследователями [Doan et al., 2001], показывают, что интерпретация неустойчивых по площади магнитотеллурических откликов неизбежно приводит к противоречивым геологическим построениям [Dinh et al., 2018], когда каждая точка МТЗ отождествляется с отдельным геоэлектрическим блоком, резко отличающимся от соседних по электрическому сопротивлению.

Геологическое строение Северного Вьетнама, тектоника и, как показано выше, вертикальные и горизонтальные магнитные отклики МТ-поля указывают на большую вероятность наличия региональных двумерных или квазидвумерных геоэлектрических структур. Вместе с тем, судя по имеющимся данным, резкие неоднородности электрического сопротивления приповерхностных локальных структур (разрывы, поверхностные и подземные воды и т.д.) делают более сложной зависимость между электрическим и магнитным полями, которая представляет собой отклик от суперпозиции глубинной и поверхностной структур. Согласно [Бердичевский, Дмитриев, 2010], локально-региональный импеданс суперпозиции структур имеет вид

$$[Z^S] = [e] \times [Z^R], \quad (1)$$

где  $[Z^S]$  — локально-региональный импеданс, рассчитываемый по записям МТ-поля,  $[Z^R]$  — региональный импеданс,  $[e]$  — тензор локальных электрических искажений.

Исследования импеданса  $[Z^S]$  в Северном Вьетнаме выявили грубое нарушение дисперсных соотношений второго рода. Согласно [Бердичевский, Дмитриев, 2010], «если трехмерные приповерхност-



**Рис. 3. Карты горизонтальных магнитных откликов.**

*a* — базовый пункт CTB, *б* — базовый пункт HLG: эллипсы горизонтальных магнитных откликов развернуты на угол 90°. В нижней правой части карт приведен масштаб  $M(r/r_6)$

ные неоднородности образуют геологический шум, нарушающий дисперсное соотношение второго рода, то в результате инверсии кажущихся сопротивлений и фаз импеданса получаются различные геологические структуры». Для устранения этого явления потребовалось разделение региональных и локальных эффектов, суммарно проявленных в значениях  $[Z^S]$ .

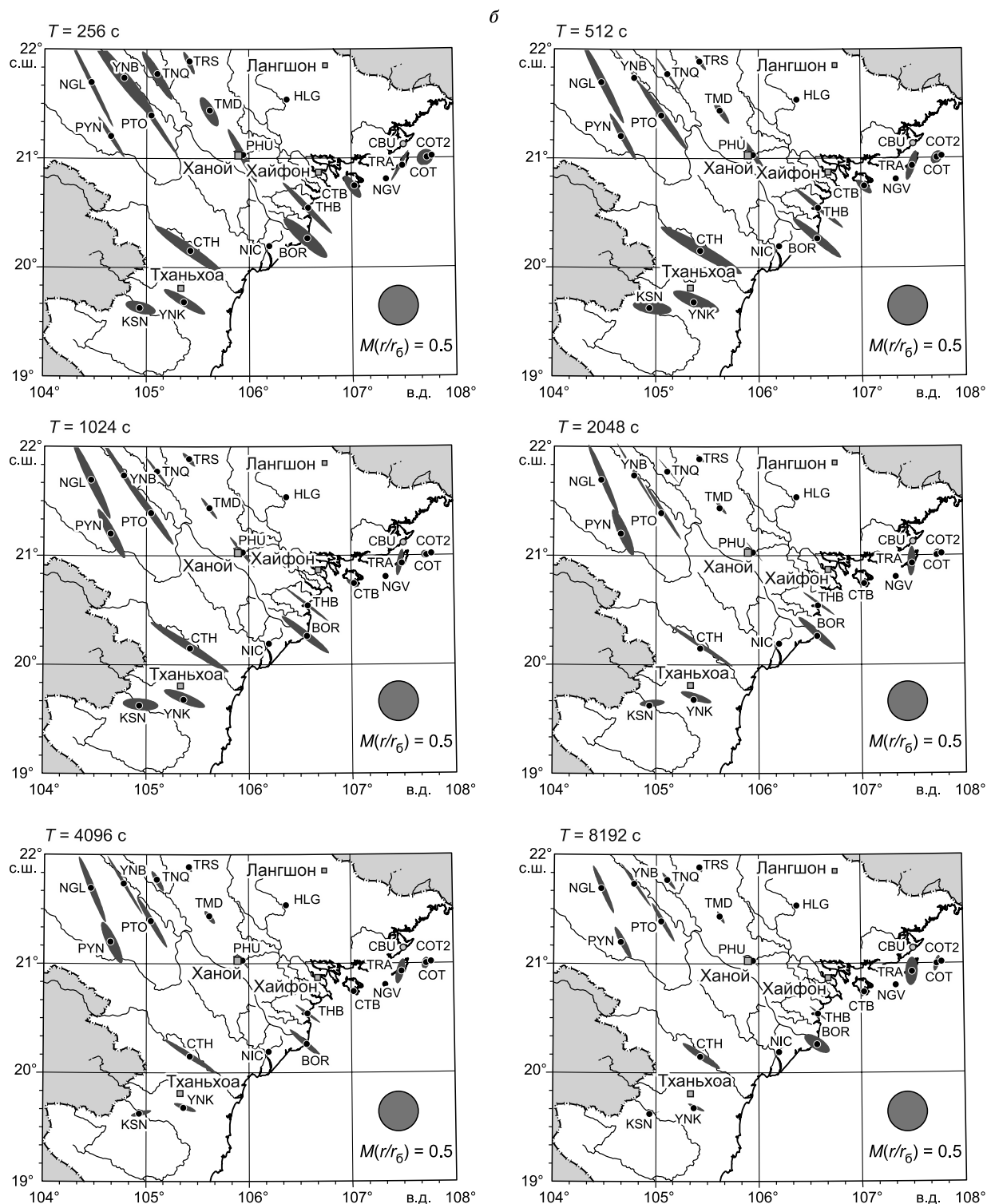


Рис. 3. (Окончание).

Возможность обнаружения и учета искажений, создаваемых локальными приповерхностными неоднородностями, изучалась многими исследователями и освещена в многочисленных публикациях. В настоящее время в практических работах широко используются методы Бара [Bahr, 1988], Грума—Бейли [Groom, Bailey, 1989]. Особенно популярен анализ фазового тензора [Caldwell et al., 2004]. Но, как показывает опыт работы МТЗ в складчатых районах (горные районы Сахалина, Сихотэ-Алиня, Вьетнама), где приповерхностные образования, как правило, высокоомные и расчлененные на разно-

масштабные отклонения низкочастотными нарушениями, перечисленные методы не дают устойчивые значения, что приводит к противоречивым геологическим построениям. Причина состоит, по-видимому, в том, что во всех применяемых методах главные направления и главные значения регионального тензора импеданса определяются как комбинации восьми расчетных компонент тензора импеданса в системе координат наблюдения электрического и магнитного полей. Каждая из этих компонент, рассчитываемая на фоне геологического и промышленного шума, вносит определенную ошибку, а затем эти ошибки складываются. Для минимизации этого недостатка нами предложен более трудоемкий метод, но дающий устойчивый по площади результат, названный азимутальным анализом кажущегося сопротивления [Никифоров и др., 2016]. Как известно [Бердичевский, Дмитриев, 2010], если оси  $x$ ,  $y$  направлены вдоль и вкост регионального двумерной структуры, соотношение (1) представляется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Z^S \\ Z^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}^S & Z_{xy}^S \\ Z_{yx}^S & Z_{yy}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \zeta_1^R \\ \zeta_2^R & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e_{xy}\zeta_2^R & e_{xx}\zeta_1^R \\ -e_{yx}\zeta_2^R & e_{yx}\zeta_1^R \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\zeta_1^R$ ,  $\zeta_2^R$  — главные значения двумерного регионального тензора,  $e_{xx}$ ,  $e_{xy}$ ,  $e_{yx}$ ,  $e_{yy}$  — компоненты вещественного тензора локальных электрических искажений.

Пусть имеются электрические линии, проложенные в направлениях север—юг ( $N$ ) и запад—восток ( $W$ ). Электрические поля, регистрируемые с помощью этих линий, выражаются через компоненты в системе координат  $x$   $y$  следующим образом:

$$E_N = a_{Nx} \cdot E_x + a_{Ny} \cdot E_y, \quad (3)$$

$$E_W = a_{Wx} \cdot E_x + a_{Wy} \cdot E_y, \quad (4)$$

где  $a_{Nx}$ ,  $a_{Ny}$ ,  $a_{Wx}$ ,  $a_{Wy}$  — вещественные коэффициенты, проецирующие значения  $E_x$  и  $E_y$  на направления север—юг и запад—восток. Объединяя (3) и (4) с (2), получим:

$$E_N = (-a_{Nx} \cdot e_{xy} - a_{Ny} \cdot e_{yy}) \cdot \zeta_2^R \cdot H_x + (a_{Nx} \cdot e_{xx} + a_{Ny} \cdot e_{yx}) \cdot \zeta_1^R \cdot H_y, \quad (5)$$

$$E_W = (-a_{Wx} \cdot e_{xy} - a_{Wy} \cdot e_{yy}) \cdot \zeta_2^R \cdot H_x + (a_{Wx} \cdot e_{xx} + a_{Wy} \cdot e_{yx}) \cdot \zeta_1^R \cdot H_y. \quad (6)$$

Поскольку в скобках заключены комбинации вещественных частотно-независимых чисел, их можно заменить некоторыми неопределенными коэффициентами:

$$-a_{Nx} \cdot e_{xy} - a_{Ny} \cdot e_{yy} = C_1, \quad (7)$$

$$a_{Nx} \cdot e_{xx} + a_{Ny} \cdot e_{yx} = C_2, \quad (8)$$

$$-a_{Wx} \cdot e_{xy} - a_{Wy} \cdot e_{yy} = C_3, \quad (9)$$

$$a_{Wx} \cdot e_{xx} + a_{Wy} \cdot e_{yx} = C_4. \quad (10)$$

Эта замена делает весьма простыми выражения (5) и (6):

$$E_N = C_1 \cdot \zeta_2^R \cdot H_x + C_2 \cdot \zeta_1^R \cdot H_y, \quad (11)$$

$$E_W = C_3 \cdot \zeta_2^R \cdot H_x + C_4 \cdot \zeta_1^R \cdot H_y. \quad (12)$$

Как видно из (11) и (12) электрические поля, измеряемые в линиях, проложенных в направлениях юг—север и запад—восток, связаны с компонентами магнитного поля вдоль и вкост простирания двумерной региональной структуры однотипно через главные значения тензора импеданса. Действие локальной неоднородности в данном случае заключается в изменении масштаба главных значений регионального тензора импеданса, что в билогарифмических координатах выражается в виде конформного смещения кривых.

Из решения уравнений (11) и (12) в широком диапазоне периодов получаются пары конформных кривых  $C_1 \cdot \zeta_2^R(T)$ ,  $C_3 \cdot \zeta_2^R(T)$  и  $C_2 \cdot \zeta_1^R(T)$ ,  $C_4 \cdot \zeta_1^R(T)$ , смещенных относительно истинных значений на величины неопределенных коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ,  $C_4$ . Их роль аналогична роли частотно-независимых множителей, определяющих интенсивность статических искажений, которые характерны для всех методов локально-региональных разложений [Бердичевский и др., 1991; Кузнецов, 2005; Бердичевский, Дмитриев, 2010].



Технически разделение локальных и региональных эффектов проводится посредством пошагового (обычно начиная от направления юг—север, и далее через  $10^\circ$ ) наращивания угла поворота системы координат  $xу$ , в которую пересчитываются горизонтальные компоненты магнитного поля  $H_x$  и  $H_y$ , исходно зарегистрированные в направлениях юг—север и запад—восток. Затем рассчитываются в широком диапазоне периодов коэффициенты  $Z_{Nx}(T)$ ,  $Z_{Wx}(T)$ ,  $Z_{Ny}(T)$ ,  $Z_{Wy}(T)$ , связывающие электрическое поле в направлениях юг—север и запад—восток с горизонтальными компонентами  $H_x$  и  $H_y$ :

$$E_N = Z_{Nx} \cdot H_x + Z_{Ny} \cdot H_y, \quad (13)$$

$$E_W = Z_{Wx} \cdot H_x + Z_{Wy} \cdot H_y. \quad (14)$$

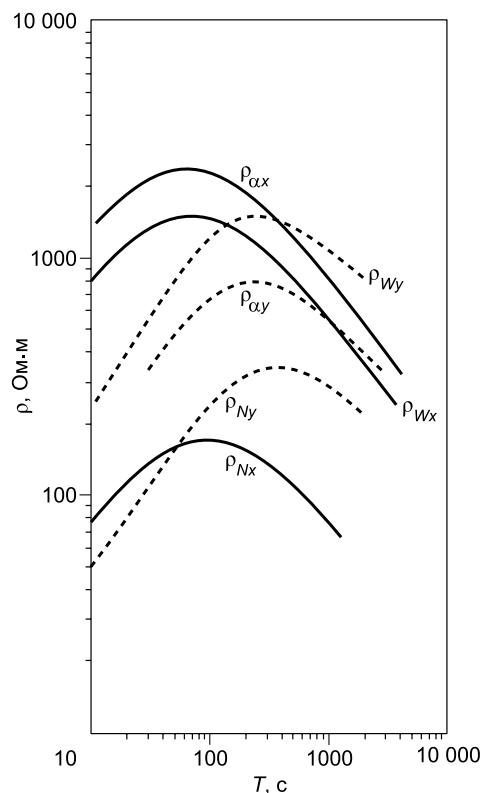
При достижении конформности кривых в парах  $|Z_{Nx}(T)|$  и  $|Z_{Wx}(T)|$ ;  $|Z_{Ny}(T)|$  и  $|Z_{Wy}(T)|$  процесс наращивания угла поворота системы координат  $xу$  заканчивается. Этот угол, согласно (11) и (12), определяет главные направления регионального тензора импеданса. При этом главные значения тензора импеданса определяются:

$$C_1 \cdot \zeta_2^R = Z_{Nx}(T), \quad C_3 \cdot \zeta_2^R = Z_{Wx}(T), \quad (15)$$

$$C_2 \cdot \zeta_1^R = Z_{Ny}(T), \quad C_4 \cdot \zeta_1^R = Z_{Wy}(T). \quad (16)$$

Отметим, что если в пункте наблюдения имеется дополнительная электрическая измерительная линия, проложенная в направлении  $\alpha$ , то с ее помощью аналогично получают коэффициенты  $Z_{\alpha x}(T)$  и  $Z_{\alpha y}(T)$ , обладающие вышеописанными свойствами. Поэтому применение для регистрации МТ-поля дополнительных линий позволяет контролировать надежность определения главных значений тензора регионального импеданса.

Используя значения  $Z_{Nx}(T)$ ,  $Z_{Wx}(T)$ ,  $Z_{Ny}(T)$ ,  $Z_{Wy}(T)$ , рассчитываются кривые кажущегося сопротивления  $\rho_{Nx}(T)$ ,  $\rho_{Wx}(T)$ ,  $\rho_{Ny}(T)$ ,  $\rho_{Wy}(T)$ , на которых более отчетливо проявлены детали формы. На рисунке 4 приведен пример кривых кажущегося сопротивления, рассчитанных по рассмотренной выше методике, из которого видно, что при положении осей  $x \sim 335^\circ$ ,  $y \sim 65^\circ$  кажущиеся сопротивления образуют две конформные группы  $\rho_{\alpha x}(T)$ ,  $\rho_{Nx}(T)$ ,  $\rho_{Wx}(T)$  и  $\rho_{\alpha y}(T)$ ,  $\rho_{Ny}(T)$ ,  $\rho_{Wy}(T)$ . Такое разделение на две поляризации указывает на то, что действительно имеется региональная структура, близкая к двумерной. Главные значения импедансов определяются с точностью до неопределенного постоянного множителя. Учитывая это обстоятельство, в дальнейшем будем рассматривать

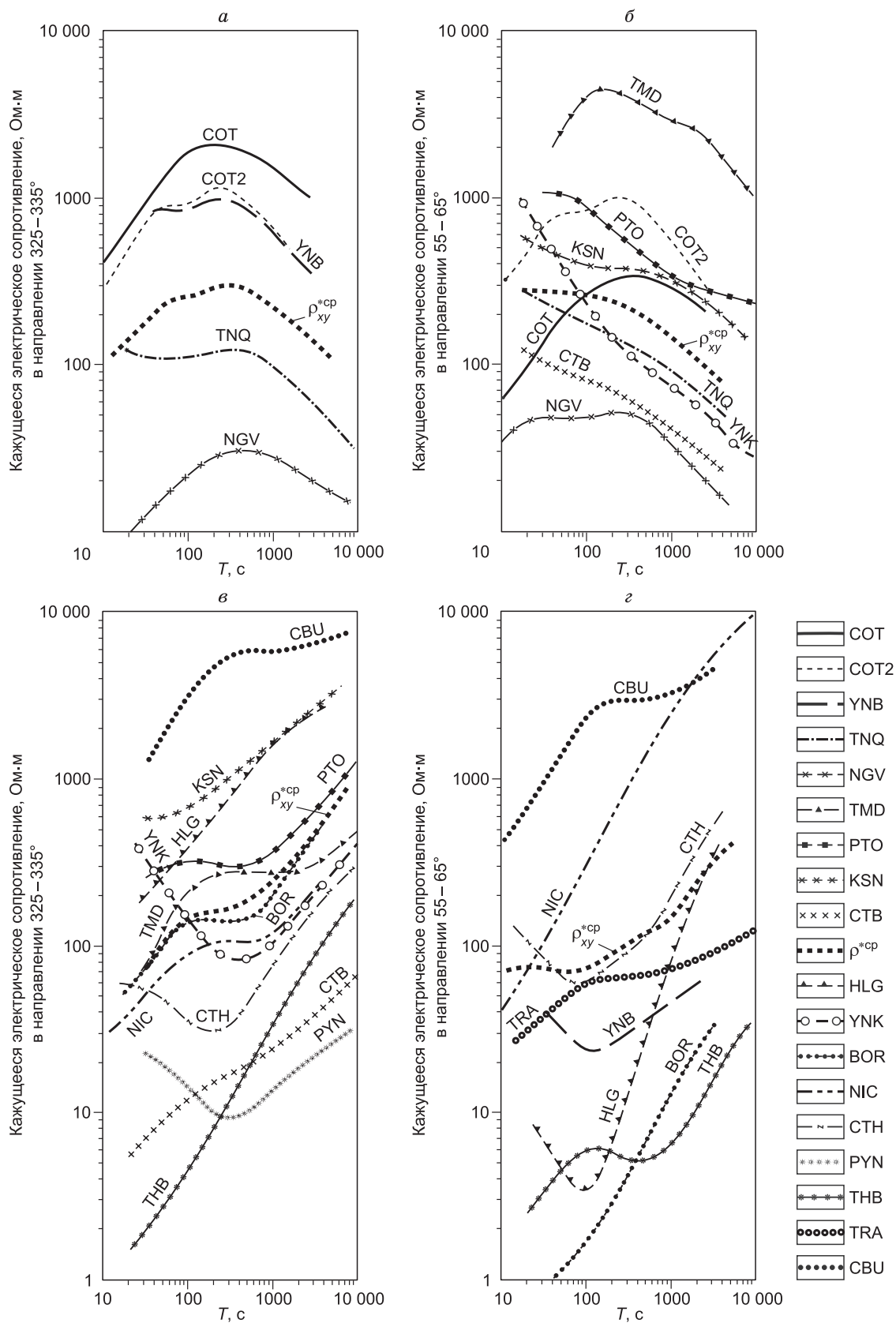


кривые  $\rho_{xy}^* = \sqrt{\rho_{Ny} \cdot \rho_{Wy}}$  и  $\rho_{yx}^* = \sqrt{\rho_{Nx} \cdot \rho_{Wx}}$ , которые, в свою очередь, также смещены относительно своего истинного положения. Факт несоответствия расчетного значения истинному отмечается символом \* над символом  $\rho$ .

На рисунке 5 приводятся кривые кажущегося сопротивления, рассчитанные рассмотренным выше способом или методом поворота тензора импеданса с дальнейшей проверкой на выполнение условий конформности (13), (14). На территории Северного Вьетнама практически во всех пунктах надежно выделяются два главных направления: первое — соответствующее направлению оси  $x$   $325$ — $335^\circ$ , второе — соответствующее направлению оси  $y$   $55$ — $65^\circ$ . Лишь в пункте TRS, который расположен в зоне дробления и, соответственно, сильных поверхностных искажений, не удалось получить  $\rho_{xy}^*$  и  $\rho_{yx}^*$ .

**Рис. 4.** Примеры кривых кажущегося сопротивления, рассчитанных в пункте СОТ по вариациям электрического поля в линиях север—юг ( $N$ ), запад—восток ( $W$ ), северо-запад—юго-восток ( $\alpha = 135^\circ$ ) и магнитным вариациям в главных направлениях тензора импеданса  $X$ ,  $Y$ .

Штриховые линии — направление оси  $x$ , равное  $335^\circ$ , сплошные линии — направление оси  $y$ , равное  $65^\circ$ .



**Рис. 5. Кривые магнитотеллурического зондирования.**

а, в — кривые МТЗ в направлении 325—335° ( $\rho_{xy}^*$ ); б, г — кривые МТЗ в направлении 55—65° ( $\rho_{yx}^*$ ). В условных обозначениях приведены типы линий для точек МТЗ, обозначенных на рис. 1.  $\rho_{xy}^{*cp}$ ,  $\rho_{yx}^{*cp}$  — среднегеометрические кривые МТЗ в группах.

Отличительным свойством кажущегося сопротивления на территории Северного Вьетнама является его поведение в длиннопериодном диапазоне  $T > 500$  с. На рисунке 5, а приведено семейство кривых  $\rho_{xy}^*$ , представленное в общих чертах конформными индивидуальными кривыми, на которых в интервале периодов  $10 < T < 100$  с имеет место восходящая ветвь, сменяемая далее максимумом и устойчивой нисходящей ветвью, продолжающейся в отдельных случаях до  $T = 10\,000$  с. Аналогично в длиннопериодном интервале представлено семейство  $\rho_{yx}^*$  (см. рис. 5, б). Отличие состоит в разнообразии форм на коротких периодах. Однако, несмотря на большой разброс уровней индивидуальных кривых в обоих семействах, среднегеометрические кривые  $\rho_{yx}^{*cp}$  и  $\rho_{xy}^{*cp}$  достаточно близки по уровню и конформны при  $T > 500$  с. Формально взаимно перпендикулярные кривые  $\rho_{yx}^{*cp}$  и  $\rho_{xy}^{*cp}$  свидетельствуют о наличии слоистого фоновое глубинного геоэлектрического разреза, в котором, начиная с некоторого рубежа, происходит уменьшение удельного электрического сопротивления с глубиной.

Иные черты глубинного геоэлектрического разреза получаются по кривым, представленным на рис. 5, в, г. Оба семейства, одно из которых образовано индивидуальными кривыми  $\rho_{xy}^*$  (см. рис. 5, в), а другое — индивидуальными кривыми  $\rho_{yx}^*$  (см. рис. 5, г) весьма похожи друг на друга. В диапазоне периодов  $10 < T < 1000$  с на отдельных кривых  $\rho_{xy}^*$  и  $\rho_{yx}^*$  имеются асимптотически восходящие ветви (на пунктах NIC, HLG, KSN, THB, BOR, CTH, CTB), иногда осложненные перегибами ( $\rho_{xy}^*$  и  $\rho_{yx}^*$  на пункте CTH,  $\rho_{yx}^*$  на пункте THB, HLG). На чаще всего в этом диапазоне на кривых присутствует минимум, положение которого на оси периодов меняется от точки к точке. На всех кривых обоих семейств, независимо от их индивидуальной формы в короткопериодном интервале, при  $T > 1000$  с присутствует крутая восходящая ветвь, которая на отдельных пунктах прослежена до  $T = 20\,000$  с. Отметим, что, несмотря на очень большой разброс уровней кажущегося сопротивления индивидуальных кривых, составляющий три—четыре порядка, геометрическое осреднение дает похожие по форме и по уровню значения  $\rho_{xy}^{*cp}$  и  $\rho_{yx}^{*cp}$  (см. рис. 5). Такой вид кривых теоретически может соответствовать плоскослоистому геоэлектрическому разрезу, подстилаемому абсолютным изолятором бесконечной мощности.

## ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕКТОНОСФЕРЫ ПЕРВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Анализ МТ и МВ откликов среды на территории Северного Вьетнама выявил относительно простую структуру аномального вертикального и аномального горизонтального поля, в основных чертах соответствующую двумерным геоэлектрическим структурам нижнего полупространства. Структура поля электрических откликов оказалась сложнее, хотя в качестве позитивного момента необходимо отметить соответствие юго-восточного направления зоны аномальных значений вертикального и горизонтального магнитных полей одному из главных направлений регионального тензора импеданса.

Районирование кривых  $\rho_{xy}^*$  и  $\rho_{yx}^*$  показало, что на сравнительно небольшой территории Северного Вьетнама в обоих главных направлениях кривые кажущегося сопротивления в своих длиннопериодных частях трансформируются от нисходящих до асимптотически восходящих. Объяснение природы восходящих ветвей имеет ключевое значение для описания геоэлектрической модели тектоносферы. В прибрежной зоне обычно аномальное увеличение кажущегося сопротивления связывают с «береговым» эффектом [Мороз, 1991; Никифоров и др., 2004; Utada, Baba, 2014]. Однако Северный Вьетнам омывается малоглубинным заливом Бакбо (изобата 100 м находится на удалении более 400 км от береговой линии района исследований), что не позволяет увязать аномальный эффект с влиянием моря. Другим убедительным и принципиально новым обстоятельством, исключаящим влияние «берегового» эффекта, является тот факт, что аномальное поведение кривых кажущегося сопротивления отмечается в трех зонах разного простиранья: одна из них протягивается вдоль побережья в северо-восточном направлении, а две другие ортогонально пересекают первую в юго-восточном направлении. Внутри этих зон на кривых вкрест по отношению к простиранью зоны (на кривых  $\rho_{xy}^*$  в зоне северо-восточного простиранья и на кривых  $\rho_{yx}^*$  в зонах юго-восточного простиранья) отмечаются аномально восходящие ветви, прослеживающиеся до периодов 10 000—15 000 с.

Можно отметить, что затянутые восходящие ветви на кривых кажущегося сопротивления нередко наблюдаются и в континентальных структурах, например в пределах кимберлитосодержащих площадей [Поспеева, 2008].

Природа аномальных МВ и МТ откликов связывается нами со спецификой слоисто-блокового строения тектоносферы, где вертикальные (крутопадающие) границы способствуют появлению вертикальных электрических токов, трансформирующихся вблизи дневной поверхности в горизонтальные токи. Исходя из предположения, что на участках территории, где последние минимальны, эффективные кажущиеся сопротивления согласуются между собой, по результатам МТЗ в таких пунктах целесообразно получить общее представление о слоистом геоэлектрическом разрезе тектоносферы. Данные в пунктах: PTO, KSN, YNK, NGL, YNB, отвечающие этому условию, послужили основой для создания слоистой фоновой модели тектоносферы Северного Вьетнама.

**Рис. 6. Сводный график распределения значений удельного электрического сопротивления пород тектоносферы Северного Вьетнама (по данным инверсии эффективного кажущегося сопротивления).**

1 — результаты инверсии сопротивления в пунктах YNK, PTO, KSN, YNB; 2 — результаты инверсии сопротивления в пункте NGL; 3 — границы области возможных значений удельного электрического сопротивления в тектоносфере Северного Вьетнама; 4 — стандартное [Ваньян, 1997] сопротивление пород тектоносферы.



Для вышеперечисленных пунктов выполнена 1D инверсия [Варенцов и др., 2003]. Результаты инверсии образуют на графике  $\rho(H)$  сравнительно широкую, закономерно меняющуюся с глубиной область возможных значений электрического сопротивления (рис. 6). Границы максимальных и минимальных значений этой области практически конформные, что благоприятствует выделению отдельных геоэлектрических горизонтов тектоносферы. График  $\rho(H)$  в интервале глубин 200—500 км практически совпадает со стандартным геоэлектрическим разрезом [Ваньян и др., 1986; Ваньян, 1997], что подкрепляет доверительное отношение и к его верхней части (0—200 км). В этом интервале глубин можно выделить следующие геоэлектрические горизонты (таблица).

Анализ соотношения инвертированного удельного электрического сопротивления обнаруживает два различающихся между собой яруса геоэлектрического разреза тектоносферы Северного Вьетнама. Верхний ярус, занимающий глубинный интервал 0—50 км, характеризуется значительным (в 2—3 порядка) занижением инвертированного электрического сопротивления относительно стандартного. В большинстве опорных пунктов наблюдения в интервале глубин 10—50 км присутствуют низкоомные (10—20 Ом·м) образования. В некоторых пунктах, расположенных в пределах разломных зон, например в пункте NGL, очень низкие сопротивления (1—10 Ом·м) фиксируются в интервале глубин 0—10 км, хотя, начиная с 30 км и глубже, распределение инвертированного сопротивления такое же, как и на всех других опорных пунктах. Этот факт может трактоваться как проявление низкоомных разломных зон, распространяющихся на глубину до 10—15 км.

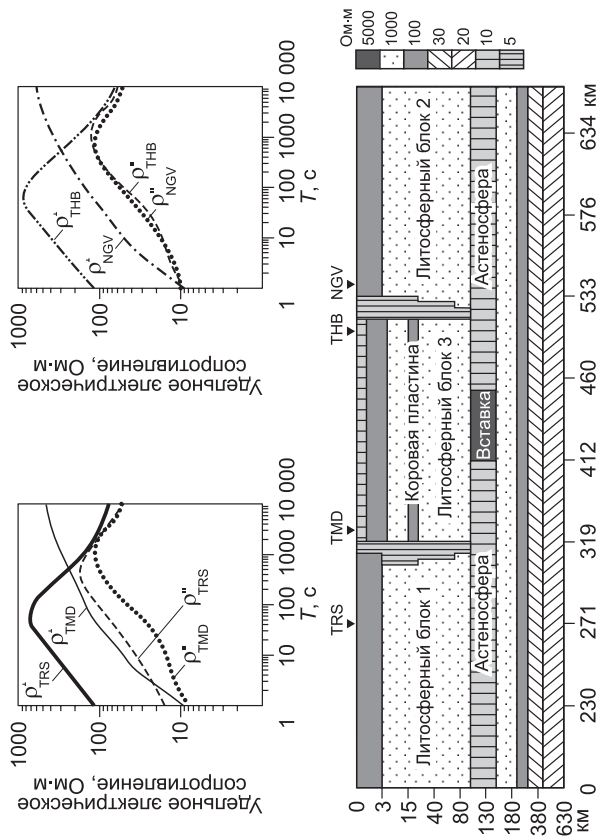
Нижний ярус геоэлектрического разреза, изученный в интервале глубин 50—450 км, характеризуется небольшим отклонением инвертированного сопротивления от стандартного. Лишь в интервале 120—250 км отмечается некоторое занижение инвертированных сопротивлений, что можно увязать с присутствием в разрезе тектоносферы электропроводящих (50—100 Ом·м) образований астеносферы.

В поиске класса неоднородностей, расположенных в рассмотренном выше слоистом геоэлектрическом разрезе, которые могли бы отражаться в виде протяженных восходящих ветвей до периодов свыше 10 000 с на кривых кажущегося сопротивления, особое внимание привлекает модель [Никифоров и др., 2014, 2018], названная нами моделью сверхглубинной флюидно-разломной системы (СГФРС). Модель СГФРС представлена тремя основными элементами. Первый из них — это высокоомное тело в виде вертикального пласта, развитого в литосфере и под ее подошвой, нарушающее непрерывность электрической проводимости астеносферы. С обеих сторон от него в литосфере располагаются субвертикальные (крутопадающие) электропроводящие сравнительно тонкие пласты, разделяющие литосферу на отдельные геоблоки. Эти пласты, отождествляемые с флюидонасыщенными зонами дробления глубинных раз-

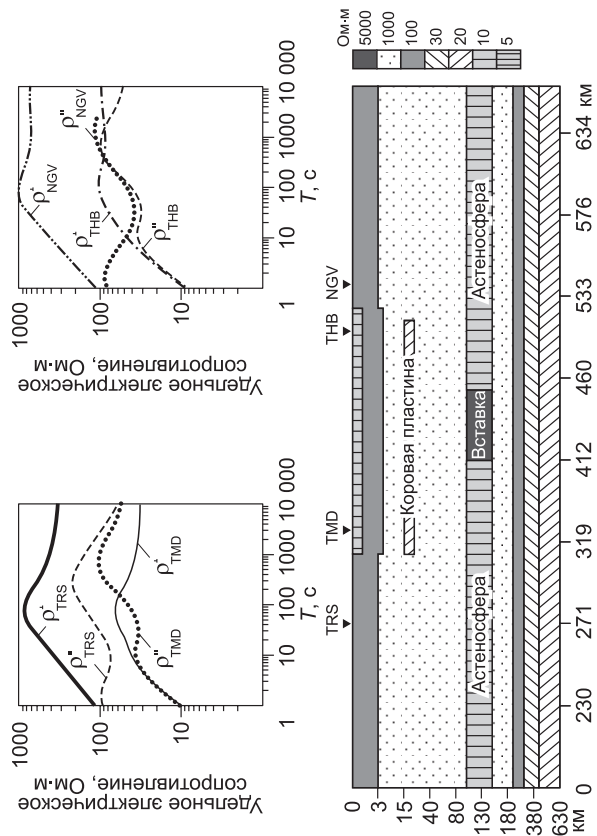
**Геоэлектрические горизонты модели тектоносферы Северного Вьетнама**

| № п/п | Название геоэлектрических горизонтов                             | Глубина кровли, км | Глубина подошвы, км | Диапазон удельных сопротивлений, Ом·м |
|-------|------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1     | Осадочная толща                                                  | 0                  | 1—2                 | 60—300                                |
| 2     | Верхняя часть консолидированной коры                             | 0—2                | 10—20               | 200—1000                              |
| 3     | Нижняя часть земной коры                                         | 10—20              | 30—50               | 15—30                                 |
| 4     | Подкоровая литосфера                                             | 30—50              | 120—150             | 1000—10 000                           |
| 5     | Астеносфера                                                      | 120—150            | —                   | 50—100                                |
| 6     | Стандартный (градиентный) геоэлектрический разрез [Ваньян, 1997] |                    |                     |                                       |

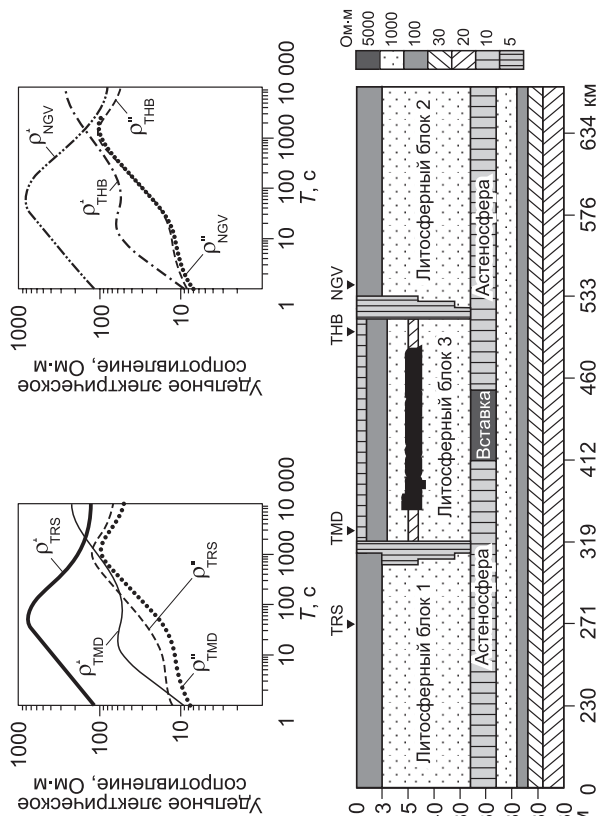
а



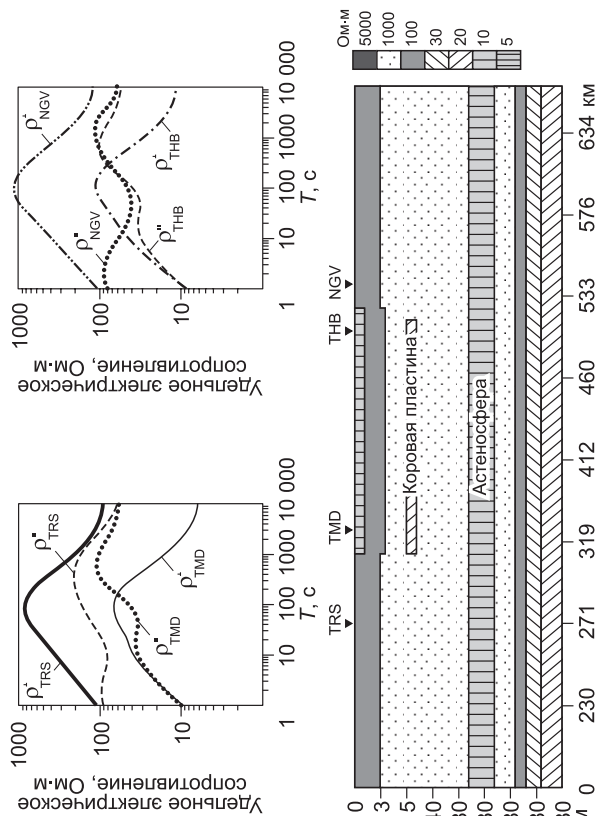
б



в



г





**Рис. 7. Теоретические кривые МТЗ для различных вариантов блоково-слоистой модели тектоносферы.**

*a* — сверхглубинная флюидно-разломная система с проводящим слоем в земной коре (15–25 км)  $\rho_k = 180 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; *б* — сверхглубинная флюидно-разломная система с проводящим слоем в земной коре (15–25 км)  $\rho_k = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; *в* — сверхглубинная система с проводящим слоем в земной коре (15–25 км) с отсутствием вертикальных проводящих пластин в литосфере; *г* — сверхглубинная система с проводящим слоем в земной коре (15–25 км) с отсутствием вертикальных проводящих пластин в литосфере и высокоомного пласта в астеносфере. Ширина вертикальных проводящих пластин 2–3 км, удельное электрическое сопротивление 5 Ом·м.

ломов, обеспечивают гальваническую связь между подлитосферными проводящими горизонтами и проводящими образованиями осадочного чехла. Благодаря такой связи создается электрическая цепь, по которой индуцируемый в подлитосферных горизонтах ток, обогащенный длиннопериодными составляющими, поступает в осадочную толщу. На участке между выходами электропроводящих разломов к поверхности этот дополнительный ток трансформирует частотную характеристику отклика среды.

Закономерности трансформации частотных характеристик откликов (а значит и кажущегося сопротивления) в зависимости от деталей модели блоково-слоистой тектоносферы Северного Вьетнама изучались в двумерном варианте (рис. 7). На рисунке приводятся результаты моделирования по профилю DD', проходящему в северо-западном направлении через точки MT3 NGV, CTB, TMD, TRS. В слоисто-блоковый геоэлектрический разрез с параметрами, приведенными в таблице, помещена система СГФРС. Ее высокоомный элемент шириной около 40 км и удельным электрическим сопротивлением  $\rho_v = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  разделяет электропроводящую астеносферу ( $\rho_{аст.} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) на электрически разобщенные части. В высокоомной литосфере ( $\rho_{лит.} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) помещены вертикальные проводящие пласты ( $\rho_{раз.} = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) мощностью 2 км, имитирующие флюидонасыщенные зоны глубинных разломов. Верхняя часть разреза представлена слоем, отражающим осадочную толщу переменной мощностью (до 3 км) и сопротивления ( $\rho_{ос.} = 10\text{--}100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). В центральной части модели, соответствующей Ханойской впадине, сопротивление осадочной толщи составляет 10 Ом·м. Присутствующая в разрезе СГФРС создает аномальный эффект на поперечных кривых кажущегося сопротивления в виде затягивания их восходящих ветвей, что отчетливо демонстрируется результатами расчета моделей *A* и *B*, отличающихся только значениями удельного электрического сопротивления проводящей пластины ( $\rho_{кор.}$ ) в земной коре в интервале глубин 15–25 км. При значении  $\rho_{кор.} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и выше восходящая ветвь  $\rho^{\perp}$  во всех пунктах на участке профиля между разломами монотонно возрастает в диапазоне периодов  $1 < T < 10\,000 \text{ с}$  (см. рис. 7, *a*). При значении  $\rho_{кор.} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  на фоне общего подъема  $\rho^{\perp}$  за счет шунтирующего действия коровой проводящей пластины образуется четко выраженный минимум, который на периодах свыше 100 с сменяется восходящей ветвью (см. рис. 7, *б*). В обеих моделях за пределами СГФРС в литосферных блоках 1 и 2 поперечные кривые в диапазоне периодов  $100 < T < 10\,000 \text{ с}$  представлены нисходящими ветвями, которые на периоды  $T > 1000 \text{ с}$  совпадают с нисходящими ветвями на продольный кривых  $\rho^{\parallel}$ . На всем протяжении профиля в литосферных блоках 1 и 2 кривые  $\rho^{\perp}$  остаются практически неизменными. Подробный анализ результатов показывает, что в моделях *a* и *б* переходные полосы, в которых поперечные кривые трансформируются от «нормального» типа к «аномальному», составляют несколько километров. Трансформация продольных кривых  $\rho^{\parallel}$  в этих моделях происходит постепенно в зонах, достигающих сотен километров в ширину. Низкоомная коровая пластина отражается на поперечных кривых  $\rho^{\perp}$  в виде минимума. При этом минимум  $\rho^{\perp}$  заметно смещен в сторону длинных периодов относительно соответствующего минимума на кривой  $\rho^{\parallel}$ . Положение минимума  $\rho^{\perp}$  тесным образом связано с параметрами проводящей пластины: глубиной залегания и удельным электрическим сопротивлением, что повышает возможности интерпретации данных.

Отсутствие в разрезе тектоносферы сквозьлитосферных электропроводящих вертикальных зон значительно сказывается на поведении  $\rho^{\perp}$ . Кривая  $\rho^{\perp}$  становится слабо чувствительной к присутствию в земной коре горизонтальной проводящей пластины: вместо четкого минимума появляется слабый перегиб в интервале периодов 20–40 с (см. рис. 7, *в*). В длиннопериодном диапазоне  $T > 100 \text{ с}$  на всем профиле кривые  $\rho^{\perp}$  мало изменяют свою форму, представляющую выположенную линию, протягивающуюся до  $T > 10\,000 \text{ с}$ . По этим кривым установить положение проекции высокоомной астеносферной вставки на дневную поверхность не представляется возможным. Уровень конформного смещения  $\rho^{\perp}$  определяется удельным сопротивлением приповерхностного слоя осадочной толщи.

Если в разрезе тектоносферы отсутствует также и разделяющая проводимость астеносферы высокоомная вставка, то поперечные кривые  $\rho^{\perp}$  практически теряют чувствительность к проводящим пластинам в земной коре (см. рис. 7, *г*). Их форма теперь определяется параметрами основных горизонтальных слоев тектоносферы и слабо меняется по профилю. Уровень кажущегося сопротивления в каждом конкретном пункте

наблюдения варьирует вслед за значениями электрического сопротивления приповерхностного слоя осадочной толщи. Вдали от приповерхностной неоднородности (пункты 1, 4) кривые  $\rho^\perp$  занимают свой «истинный» уровень. При этом длиннопериодные падающие ветви  $\rho^\perp$  совпадают с таковыми на  $\rho^\parallel$ , а в диапазоне периодов  $10 < T < 1000$  с различие форм  $\rho^\perp$  и  $\rho^\parallel$  определяется их различной чувствительностью к присутствию в разрезе линейных проводников.

Аналогичные закономерности в трансформированных кривых МТЗ были получены ранее на основе моделирования геоэлектрического разреза тектоносферы по профилю АА' вдоль береговой линии северного замыкания зал. Бакбо, где зафиксировано наличие двух СГФРС юго-восточного простирания [Никифоров и др., 2014, 2016, 2018]. Одна из них тяготеет к разломной зоне р. Красная, а другая — к разломной зоне Каобанг-Теньен.

Таким образом, получено убедительное обоснование механизма монотонного роста кажущегося сопротивления по мере увеличения периодов вплоть до 20 000 с вызванного присутствием в разрезе тектоносферы структуры СГФРС. Вводя в различные части модели вертикальные и горизонтальные электропроводящие тела и изменяя их параметры, можно получить все разнообразие форм кривых МТЗ, характерное для экспериментальных данных. При этом присутствие в разрезе низкоомных (флюидонасыщенных) разломов, выходящих в основание осадочной толщи, отмечается резким изменением формы поперечных кривых  $\rho^\perp$ . Применяя этот подход, было проведено районирование тектоносферы Северного Вьетнама с выделением трех СГФРС (рис. 8).

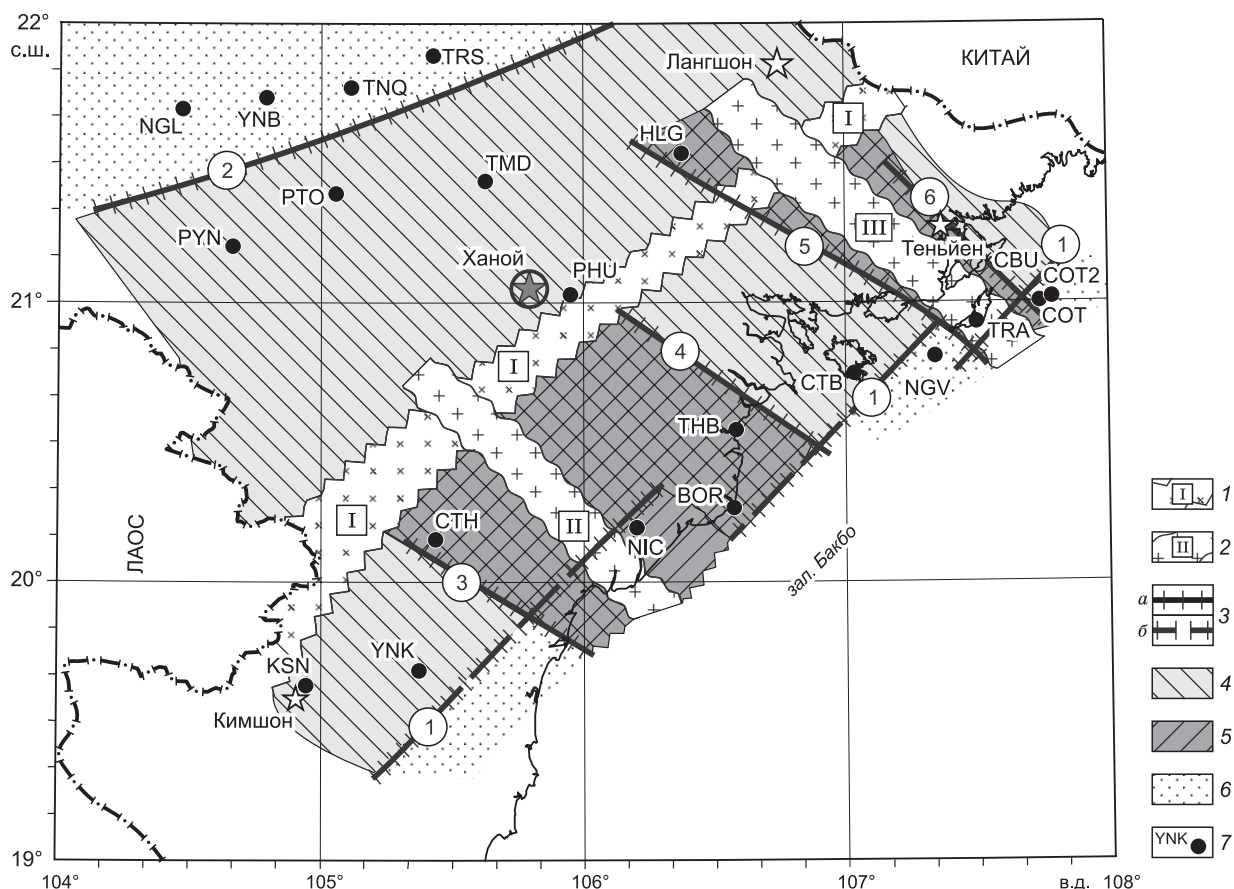
Используя в качестве практического критерия для геоэлектрического районирования смену нисходящих ветвей  $\rho_{xy}^*$  на восходящие в диапазоне периодов  $T > 1000$  с, несложно выделить границу 2, отождествляемую с выходом в основание осадочной толщи низкоомного (флюидонасыщенного) крутопадающего проводника (разлома), обеспечивающего гальваническую связь пород осадочного чехла с электропроводящей астеносферой (см. рис. 8). К северу от границы 2 на пунктах NGL, YNB, TNQ, TRS кривые  $\rho_{xy}^*$  представлены нисходящими ветвями при  $T > 1000$  с. В пунктах, расположенных южнее этой границы, на  $\rho_{xy}^*$  появляются восходящие в диапазоне  $10 < T < 2000$  с (HLG, CTB, THB) или осложненные минимумом восходящие ветви. Далее на юг в пунктах COT, COT2, NGV и NIC снова фиксируются кривые  $\rho_{xy}^*$ , представленные нисходящей ветвью при  $T > 1000$  с. Положение этих пунктов допускает проведение южной границы смены типов кривых (граница 1 на рис. 8) в виде кулисообразно сочленяющихся отрезков. Таким образом, между границами 1 и 2 располагается зона аномального поведения  $\rho_{xy}^*$  в длиннопериодном диапазоне, связанная с наличием в электропроводящей астеносфере высокоомного нарушения I, ось которого простирается в северо-восточном направлении по линии Кимшон–Лангшон. Тектонические элементы 1, I, 2, обуславливающие аномальное поведение  $\rho_{xy}^*$ , формируют СГФРС северо-восточного простирания.

Анализ кажущегося сопротивления в северо-восточном направлении позволяет выделить две аномальные зоны  $\rho_{yx}^*$ , связанные с присутствием в астеносфере высокоомных нарушений, имеющих юго-восточное простирание.

Первая зона (см. рис. 8, элементы 3, II, 4) обосновывается наблюдениями МТЗ в пунктах СТН, NIC, BOR, THB. Эти пункты расположены южнее высокоомного астеносферного нарушения I (Кимшон–Лангшон). В пунктах PYN и PTO, расположенных к северу от нарушения I, восходящие ветви на кривых  $\rho_{yx}^*$  не проявлены. Рассмотренное поведение  $\rho_{yx}^*$  в западной части исследованной территории позволяет предположить, что высокоомное литосферное нарушение II, сопровождающее разломную систему р. Красная, развито лишь в южной части района исследования и, вероятно, под акваторией зал. Бакбо. Оно быстро затухает в континентальной части в северо-западном направлении после пересечения линии Кимшон–Лангшон. С обеих сторон рассмотренное высокоомное нарушение ограждено низкоомными сквозьлитосферными проводящими пластами (разломными зонами) 3 и 4 (см. рис. 8).

Вторая зона (см. рис. 8, элементы 5, III, 6), связанная с высокоомным литосферным нарушением III, зафиксирована данными в пунктах HLG, CBU, TRA в восточной части площади исследования. Нарушение III пересекает линию Кимшон–Лангшон, но затухает ли оно сразу после пересечения или протягивается далеко в северо-западном направлении на данном этапе исследования неизвестно. На изученной территории оно ограждено с обеих сторон низкоомными сквозьлитосферными разломами 5 и 6. Положение последнего показано условно, так как граница смены типов кривых  $\rho_{yx}^*$  в этом месте отмечена в одном пункте COT.

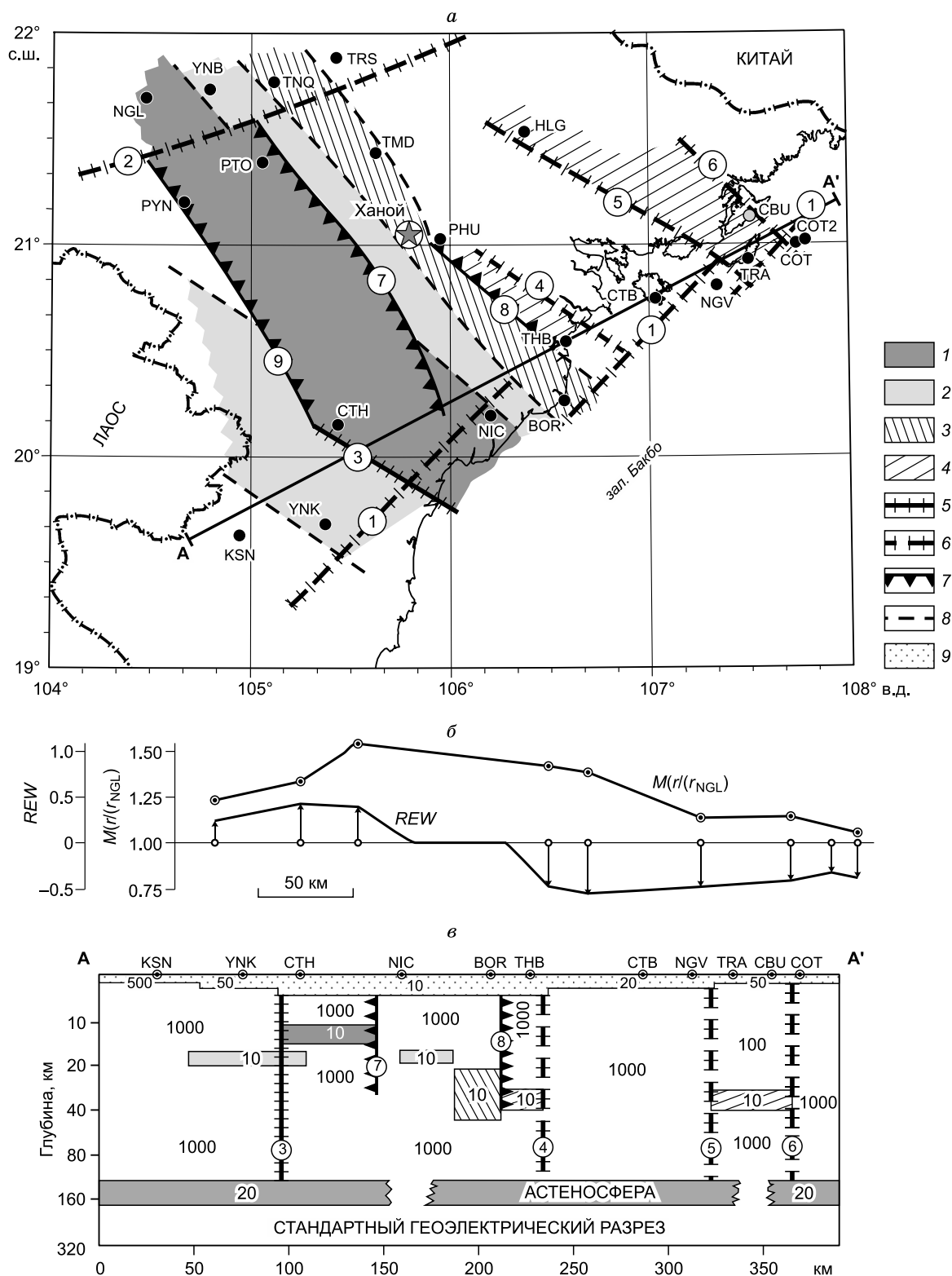
Совместный анализ кривых  $\rho_{xy}^*$  и  $\rho_{yx}^*$  позволяет получить общее представление о каркасе глубинной геоэлектрической модели Северного Вьетнама. Он представлен пересекающимися почти ортогонально сверхглубинными флюидно-разломными крутопадающими системами, развитыми в слоистом разрезе. Более детальный анализ кажущегося сопротивления, прежде всего осложнений на восходящих ветвях кривых  $\rho_\kappa$ , дает определенные представления о пространственном расположении электропроводящих образований в коре и подкоровой литосфере.



**Рис. 8. Схема положения проекций сверхглубинных флюидно-разломных систем (СГФРС) тектоносферы Северного Вьетнама.**

1 — проекция на дневную поверхность системы высокоомных нарушений в астеносфере северо-восточного простираения Кимшон—Лангшон (I); 2 — проекции систем высокоомных нарушений в астеносфере юго-восточного простираения: II — система разломной зоны р. Красная, III — система Тенгьен-Каобанг; 3 — выходы низкоомных (флюидонасыщенных) сквозьлитосферных субвертикальных разломов: а — установленные, б — предполагаемые; 4 — зона СГФРС северо-восточного простираения, 5 — зоны СГФРС юго-восточного простираения; 6 — территории с нормальным кажущимся сопротивлением; 7 — пункты МТЗ и их названия. Цифрами в кружках пронумерованы выходы низкоомных сквозьлитосферных разломов.

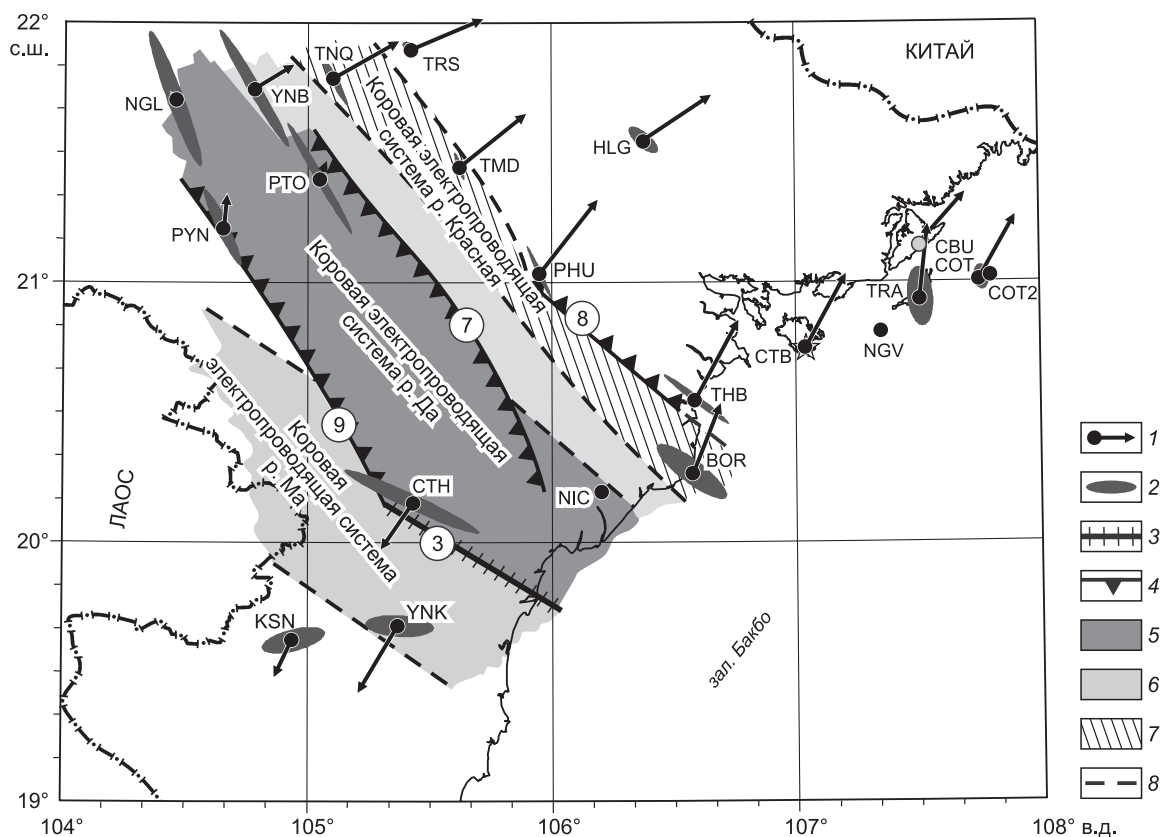
В семействе кривых  $\rho_{xy}^*$  (кажущееся сопротивление в северо-западном направлении) выделяется обширная группа, для которой характерно наличие минимума в интервале  $50 < T < 500$  с, предшествующего восходящей ветви при  $T > 1000$  с. Исходя из численного моделирования геоэлектрического разреза, такой характер  $\rho_{xy}^*$  обусловлен присутствием пластов в различных глубинных интервалах. Моделирование положения этих минимумов на оси периодов, их ширины, а также положения на оси кажущегося сопротивления позволяет составить представление о глубинных интервалах развития низкоомных образований (рис. 9, в). При значении удельного электрического сопротивления в диапазоне  $10 < \rho < 20$  Ом·м экспериментальные кривые  $\rho_{xy}^*$  лучше всего соответствуют своей формой модельным кривым. Как видно из разреза по профилю А—А' (Кимшон—Кото), проводящие коровые образования максимально приближены к дневной поверхности на глубину около 10 км в районе пунктов СТН и НИС. Территориально эта зона подъема коровых проводящих образований простирается в северо-западном направлении и четко фиксируется на севере участка в пунктах РУН и РТО (см. рис. 9, а). Тектонически она соответствует разломной системе р. Да. Эта электропроводящая коровая зона погружается в северо-восточном направлении на глубину кровли до 20 км. Судя по тому, что в пунктах ВОР и ТМД коровая проводимость отмечается только для северо-западного направления и не фиксируется в ортогональном направлении, можно предположить, что в полосе с осевой линией ТНҚ, ТМД, ВОР в средней части литосферы (20—50 км) развита система сближенных низкоомных разломов северо-западного направления, которым на поверхности соответствует разломная зона р. Красная. Интересно отметить, что в пункте ТНҚ, расположенном за пределами аномальной зоны СГФРС Кимшон—Лангшон, коровый прово-



**Рис. 9. Геоэлектрическая модель тектоносферы Северного Вьетнама.**

*а* — схема электропроводности; *б* — график типперов ( $REW$ ) и горизонтальных магнитных откликов ( $M(r/r_{NGL})$ ); *в* — геоэлектрический разрез тектоносферы по профилю А—А'. 1, 2 — низкоомные породы в верхней, средней и нижней частях земной коры; 3 — анизотропно-проводящие породы в средней части литосферы; 4 — анизотропно-проводящие породы вблизи границы Мохо; 5 — сквозьлитосферные сплошные низкоомные разломы; 6 — сквозьлитосферные дискретные низкоомные разломы; 7 — коровые низкоомные разломы; 8 — проекции границ проводимости в литосфере; 9 — породы осадочного чехла. Цифрами в кружках обозначены разломы; цифры на разрезе *в* обозначают удельные сопротивления пород блоков (Ом·м).





**Рис. 10. Элементы геоэлектрической модели тектоносферы, определяющие магнитные отклики среды.**

1 — типперы; 2 — эллипсы горизонтальных откликов относительно пункта СТБ; 3 — низкоомные (флюидонасыщенные) сквозь-литосферные разломы; 4 — низкоомные (флюидонасыщенные) коровые разломы; 5, 6 — низкоомные пластины в земной коре: 5 — интервал глубин 10—15 км, 6 — интервал глубин 15—20 км; 7 — зона анизотропно-проводящих в северо-западном направлении образований в интервале глубин 20—40 км; 8 — проекции границ коровых продольных тел на дневную поверхность. Цифрами в кружках обозначены низкоомные разломы, выходящие на поверхность.

дящий объект представлен иначе, чем внутри самой СГФРС, что хорошо укладывается в результаты моделирования. В этом пункте коровый проводник отмечается на  $\rho_{xy}^*$  в виде минимума на фоне общего уменьшения кажущегося сопротивления.

К западу от разломной системы р. Да располагается, возможно, обособленная электропроводящая коровая зона в интервале глубин 15—25 км. Она хорошо проявлена на кривых  $\rho_{xy}^*$  в пунктах YNK и СТН. Опираясь на данные азимутального анализа можно уверенно утверждать, что в этих пунктах ось  $X$  имеет направление 310—320°, в отличие от 325—335° на всех остальных пунктах. Кроме того, как показано на рис. 2, эта зона, ассоциирующаяся с разломной системой р. Ма, устойчиво на всех периодах разворачивает стрелку типпера на пункте PYN ближе к северу.

Закономерность изменения кажущегося сопротивления  $\rho_{yx}^*$  в северо-восточном направлении указывает на возможное присутствие в геоэлектрической модели нескольких электропроводящих в северо-восточном направлении (анизотропных) зон. Особенность их заключается в том, что они имеют северо-западное, ортогональное к проводимости, простираение. Как известно [Бердичевский и др., 1991; Бердичевский, 2010], отражение корового проводника на кривых, ортогональных к простираению зон, возможно в случае, если он имеет гальваническую связь с осадочной толщей. Учитывая это свойство кривых МТЗ, в модель дополнительно введены низкоомные разломы 7, 8 и 9, проникающие на глубину около 40 км и обеспечивающие указанную связь (см. рис. 9, а, б).

В зоне, ограниченной разломами 7 и 9, на пунктах PYN, РТО, СТН проводящие коровые образования одновременно, хоть и различным образом, проявляются на взаимно перпендикулярных кривых  $\rho_{yx}^*$  и  $\rho_{xy}^*$ . Можно предположить, что таким образом на кривых МТЗ отражается изотропно-проводящая коровая пластина, залегающая, согласно сделанным путем численного моделирования оценкам, в ин-



тервале глубин 10—15 км. В пункте NGL (к северу от разломной линии 2) и NIC (к югу от разломной линии 1) на ортогональных к простиранию зоны кривых  $\rho_{yx}^*$  не проявлены осложнения, указывающие на наличие корового проводника. Это, вероятно, объясняется отсутствием в этих частях разреза низкоомных разломов, обеспечивающих гальваническую связь рассматриваемого корового проводника с осадочной толщей. По этой причине он проявлен только на кривых  $\rho_{xy}$ .

В зонах между разломами 8—4 и 5—6 низкоомные коровые проводники фиксируются только на ортогональных к простиранию кривых  $\rho_{yx}^*$ . Согласно расчетам, эти анизотропно-проводящие образования распространены в интервале глубин 30—40 км, т. е. расположены вблизи границы Мохо [Никифоров и др., 2014, 2018].

Анализ магнитных откликов (рис. 2; 3, а, б; 9, б) показывает, что они связаны главным образом с элементами глубинной геоэлектрической модели, простирающимися в северо-западном направлении. К таковым относится сквозьлитосферный разлом 3, коровые разломы 7, 8, 9, коровые электропроводящие системы рек Ма, Да, Красная (рис. 10).

Наиболее приподнятая коровая электропроводящая система р. Да (глубина верхней кромки около 10 км) совместно с перечисленными низкоомными разломами, выходящими в основание осадочной толщи (на глубине не более 2 км), образуют на дневной поверхности зону минимальных значений типперов и максимальных значений горизонтальных магнитных откликов  $M(r/r_{\text{NGL}})$  или  $M(r/r_{\text{CTB}})$ . Границы зон коровых электропроводящих систем, а также низкоомные разломы располагались в модели максимально согласованно по отношению к большим осям эллипсов  $M(r/r_{\text{CTB}})$  (см. рис. 10).

К северо-востоку от этой, максимально приближенной к поверхности проводящей системы, типперы REW согласованно направлены в северо-восточных азимутах. Их слабое загухание обусловлено наличием еще одной более погруженной коровой электропроводящей системы р. Красная, расположенной гипсометрически ниже коровой системы р. Да. Поскольку электропроводящая система р. Красная максимально проявлена в интервале глубин 20—50 км, ее влияние на характер эллипсов  $W(r/r_{\text{CTB}})$ , как и назначения типперов REW непосредственно над системой, невелико.

Юго-западнее сквозьлитосферного разлома 3, ограничивающего проводящую систему р. Да, гипсометрически ниже (15—20 км) расположена электропроводящая коровая системы р. Ма. Она несколько больше развернута к западу. С этим азимутальным несогласием с системой р. Да, очевидно, связано изменение направления типперов на пункте PYN и на больших осях эллипсов  $W(r/r_{\text{CTB}})$  в пунктах KSN и YNK.

На данном этапе исследований не обнаружена выраженная связь магнитных откликов среды с разломами 1 и 2 северо-восточного направления, а также с разломами 8, 4, 5, 6 северо-западного направления. Перечисленные разломы представляют собой главные элементы глубинной геоэлектрической модели, с которыми связаны характерные аномалии кажущегося сопротивления. Учитывая, что для образования аномалий кажущегося сопротивления важна вертикальная проводимость разломов, а для образования магнитных аномалий — их горизонтальная проводимость, можно считать, что перечисленные разломы не являются сплошными электропроводящими в горизонтальных направлениях телами.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведение электромагнитных исследований в длиннопериодном диапазоне ( $10 < T < 20\,000$  с) по программам российско-вьетнамского научного сотрудничества на территории Северного Вьетнама способствовало получению новых результатов как в области электромагнитных явлений в гетерогенном по электропроводности разрезе тектоносферы, так и в области получения новых представлений о глубинном строении в зоне сочленения Индо-Китайского и Южно-Китайского геоблоков. Как выяснилось, важнейшей особенностью электромагнитного процесса в длиннопериодном диапазоне является гальваническое взаимодействие глубинных электропроводящих систем (проводящая астеносфера и подастеносферные горизонты) с проводящей системой осадочного чехла, включая водную толщу. Взаимодействие осуществляется посредством субвертикальных (крутопадающих) проводников электрического тока, ассоциирующихся с флюидной системой разрывных и трещинных нарушений, образующих сквозьлитосферные разломы.

В зоне суперпозиции приповерхностных и глубинных токов, различающихся по своим частотным характеристикам, образуются (генерируются) аномальные кривые кажущегося сопротивления, обязательной составляющей которых является восходящая ветвь при  $T > 1000$  с. Индивидуальные особенности аномальных кривых МТЗ определяются также наличием в геоэлектрическом разрезе литосферы проводящих тел, прилегающих к проводящим субвертикальным разломам (каналам), и неоднородностью электрического сопротивления приповерхностного слоя, в котором производится регистрация теллурических токов. В этой связи особое место в интерпретации данных занимает разделение локальных и региональных магнитотеллурических эффектов. Предложенные выше подходы к решению этой зада-

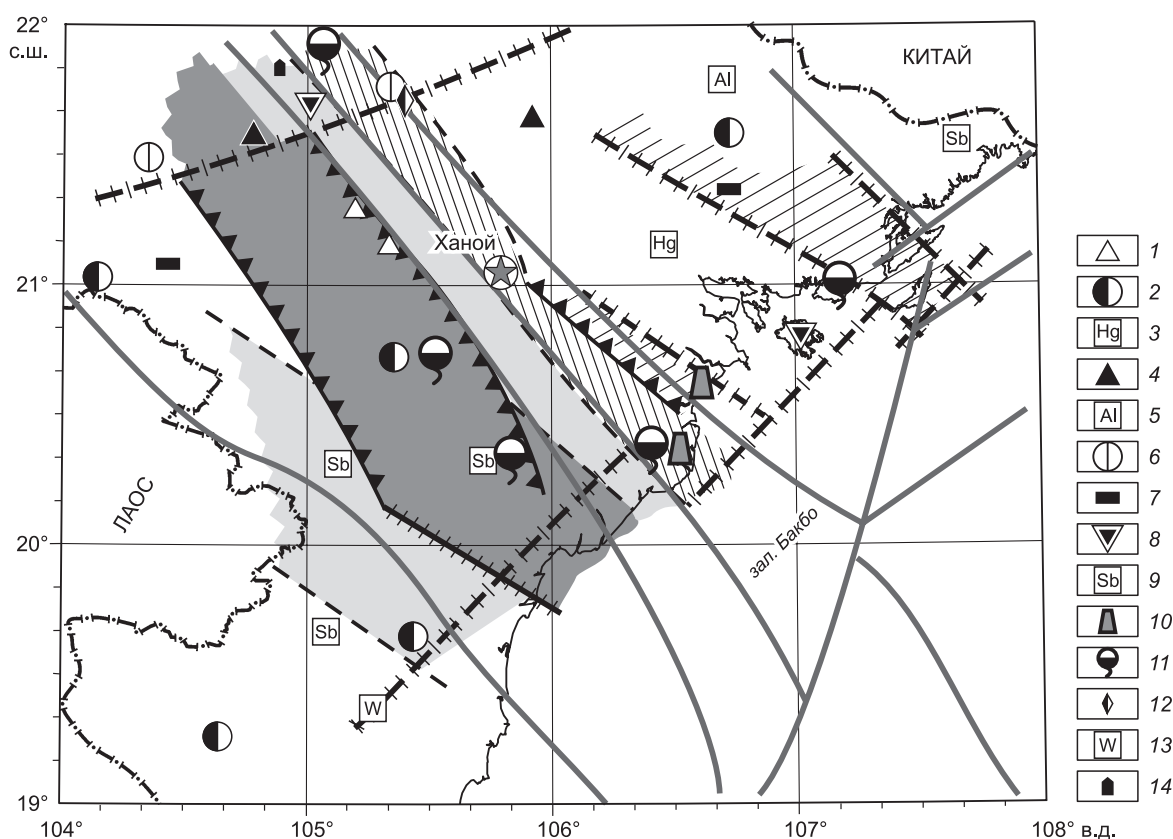
чи позволили привести исходные, практически несогласующиеся между собой импедансные отклики к системе с устойчиво выраженными закономерностями изменения по площади исследований.

Основными элементами модели являются разнонаправленные вертикальные электропроводящие пластины (пласты), отождествляемые с флюидонасыщенными разломами различных рангов, разделяющие слоистый разрез тектоносферы (весьма похожий по параметрам на разрез Сахалина, Камчатки, Японии) на геоблоки различных масштабов.

Аномальные вертикальное и горизонтальное магнитные поля отличаются простой структурой, в общих чертах соответствующей двумерной модели. При этом положение коровых проводящих тел северо-западного простирания в междуречье Ма–Красная–Ло, выделенных по интерпретации кажущегося сопротивления, хорошо удовлетворяет характеру типперов  $REW$  и эллипсов  $M(r/r_{СТВ})$ . Вместе с тем магнитные аномалии слабо реагируют на ряд проводящих тел в литосфере как северо-западного, так и северо-восточного простирания. Это приводит к выводу, что разломные зоны в одних случаях могут обладать как вертикальной, так и горизонтальной проводимостью, а в других — только вертикальной проводимостью. Свойства электрических и магнитных полей разным образом реагировать на элементы геоэлектрической структурной тектоносферы придают комплексированию МТЗ и МВЗ важное значение. Оно позволяет получить более полную картину глубинного строения, которую каждый метод в отдельности не дает.

Положение главных разломов региона относительно элементов предположенной геоэлектрической модели тектоносферы показано на рис. 11. Как видно, разломы рек Красная, Тям, Ло совпадают с проекциями на дневную поверхность границ проводящих призм в земной коре. Они также хорошо согласуются с выходами в основание осадочной толщи фрагментов флюидонасыщенных разломов 3, 7, 8, 9 (см. рис. 9). Как отмечалось выше, эти элементы модели создают аномалии магнитного поля.

На рисунке 11 также представлена схема расположения рудных, нефтяных и гидротермальных месторождений в геоэлектрической структуре региона. Здесь отчетливо видно, что местоположение за-

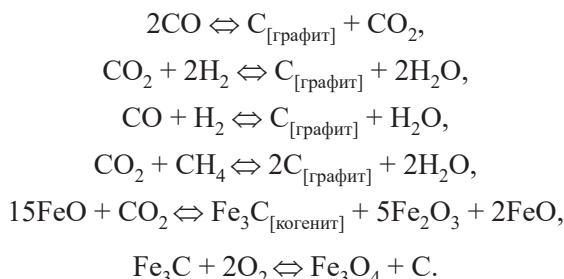


**Рис. 11. Связь геоэлектрической структуры с расположением полезных ископаемых и основными разломами Северного Вьетнама.**

Полезные ископаемые: 1 — пирит, 2 — золото, 3 — ртуть, 4 — железо, 5 — алюминий, 6 — Pb-Zn руда, 7 — медная руда, 8 — асфальты, 9 — сурьма, 10 — газовое месторождение, 11 — гидротермальные источники, 12 — титан, 13 — вольфрам, 14 — гранит. Остальные усл. обозн. см. на рис. 9, 10.

лежей контролируется линиями выходов вертикальных электропроводящих нарушений преимущественно северо-восточного направления (разломные зоны 1 и 2). При этом большинство месторождений располагается вблизи пересечения нарушений 1 и 2 с нарушениями северо-западного направления. Можно отметить также, что месторождения нефти и газа вблизи дельты р. Красная и месторождения асфальта на о. Катба и вблизи г. Йенбай связаны с выходами в основание осадочной толщи электропроводящих сквозьлитосферных разломов. Это характерно, по-видимому, для всей зоны сочленения Азиатского материка с окраинными морями. В нефтегазоносных бассейнах Сахалина обнаружена точно такая же закономерность расположения месторождений углеводородов относительной геоэлектрической структуры [Никифоров и др., 2016].

Связь геологических объектов и явлений с элементами геоэлектрической структуры указывает на то, что геологические процессы сопровождаются изменением удельного электрического сопротивления вмещающих пород. Сухие горные породы характеризуются высоким удельным сопротивлением  $10^4$ — $10^6$  Ом·м. Под воздействием температуры и давления оно монотонно уменьшается с глубиной. Природа горизонтов повышенной проводимости подробно рассмотрена в работах [Киссин, 1994; Ваньян, 1997] и в большинстве моделей связывается в основном с процессом частичного плавления верхнемантийного вещества и дегидратации корового вещества в определенных обстановках. Изучению глубинных вертикальных геоэлектрических структур в настоящее время уделено недостаточное внимание. В работах [Никифоров и др., 2013, 2016, 2018] в качестве одной из возможных причин присутствия в тектоносфере вертикальных геоэлектрических структур мы рассматриваем глубинную дегазацию Земли. Главными компонентами глубинного флюида считаются газы  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  [Кадик, Луканин, 1986]. В зависимости от их количественного соотношения, температуры, давления, деформационно-напряженного состояния, петрологических свойств вмещающих пород и т.д. происходит трансформация состояния флюида. Обычно рассматривается несколько видов реакций в земной коре и верхней мантии, в результате которых образуется электропроводящий материал [Кадик, Луканин, 1986]:



В процессе прокачки глубинного флюида разномасштабные трещины, образующие разломную зону, по которой происходит перенос мантийного вещества в верхние слои земной коры, заполняются электропроводящим материалом — продуктом вышепредставленных реакций. Проводящие тела становятся «видимыми» для методов глубинной электроразведки. Поиск вертикальных проводящих зон важен для решения фундаментальных и прикладных задач. Обычно линейные электропроводящие тела в литосфере создают аномалии продольного кажущегося сопротивления и аномалии магнитных откликов. Их интерпретация имеет известный недостаток: сближенные электропроводящие тела отражаются как единое целое. Но, несмотря на это, аномально проводящие зоны даже в интегральном представлении активно изучаются на всех континентах в самых различных тектонических ситуациях. С ними связаны месторождения алмазов, руд, углеводородов, термальные источники, сейсмически-активные линейaments и т.д.

В процессе эволюции разломной зоны через нее может в больших количествах выноситься в верхние слои легкоплавкий материал и осаждаться тугоплавкий рстит [Магматические..., 1988]. Если последний накопится в количествах, достаточных для образования плохо проводящего электрический ток барьера, разделяющего астеносферу на отдельные блоки, возникнет геоэлектрическая модель (см. рис. 7), подробно рассмотренная выше. Ее особенность и уникальность состоит в том, что она создает возможность за счет прослеживания аномалий поперечного кажущегося сопротивления надежно трассировать выходы глубинных электропроводящих (флюидонасыщенных) разломов в основание осадочной толщи, оценивать глубину их проникновения в литосферу, детально изучать блоковую структуру литосферы и коровые проводящие пластины. Такая модель хорошо объясняет характер магнитотеллурических и магнитовариационных аномалий Северного Вьетнама и дает ключ к пониманию особенности природы слоисто-блокового строения литосферы. В частности, в северо-западной части изучаемой площади, по мнению [Долгинов и др., 2011], в тектоносфере на глубине около 250 км расположена «горячая точка» — зона плавления верхнемантийного вещества. По этой причине в астеносфере на «го-

рячей точке» температурные условия не способствуют накоплению «твердых» высокоомных реститов. Отсутствие на этом участке территории высокоомного барьера в астеносфере делает малоинформативными поперечные кривые кажущегося сопротивления. Вследствие этого МТ и МВ отклики приобретают свойства, характерные для двумерных сред.

## ВЫВОДЫ

1. Территория Северного Вьетнама расположена на пересечении ортогональных сверхглубинных разломных систем северо-восточного и юго-восточного простирания. В геоэлектрическом отношении эти системы представлены вертикальными высокоомными нарушениями, разделяющими электропроводящую астеносферу и низкоомными (2—5 Ом·м) пластинами (зона разлома), пронизывающими всю литосферу и обеспечивающими гальваническую связь проводящей астеносферы с осадочной толщей.

2. Низкоомные (флюидонасыщенные) сквозьлитосферные разломы, выходящие в основание осадочной толщи и надежно фиксируемые методом МТЗ, контролируют расположение залежей рудных и нефтегазовых месторождений.

3. Представленные структурные особенности глубинного разреза тектоносферы Северного Вьетнама объясняют причину того, что на исследованной площади импедансные и магнитные отклики электромагнитного поля формируются различными элементами геоэлектрической модели. Комплексирование МТ и МВ методов позволяет получать более полное представление о геоэлектрической структуре изучаемого района.

4. Предложен метод разделения локальных и региональных магнитотеллурических эффектов, позволивший надежно определить главные направления регионально двумерной структуры и конфигурацию кривых кажущегося сопротивления в главных направлениях.

5. Рекомендуется продолжить исследования МТ и МВ методами разрывных флюидонасыщенных нарушений, выявленных на суше, в заливе Бакбо. Их изучение совместно с изучением электрических параметров перекрывающих кайнозойские отложения может стать основой для выработки направлений продолжения нефтегазопроисловых работ на шельфе региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ДВО РАН «Дальний Восток» в рамках научных проектов ВАНТ 19-021 и 18-1-004, госбюджетных тем 0271-2019-0002, 0144-2019-0021 и проекта VAST QTRU 02.01/19-20.

## ЛИТЕРАТУРА

**Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.** Модели и методы магнитотеллурики. М., Научный мир, 2010, 680 с.

**Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Куликов В.А.** О нормализации магнитотеллурического поля флюидонасыщенными разломами // Физика Земли, 1991, № 3, с. 45—51.

**Ваньян Л.Л.** Электромагнитные зондирования. М., Научный мир, 1997, 219 с.

**Ваньян Л.Л., Егоров И.В., Шиловский А.П.** О магнитотеллурическом возбуждении вытянутых проводящих зон земной коры и астеносферы // Физика Земли, 1986, № 6, с. 70—76.

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

**Варенцов И.М.** Новые алгоритмы в программной системе обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований // Вопросы естествознания, 2016, № 3 (11), с. 48—52.

**Варенцов И.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р., Наливайко К.В.** Система передаточных операторов электромагнитного поля для массива синхронных зондирований Bear // Физика Земли, 2003, № 2, с. 30—61.

**Долгинов Е.А., Као Т.Д., Ле В.З., Нго Т.Л., Башкин Ю.В.** О возможной глубинной природе сейсмической аномалии Северо-Западного Вьетнама и ее связи с реактивированной системой «горячей точки» поздней юры — раннего мела // Изв. вузов. Геология и разведка, 2011, № 2, с. 11—16.

**Кадик А.А., Луканин О.А.** Дегазация верхней мантии при плавлении. М., Наука, 1986, 85 с.

**Киссин И.Г.** Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Физика Земли, 1994, № 4, с. 30—40.

**Кузнецов В.А.** О нормализации МТ-кривых, искаженных S-эффектом // Физика Земли, 2005, № 7, с. 91—96.

**Магматические горные породы. Т. 5. Ультраосновные породы / Под ред. О.А. Богатикова, Е.Е. Лазько, Е.В. Шаркова. М., Наука, 1988, 508 с.**

**Мороз Ю.Ф.** Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М., Наука, 1991, 182 с.



**Никифоров В.М., Пальшин Н.А., Старжинский С.С.** Трехмерный береговой эффект в Приморье // Физика Земли, 2004, № 8, с. 56—69.

**Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Дмитриев И.В., Старжинский С.С., Шкабарня Г.Н.** Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеанская геология, 2013, т. 32, № 1, с. 54—64.

**Никифоров В.М., Долгих Г.И., Кулинич Р.Г., Шкабарня Г.Н., Дмитриев И.В., Фунг Ван Фэк, Вуонг Хунг Ван.** Новые данные о глубинном строении северной части зал. Бакбо Южно-Китайского моря (по результатам магнитотеллурических исследований) // ДАН, 2014, т. 458, № 6, с. 696—700.

**Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Жуковин А.Ю., Каплун В.Б., Пальшин Н.А., Варенцов И.М., До Хуы Куонг, Фунг Ван Фать, Хоанг Ван Вуонг, Старжинский С.С.** Системы вертикальных нарушений геоэлектрического разреза тектоносферы в нефтегазоносных областях Сахалина (Россия) и Тонкинского залива (Вьетнам) по данным МТЗ // Тихоокеанская геология, 2016, т. 35, № 6, с. 3—15.

**Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Каплун В.Б., Жуковин А.Ю., Варенцов И.М., Пальшин Н.А., До Хуы Куонг, Нгуен Нху Чунг, Зыонг Куок Хунг.** Электропроводящие элементы сверхглубинных флюидно-разломных систем как индикаторы сейсмически-активных зон восточной окраины Евразийского континента (по данным магнитотеллурических зондирований) // ДАН, 2018, т. 480, № 6, с. 730—738.

**Поспеева Е.В.** Применение среднемасштабных магнитотеллурических зондирований для выявления глубинных критериев кимберлитоперспективных площадей // Тихоокеанская геология, 2008, т. 27, № 3, с. 18—32.

**Bahr K.** Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // J. Geophys., 1988, v. 62, p. 119—127.

**Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C.** The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int., 2004, v. 158, p. 457—469.

**Dinh V.T., Harder S., Huang B.S., Trinh V.B., Doan V.T., Lai H.P., Tran A.V., Nguyen H.Q., Nguyen V.D.** An overview of northern Vietnam deep crustal structures from integrated geophysical observations // Terr. Atmos. Oceanic Sci., 2018, v. 29, № 4, p. 371—386.

**Doan T.V., Dinh T.V., Nguyen Y.T.** Deep structure feature of the Red River fault zone and its geodynamic implication from magnetotelluric data // Tạp chí Địa chất (Vietnam Journal of Geology), 2001, A 267, p. 21—28 (in Vietnamese, with English abstract).

**Groom R.W., Bailey R.C.** Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three dimensional galvanic distortion. // J. Geophys. Res., 1989, v. 94, p. 1913—1925.

**Korepanov V., Klymovych Y., Kuznetsov O., Pristay A., Marusenkov A., Rasson J.** New INTERMAGNET fluxgate magnetometer // Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., 2007, C-99 (398), p. 291—298.

**Minh L.H., Toan D.V., Son V.T., Thang N.C., Duan N.B., Thanh N.H., Thanh L.T., Marquis G.** Preliminary results of processing the sounding magnetotelluric data of Hoa Binh-Thai Nguyen and Thanh Hoa-Ha Tay profiles // Tạp chí Các Khoa Học Về Trái Đất (Vietnam Journal of Earth Science), 2011, № 33 (1), p. 18—28 (in Vietnamese, with English abstract).

**Nielsen L.H., Mathiesen A., Bidstrup T., Vejbek O.V., Dien P.T., Tiem P.V.** Modelling of hydrocarbon generation in the Cenozoic Song Hong Basin, Vietnam: a highly prospective basin // J. Asian Earth Sci., 1999, v. 17, p. 269—294.

**Phach P.V.** Tectonic structure of the Red River fault zone // Vietnam J. Geol., 2001, Series B, № 17—18, p. 1—11 (available in English on [https://www.researchgate.net/publication/315316574\\_TECTONIC\\_STRUCTURE\\_OF\\_THE\\_RED\\_RIVER\\_FAULT\\_ZONE](https://www.researchgate.net/publication/315316574_TECTONIC_STRUCTURE_OF_THE_RED_RIVER_FAULT_ZONE)).

**Phuong N.H.** Probabilistic assessment of earthquake hazard in Vietnam based on seismotectonic regionalization // Tectonophysics, 1991, v. 198, № 1, p. 81—93.

**Utada H., Baba K.** Estimating the electrical conductivity of the melt phase of a partially molten asthenosphere from seafloor magnetotelluric sounding data // Phys. Earth Planet. Int., 2014, v. 227, p. 41—47.

**Varentsov Iy.M.** Arrays of simultaneous electromagnetic soundings: design, data processing, analysis, and inversion // Electromagnetic sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. Amsterdam, Elsevier, 2015, Chapter 10, p. 271—299.

*Рекомендована к печати 28 августа 2019 г.  
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.,  
после доработки — 3 июня 2019 г.*