

## Геоэлектрические модели Евразийского складчатого пояса (трехмерная интерпретация)

В.В. Белявский  
ЦГЭМИ ИФЗ РАН  
victor.belyavsky@list.ru

---

### АННОТАЦИЯ

Трехмерная интерпретация магнитотеллурических и магнитовариационных данных с помощью программ трехмерного математического моделирования, инверсии матриц импедансов  $[Z_{об}]$  и магнитовариационных  $[m_{об}]$  позволила построить глубинные геоэлектрические модели литосферы Северного Кавказа, Памира, Тянь-Шаня, Алтае-Саянского и Корякско-Камчатского регионов. В качестве стартовых моделей принимались результаты одномерной и двумерной инверсий матриц импедансов. При картировании глубинных частей геоэлектрического разреза инвертировались и их инвариантные значения. Коровые аномалии повышенной проводимости, коррелирующие с положением доменов, характеризующихся пониженными скоростями продольных волн в методах МОВЗ и ГСЗ, объяснялись насыщением их водной фракцией флюида, зависящего от геодинамического состояния блоков коры. В частности, очаговых зон землетрясений, вулканических камер и глубинных разломов. Графитизированные образования проявляются аномалиями высокой проводимости в дислоцированных нижнепалеозойских комплексах Южного Тянь-Шаня, которые не выражены дефицитом скорости продольных волн.

Key words: магнитотеллурическое зондирование, трехмерная инверсия, флюид

---

### Введение

Перед региональными геофизическими исследованиями ставились задачи по:

- изучению глубинного строения литосферных плит;
- созданию региональных основ прогноза месторождений полезных ископаемых;
- разработке критериев оценки сейсмической опасности путем картирования проводящих блоков, оценки степени их раздробленности и проницаемости, изучению строения очаговых зон сильных землетрясений и вулканических камер.

Поставленные задачи решались с помощью программ трехмерного математического моделирования Maxwell (Druskin, Knizhnerman, 1994) и 3D инверсии WSINV3DMT (Siripunvaraporn et al., 2005) магнитотеллурических данных  $[Z_{об}]$ , программ по их адаптации при рассмотрении инвариантных характеристик матрицы импедансов и визуализации результатов (Белявский, 2017). В выделенных блоках, описывающих проводимость нижнего структурного этажа литосферы Северного Кавказа, Памира, Тянь-Шаня, Алтае-Саянского и Корякско-Камчатского регионов, оценено содержание водной фракции флюида ( $\Phi_p$ ) с учетом полной её связанности (Shankland, Waff, 1977) и частичной (Shimojuku et al, 2014).

### Методика построения трехмерных моделей

Этапы построения трехмерных геоэлектрических моделей рассматриваемых регионов в себя включали:

1. Составление стартовых геоэлектрических моделей с помощью процедур одномерной (Белявский, Сухой, 2004) и двумерной инверсий (Варенцов, 2002) основных компонент матриц  $[Z_{об}]$ , максимальных и минимальных кривых фазового тензора (Caldwell et al., 2004) и индукции ( $Z_{об}^{maxH}$ ,  $Z_{об}^{minH}$ ) (Counil et al., 1986).
2. Построение 2D-3D моделей -  $\rho_m(H_m)$  методом подбора к экспериментальным инвариантным кривым MTЗ 2D-3D модельных, рассчитанных по программам Maxwell и FDM - 2D (Варенцов, 2002).
3. Оценка на тестовых моделях разрешающей способности инвариантов матриц импедансов  $[Z_m]$  и магнитовариационных  $[m_m]$  к определению параметров литосферных блоков. При оценке их проводимости с помощью матриц  $[m_m]$  рассчитывались и кривые TE- мод (Белявский, 1990).
4. Адаптирование программы WSINV3DMT к восстановлению распределения УЭС ( $\rho_m$ ) в тестовых 3D моделях по значениям матриц  $[Z_m]$  и их инвариантов (Белявский, 2020).
5. Построение по программам WSINV3DMT и Maxwell трехмерных геоэлектрических моделей  $\rho_{in}(H_{in})$  и  $\rho_m(H_m)$  в пределах Евразийского складчатого пояса.

6. Оценка зависимости распределения  $\rho_{in}(H_{in})$  и  $\rho_m(H_m)$  от сейсмических и иных геолого-геофизических параметров.

### Северо-Кавказский регион

Построенные 3D геоэлектрические стартовые модели  $\rho_m(H_m)$  Северо-Кавказского региона (Белявский, 2007) выделили под складчатыми структурами Большого Кавказа, Минераловодским выступом и грязевыми вулканами Таманского полуострова проводящие комплексы. Трехмерная инверсия (WSINV3DMT) скорректировала их параметры. Из рисунка 1 видно, что аномалии с  $\rho_{in}(H_{in}) = 1-3$  Ом·м контролируют положение глубинных разломов и грязевых вулканов Таманского полуострова. Это связано с их повышенным флюидонасыщением -  $\phi_p$ , рассчитанным при минерализации в 16 г/л (Лаврушин, 2012).

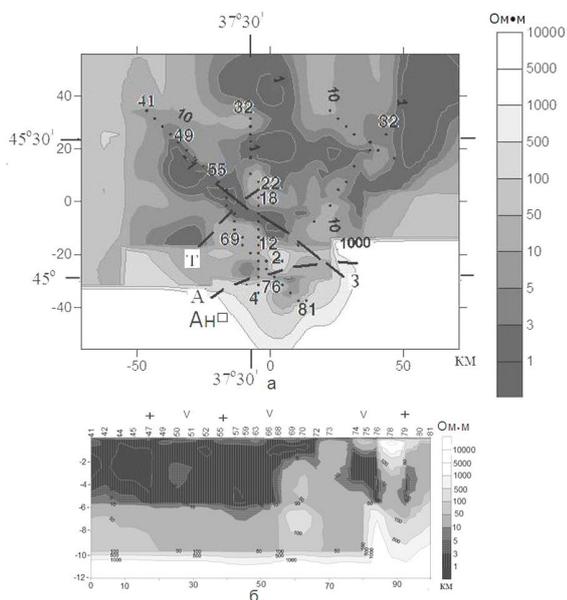


Рисунок 1. Северо-Западный Кавказ. Распределение УЭС: а - на глубине 5.6 км (цифры с подсветкой – номера т. МТЗ (Ан – г. Анапа). Глубинные разломы: Т – Таманский, А – Ахтырский, З – Западно-Кавказский; б – геоэлектрический разрез (программа WSINV3DMT) вдоль профиля Тамань-Новоросийск (МТЗ 41 - 81); Сверху дано положение грязевых вулканов (+) и разломов (V) (Лаврушин, 2012).

Содержание в них водной фракции флюида изменяться от  $\phi_p = 5 - 15\%$  у грязевых вулканов Таманского полуострова и Минеральных вод, где  $\rho_{in} = 1 - 3$  Омм, и до  $\phi_p = 0.3 - 2\%$  в блоках под Северо-Кавказским краевым массивом ( $\rho_m = 10 - 30$  Омм), погружающихся с 8 км до 15 км от вулканических структур Эльбруса под Минераловодский выступ. Разломы, секущие и

ограничивающие структуры Большого Кавказа ( $\rho_m = 10 - 100$  Омм) характеризуются содержанием флюида на глубинах 10 - 30 км до  $\phi_p = 0.2 - 2\%$  (Белявский, 2007).

### Среднеазиатский регион

В пределах Южного Тянь-Шаня положение кровли верхнего (1 - 10 км) проводящего слоя (1D инверсия кривых МТЗ) контролируется глубиной залегания графитизированных нижнепалеозойских ( $bs_1 + bs_2$ ) комплексов с  $\rho = 1 - 3$  Омм (Азаров и др., 1998). На рисунке 2 представлен геоэлектрический разрез  $\rho_m(H_m)$  (программа FDM 2D) под профилем, пересекающим Бухарскую ступень (МТЗ 173-174), Мурунтауское рудное поле (т. 160 -161), Кустанайско-Кураминский плутоно-вулканический пояс (т. 150-152) и Сырдарьинский микроконтинент (т. 143 – 144).

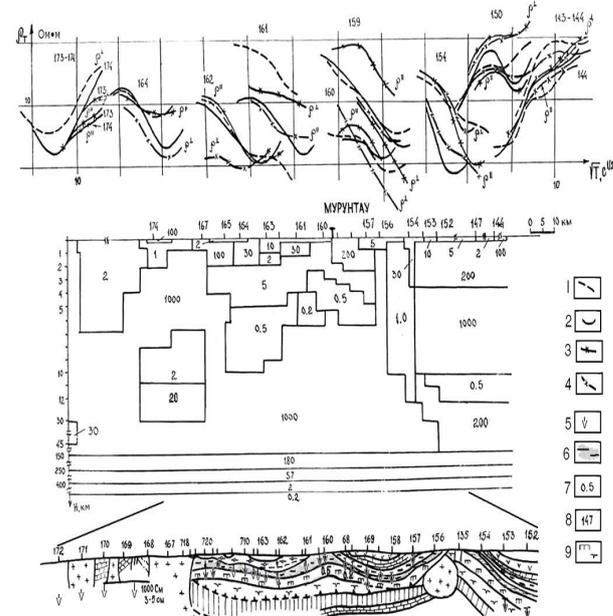


Рисунок 2. Модельные (1 -  $\rho_{in}^E$ , 2 -  $\rho_{in}^H$ ) и экспериментальные (3 -  $\rho_{in}^{maxH}$ , 4 -  $\rho_{in}^{minH}$ ) кривые МТЗ. Под ними сечение 2D модели и геологический разрез: 5 – кровля проводящего пирит-углеродистого комплекса «Мурун» (1D инверсия), 6 – его положение в разрезе; 7 – УЭС блоков; 8 – т.н. МТЗ; 9 – геологические комплексы (C-S-Pr).

В 3D модели, построенной с помощью программы Maxwell, суммарной проводимостью до  $S_{cr} = (10-1) \cdot 10^3$  См и мощностью до 10 км характеризуются палео- и допалеозойские образования Тянь-Шаня. Они протягиваются на сотни километров, испытывая влияние флюидов глубинных разломов. Это отличает их от микроконтинентов (Муонкумо-Наратским,

Бадахшанским и Казахским щитом), где глубже 30 км выделяются блоки с  $S_{cr} \leq 500$  См. На Северном Тянь-Шане комплексы с  $S_{cr} = 3 \cdot 10^3$  См полосой шириною до 30 км контролируют положение линии Николаева. Под Чуйской впадиной их проводимость уменьшается до 400 См (Белявский, Спичак, 2016).

Проводящие образования Памира и Срединного Тянь-Шаня (профиль Зоркуль – Токтогуль), на глубинах 6 - 15 км коррелируют с волноводами, расположенными в нижней части палеозойских комплексов, а их низкие УЭС обусловлены содержанием в них водной фракции флюида (Белявский, 2017).

### Алтае-Саянский регион

Трехмерные геоэлектрические модели, построенные при 3D инверсии импедансов  $Z_{ob}^{maxH}$ ,  $Z_{ob}^{minH}$  (Council et al., 1986), показали на наличие проводящих коровых блоков, ассоциирующихся с положением активизированных разломов и очаговых зон землетрясений. На рисунке 3 представлено распределение в них водной фракции флюида (Белявский, Лозовский, 2020). Расчеты проведены с учетом адсорбции части ионов солей NaCl на стенках пор [Shimoyuku et al., 2014], при реперных значениях флюидонасыщения -  $\phi_{in}$ , оцененных в блоках коры по дефициту скорости продольных волн методами МОВЗ-ГСЗ.

Основная часть гипоцентров землетрясений расположена над кровлей коровых проводников, вблизи глубинных низкоомных разломов с  $\rho_{in} = 10-200$  Ом, которые отвечают положению доменов с повышенным затуханием обменных волн землетрясений ( $K > 0.0009$  дБ/км) и пониженными скоростями продольных волн (МОВЗ – ГСЗ). Это свидетельствует о повышенной трещиноватости и обводненности блоков коры в очаговых зонах землетрясений или вблизи них. Максимальное содержание  $\phi_{in} = 0.3 - 0.9\%$  свойственно Тээлинскому, Самагалтайскому и Каа-Хемскому очагам, расположенным в перекинальных частях Тувинской котловины и Убсунурской впадины.

Разломы северного и северо-западного простирания характеризуются наиболее низкими УЭС ( $\phi_{in} = 0.15 - 1\%$ ). В их пределах составляющие вектора девиаторного растяжения коры (Ребецкий и др., 2013), ориентированы ортогонально к их простиранию, что ведет к росту содержания флюида. Это соответствует наблюдаемому дефициту скорости продольных волн в 2 - 4.2% на глубинах 10 - 30 км, например, под Кызылской впадиной и её бортами, где  $\phi_{in} = 0.3 - 0.5\%$ . Меньшими значениями ( $\phi_{in} = 0.1 - 0.15\%$ ) характеризуются блоки коры под

Чуйской впадиной, вдоль которой ориентированы векторы растяжения.

### Корякско-Камчатский регион

Многообразие тектонотипов региона, включающие континентальные и океанические структуры, зоны с высокой сейсмичностью и вулканической активностью, субдукции и рифтогенеза, позволяет оценить их влияние на распределение электропроводности, которая контролируется флюидонасыщением и концентрацией расплавов горных пород. Положение низкоомных областей коррелирует с доменами, имеющими пониженные значения скоростей продольных волн.

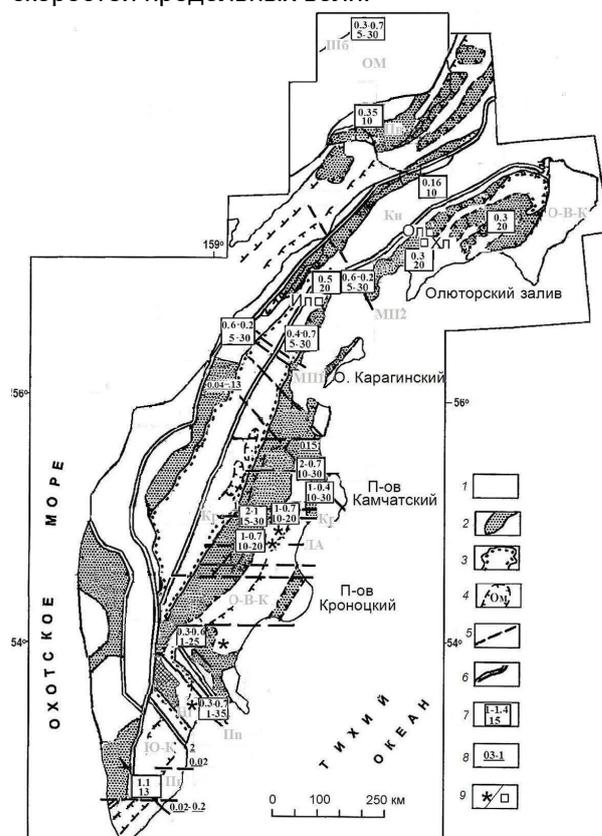


Рисунок 4. Распределение водной фракции флюида на схеме тектонического районирования Камчатско-Корякского региона (Апрелков и др., 1991), где: 1 - Срединные массивы, платформы, породы мафического ряда, верхнемеловые офиолитовые формации и вулканиты; 2 - кайнозойские прогибы; 3, 4 – границы СФЗ, Центрально-Камчатского вулканического пояса, поднятий и впадин: **ОМ** – Омолонский массив, **О-В-К** – Олюторско–Восточно–Камчатская СФЗ, **Кн** – Корякское нагорье, **Нг** – Начикинский грабен, **Пг** – Прибрежный горст, **Ю-К** – Южно-Камчатский прогиб; 5 - глубинные разломы: **Кр** – Крестовский, **ЛА** – Лаучан-Андриановский, **Пп** – Петропавловский, **ШБ** – Шайбовеемский, **МП1** и **МП2** – межплитные; 6 - границы главных

тектонических элементов; 7 - содержание водной фракции флюида  $\phi_p^f$  (%) (верхний ряд) и его глубина (нижний ряд), 8 -  $\phi_p^f$  - в разломах; 9 - действующие вулканы и очаговые зона землетрясений.

Из рисунка 4 видно, что блоки с высоким содержанием флюида расположены: на пересечении структур субмеридиональной ориентации (**О-В-К**) и широтной: Императорский палеорифт (Начикинский грабен), Алеутская вулканическая дуга (зона Крестовского и Лаучан-Андриановского разломов). В этих областях разгрузки тектонических напряжений и дилатансии аккумулируется флюид и расплав. Оцениваемые в них величины флюидонасыщения ( $\phi_p^f$ ) и/или расплава ( $\phi_p^m$ ), в основном, отвечают наблюдаемому дефициту скорости продольных волн:

1. Под Начикинской грабенообразной структурой с высокой вулканической и сейсмической активностью, расположенный глубже 40 км низкоомный ( $\rho_m \approx 40$  Ом) (Нурмухамедов, 2010) и низкоскоростной мантийный блок можно связать с насыщением его расплавом до  $\phi_p^m = 1.5-3\%$ . В него упирается низкоомный Петропавловский глубинный разлом с  $\phi_p^f = 0.3-0.7\%$ , повышенное флюидонасыщение которого коррелирует с каналами фильтрации магматических флюидов Авачинской группы вулканов (Добрецов, 2017).

2. Под зонами действующих вулканов Безымянный, Шивелучский, Толбачинский, Ключевская сопка на глубине 5 км и вблизи границы Мохо - Н = 30 км выделены блоки с  $\rho_m = 5-20$  Ом (Мороз, 1991) ( $\phi_p^f = 1 - 2\%$ ), которые возможно связаны с расплавом ( $\phi_p^m \approx 5-10\%$ ). Верхняя часть этих вулканов (Н = 5 км) формируется перед мощными извержениями (Ермаков и др., 2014).

Под задуговой структурой (Южно-Камчатский прогиб) до глубины 35 км проводящие блоки (Нурмухамедов, 2010) имеют  $\phi_p^f = 1.1 - 2.4\%$  (Белявский, 2021). Наблюдается их корреляция с доменами высокой сейсмической и вулканической активности, расположенных в зоне поддвига океанической коры. На ее переднем фланге, под интрузивными структурами Прибрежного горста, на глубине 70 км формируется расплав с  $\phi_p^m = 1.5-3\%$  (блок с  $\rho_m = 15 - 20$  Ом) субдуцированных океанических пород.

Вблизи низкоомных разломов, с содержанием  $\phi_p^f$  до 0.4–2%, в интервале глубин 5–50 км концентрируются гипоцентры землетрясений (с магнитудой до  $M = 5$ ) и наблюдается повышенная вулканическая деятельность, что отражается в росте

содержания флюида. Меньшие значения с  $\phi_p^f = 0.2-0.5\%$  свойственны межплитным разломам, расположенным в более спокойном в сейсмическом и вулканическом отношении Камчатском перешейке и разломам, отделяющих его от Камчатского полуострова. Расположенный под ними, глубже 50 км блок имеет  $\phi_p^f = 0.1-0.2\%$ , что значительно ниже, чем в активизированных зонах **О-В-К**. Разломы, ограничивающие тектонотипы региона, характеризуются высоким содержанием  $\phi_p^f = 0.2-2\%$  по сравнению с субширотными разломами с  $\phi_p^f = 0.02-0.1\%$ , секущими Прибрежный горст Камчатского полуострова.

Очаговые зоны Ильпирского, Хаилинского и Олюторского землетрясений, с гипоцентрами, расположенными на глубже 10 км (СФЗ **О-В-К**), характеризуются  $\phi_p^f = 0.2-0.6\%$ . Под относительно спокойным Корякским нагорьем, представляющим собою систему покровов, на глубине 10 км  $\phi_p^f = 0.12-0.16\%$ . Под Омолонским срединным массивом проводимость литосферы возрастает только глубже 60 км. Его западная граница картируется с  $\phi_p^f = 0.3-0.7\%$  Шайбовецким глубинным разломом.

### Выводы

Построенные геоэлектрические 3D модели позволили решить ряд задач региональной и глубинной геофизики: выделить наиболее проводящие разломы, литосферные блоки, протягивающиеся на сотни километров и локализованные в пределах зон их активизации. Это позволило оценить содержание в них водной фракции флюида.

Блоки повышенной проводимости коррелируют с гидротермальным рудопроявлением и рудными полями, сосредоточенными вблизи активизированных разломов [Белявский и др., 2018; Белявский, Гойдина, 2012], с графитизированными золотоносными образованиями [Азаров и др., 1998]. К областям выклинивания зон с повышенным содержанием флюида приурочена максимальная плотность землетрясений (Белявский, 2017). Мониторинг УЭС в пределах вулканических камер, может быть полезен при оценке концентрации расплавов.

При движении к областям рифтогенеза, содержание флюида в коре и мантии возрастает, так под горными сооружениями Евразийского складчатого пояса, в регионах с альпийской активизацией  $\phi_p = 0.7 - 1\%$  (Белявский, 2007). Минимальной величиной  $\phi_p < 0.5\%$  и его связанностью характеризуются срединные массивы и

глыбы. Графитизированные образования, в основном, присутствуют в покровах, шарьяжах догерцинского возраста с содержанием графита до  $\phi_p \approx 1 - 2\%$  (Южный Тянь-Шань).

Автор благодарен сотрудникам ФГУП КНИИГИМС и «Всероссийского научно-исследовательского института Геофизические методы разведки», ОАО «КамчатГеология», ООО «Северо-Запад», ОАО «Центр ЭМИ», выполнявшим полевые МТ наблюдения и обработку полевых наблюдений данных МТЗ и МОВЗ - ГСЗ.

### Литература

- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н., Иванова Г.И., 1991 Тектоника Камчатки. Тихоокеанская геология, № 3. с. 62–74.
- Азаров Н.Я., Белявский В.В., Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Ваньян Л.Л., Варенцов И.М., Гордиенко В.В., Голубцова Н.С., Кулик С.Н. и др. 1998 Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. Киев: Знания.
- Белявский В.В., 1990 Построение кривых магнитотеллурического зондирования электрической и магнитной мод. Физика Земли, № 10, с. 31 – 38.
- Белявский В.В., Сухой В.В., 2004 Методика рудного аудиоманнитотеллурического зондирования. Физика Земли, № 8, с 68 - 87.
- Белявский В.В., 2007 Геоэлектрическая модель тектоносферы Северо-Кавказского региона. Тверь: «Издательство ГЕРС».
- Белявский В.В., Гойдина А.Г., 2012 Трехмерная геоэлектрическая модель металлогенических зон Кузнецко-Алтайской складчатой области. Физика Земли, № 11 – 12. с. 97 – 117.
- Белявский В.В., Спичак В.В., 2016 Моделирование магнитотеллурических полей в блочной геоэлектрической модели Южного борта Чуйской впадины (*Северный ТяньШань*). Геология и Геофизика, Т.57, №10.
- Белявский В.В., 2017 Трехмерная интерпретация магнитотеллурических данных. ISBN: 978-3-330-04023-6. Saarbrucken, Deutschland, Academic Publishing
- Белявский В.В., Шейнкман А.Л., Килик В.В., 2018 Возможности геоэлектрики при решении задач региональной и рудной геофизики: на примере Алтае-Саянского региона. Геофизические исследования, т. 18, № 2. с.56 - 72.
- Белявский В.В., 2020 Геоэлектрическая модель Алтае-Саянского региона (трехмерная инверсия) ISBN: 978-620-0-50747-1. Beau Bassin, Mauritius. Academic Publishing
- Белявский В.В. 2021 Электропроводность и распределение флюида в Корякско-Камчатском регионе. Физика Земли, № 4, с. 61 – 77.
- Варенцов И.М, 2002 Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах Физика Земли, № 11. с. 11 - 33.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В., 2017 Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии. Геология и геофизика, Т. 58, № 5, с. 701–722.
- Лаврушин В.Ю., 2012. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. Тр. ГИН РАН. вып. 599. М.: ГЕОС
- Матросов П.С., Шапошников Г.Н. и др., Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Алтае-Саянский и Забайкальско-Верхнеамурский регионы. 1998. Т. 7. Сборник научных трудов. Л. Недра.
- Мороз Ю.Ф., 1991 Обобщенная геоэлектрическая модель Камчатки. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. Л.: Недра
- Нурмухамедов А.Г., 2010. Глубинное строение Северо-Восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по геофизическим данным. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого–минералогических наук. Иркутск.
- Ребецкий Ю.Л, Кучай О.А, Маринин А.В, 2013 Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской складчатой области. Геология и геофизика, т. 54 (№ 2) с. 271 – 291.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., and Brown, C, 2004 The magnetotelluric phase tensor: Geophysical Journal International. 158. p. 457 - 469.
- Counil, J.L., le Mouel J.L., Menvielle M, 1986. Associate and conjugate directions concepts in

magnetotellurics. Ann. Geophys. V. 4B. № 2. p. 115–130

Interiors. 150. p. 3 – 14.  
doi:10.1016/J.pepi.2004.08.023

Druskin V.L., Knizhnepman L.A., 1994 Spektral approach to solving three-dimensional Maxwell's diffusion equations in the time and frequency domains. Radio Science. V. 29. № 4. p. 937 – 953.

Shimojuku A, Yoshino T, Yamazaki D., 2014, Electrical conductivity of brine-bearing quartzite at 1 GPa: implications for fluid content and salinity of the crust. Earth Planet Sp., 66, 2 doi: 10.1186/1880-5981-66-2.

Siripunvaraporn W., Egbert G., Lenbury Y., Uyeshima M., 2005. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. 2005. Physics of the Earth and Planetary

Shankland T.I, Waff H.S, 1977. Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle J. Geophys. Res, V. 82 (33), p. 5409 – 5417.

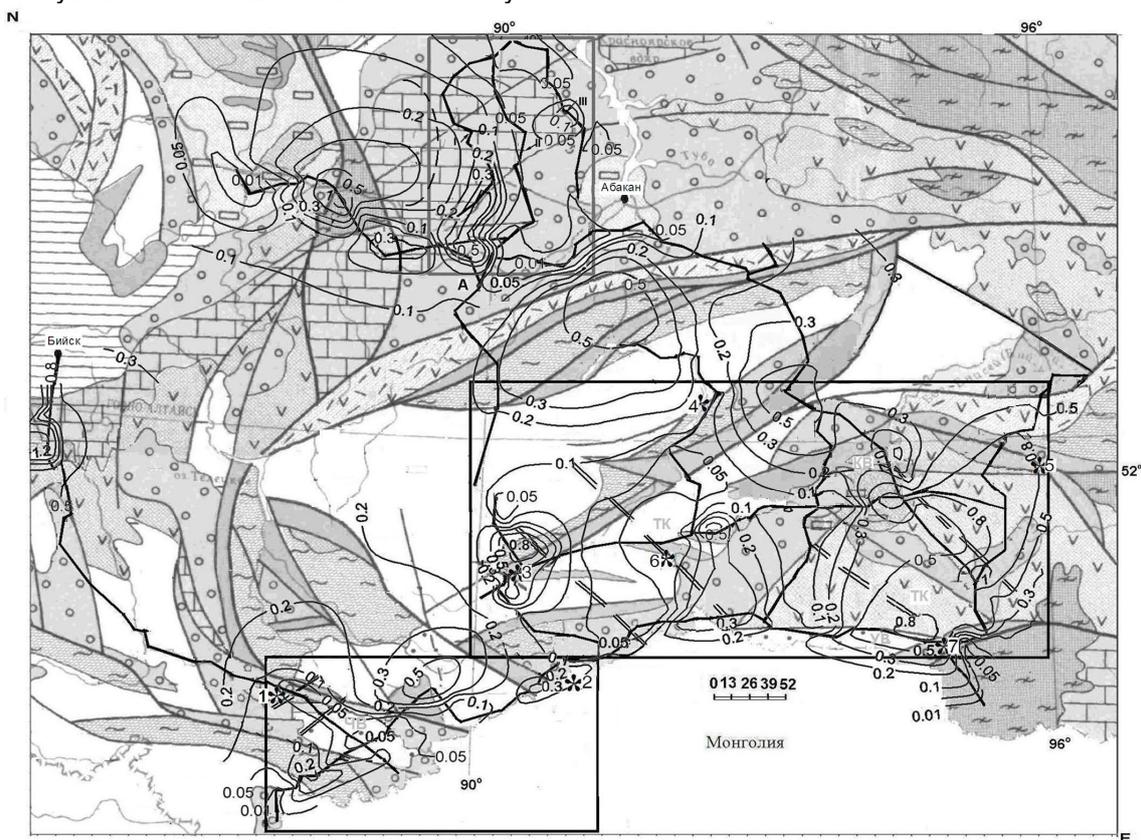


Рисунок 3 Распределение глубже 5 км водной фракции флюида  $\phi_f$  на схеме тектонического районирования Алтае-Саянского региона (Матросов и др., 1988). Широкие черные линии - положение профилей МТЗ и МОВЗ. (\*) - очаговые зоны землетрясений: 1 – Чуйская, 2 – Шапшальская, 3 – Тээлинская, 4 – Большепорошская, 5 – Каа-Хемская, 6 – Шагонарская, 7 – Самагалтайская. ТВ – Тувинская котловина, КВ – Кызылская впадина, УВ – Убсунурская впадина, ЧВ – Чуйская впадина. Прямоугольники – области трехмерной инверсии МТ данных (Siripunvaraporn et al., 2005).