

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ТЯНЬ-ШАНЯ И ТАРИМА

Соколова Е.Ю.¹, Донг Х.², Рыбин А.К.³, Пушкарев П.Ю.⁴, Матюков В.Е.³
sokol_1@mail.ru

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Китайский университет наук о Земле, г. Пекин, Китай

³ Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан

⁴ Московский государственный университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Коллизия Индийской и Евразийской литосферных плит служит главным драйвером современных геодинамических процессов в пределах Центрально-Азиатского сегмента Альпийско-Гималайского складчатого пояса, при этом одним из ключевых внутренних элементов этой масштабной динамической системы является Тяньшанский ороген в его взаимодействии с соседними крупными геотектоническими блоками [1-3]. Геолого-геофизическое изучение зоны сочленения Южного Тянь-Шаня с Таримской платформой - области, отличающейся наиболее интенсивной динамикой в пределах всего орогена и максимальной концентрацией сейсмичности - крайне важно для решения фундаментальных проблем внутриконтинентального орогенеза, а также как база для совершенствования методов сейсмотектонического районирования и оценки сейсмических угроз. На сегодняшний день недостаточная изученность этой области геофизическими методами обуславливает разнообразие трактовок ее глубинного строения и представлений о характере литосферных деформаций на границе Тарима и южной окраины Тянь-Шаня. Варианты интерпретации имеющихся сейсмических данных (площадной томографии по записям региональных и удаленных землетрясений, а также геотраверса активных глубинных сейсмических зондирований) значительно различаются, имея в ряду наиболее вероятных предположений о механизмах деформационных процессов как континентальную субдукцию плиты под растущий ороген (по типу субдукции Индостана под Гималаи) [3], так и литосферную даламинацию [4, 5]. Достаточно свежие гипотезы [6, 7] (как и ранняя [8]), предполагают горизонтальное сокращение коры с наращиванием ее мощности за счет смятия структур в реологически ослабленной области под орогеном, деформаций границы М, а также воздымания хребтов в процессе движений по разломам в зоне хрупких деформаций.

Геоэлектрические свидетельства, чрезвычайно важные для верификации сейсмических гипотез о глубинном строении Южного Тянь-Шаня и СЗ борта Тарима, представлены материалами единственного профиля МТЗ «Аксай-Артуш» (рис. 1а). Построенная по этим данным в работе [9] 2D модель разреза электропроводности зоны сочленения, в целом, может быть соотнесена с гипотезой поддвига Таримской литосферной плиты под южные хребты Тяньшанского орогена, однако, для создания дополнительных, достаточно весомых ограничений на неоднозначные трактовки сейсмических данных необходимо расширение МТ наблюдений как пространстве, так и в области длинных периодов.

В докладе представляются результаты исследования, предваряющего будущий масштабный эксперимент и состоящего в применении альтернативных подходов к анализу уже имеющихся МТ данных по зоне сочленения Тарим - Тянь-Шань. Основные усилия в рамках нового этапа интерпретации материалов зондирования «Аксай-Артуш» были направлены на повышение разрешающей способности МТ инверсий при сохранении их стабильности, а также на учет региональных и локальных трехмерных эффектов.

В качестве первой альтернативы предшествующему подходу ([9] - сглаженные 2D инверсии по программе [10]) с целью получения большего разрешения была использована программы инверсии [11], способная обеспечивать адекватную реконструкцию как плавных, так и резких изменений электропроводности. При проведении инверсий с использованием ряда адаптивных опций построения начальной модели и стабилизации решения, предусмотренных в этой программе, были соблюдены основные методические принципы,

разработанные в RS RAS и IPE RAS [12, 13] для преодоления общих проблем МТ данных в высокогорных областях.

Предпочтительная модель, полученная путем применения альтернативного кода 2D-инверсии к ансамблю широкополосных МТ данных, позволила разрешить высокопроводящие слои в основании осадочного чехла Таримского бассейна; мощную круто-падающую зону с низким удельным сопротивлением, которая может быть ассоциирована с Южно-Тяньшаньским разломом; проводящие зоны в средней коре под хребтами (локальные линзы скопления солевых флюидов/частичного расплава, соответствующие низкоскоростным аномалиям на сейсмическом разрезе [14], т.е. - флюидной природе аномалий обоих типов). Модель также свидетельствовала в пользу повышенной проводимости нижней коры/верхней мантии Южного Тянь-Шаня. Однако разрешение верхней коры было потеряно в достаточно широкой приграничной зоне из-за отсутствия наблюдений.

Следующая попытка добиться стабильного и адекватного разрешения геоэлектрической структуры исследуемой территории состояла в проведении 3D-инверсии имеющегося массива данных зондирований (рис. 1) во всем диапазоне периодов имеющихся оценок МТ передаточных функций, что представлялось рациональным согласно результатам инвариантного анализа геомагнитных и электрических откликов. Инверсия была выполнена на базе хорошо известного кода ModEM, с использованием нового усовершенствованного алгоритма решения прямой задачи [15]. Полученная предварительная трехмерная модель (входные погрешности - 2,5%, подбор с RMS=1,89) представлена на рис. 1. Она более достоверно характеризует верхнюю кору в окрестности профиля, в том числе – демонстрирует значительно пониженную, по сравнению с обоими 2D решениям, мощность проводящего осадочного чехла Тарима (при выделении слоя тах проводимости в его низах). Как и обе описанные выше, эта модель демонстрирует кластеризацию гипоцентров землетрясений в высокоомных (консолидированных) блоках земной коры или же в зонах их контактов с проводящими структурами. Глубинная часть 3D модели неплохо согласуется с результатами сглаженной 2D-инверсии [9] и демонстрирует пологое погружение под ороген проводящей зоны, сливающейся с мощным субвертикальным проводником (оперяющим разломом?).

Согласно результатам, полученным на профиле «Аксай-Артуш» тремя различными методами МТ инверсии (использующими как 2D, так и 3D подходы, а также различающиеся наборы данных), наклонный линейный элемент низкого удельного сопротивления является наиболее стабильно разрешаемой особенностью разреза зоны сочленения Тарим - Тянь-Шань. В настоящее время, до получения возможности судить о латеральных изменениях электропроводности литосферы на значительном протяжении исследуемого коллизийного пояса, эту особенность распределения удельного сопротивления можно считать свидетельствующей о присутствии зоны флюидизированного (и/или проработанного минерализацией) детачмента/поддвига тектонической плиты Тарима под Южно-Тяньшаньский ороген, т.е. - в пользу гипотезы [3].

Полезным для проведения будущих (российских, китайских...) МТ экспериментов в Тарим-Тяньшанском регионе или других горно-складчатых поясах, будет следующее заключение, которое можно сделать по результатам проведенного анализа данных зондирования «Аксай-Артуш». Перспективы повышения разрешающей способности моделей подобных сложно построенных геоэлектрических структур стоит связывать с переходом от сглаживающих МТ инверсий к инверсиям в кусочно-непрерывных средах с контрастами в электропроводности. 3D-инверсия площадного массива данных с адекватным пространственным и частотным (необходимы длиннопериодные данные) охватом, проводимая с опорой на результаты детальных профильных инверсий, будет являться наиболее предпочтительным подходом для построения реалистичной модели земной коры и верхней мантии зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня, уровень разрешения и пространственный охват которой обеспечит дополнительные ограничения для сужения неоднозначности при трактовке сейсмических моделей в соответствующем диапазоне глубин.

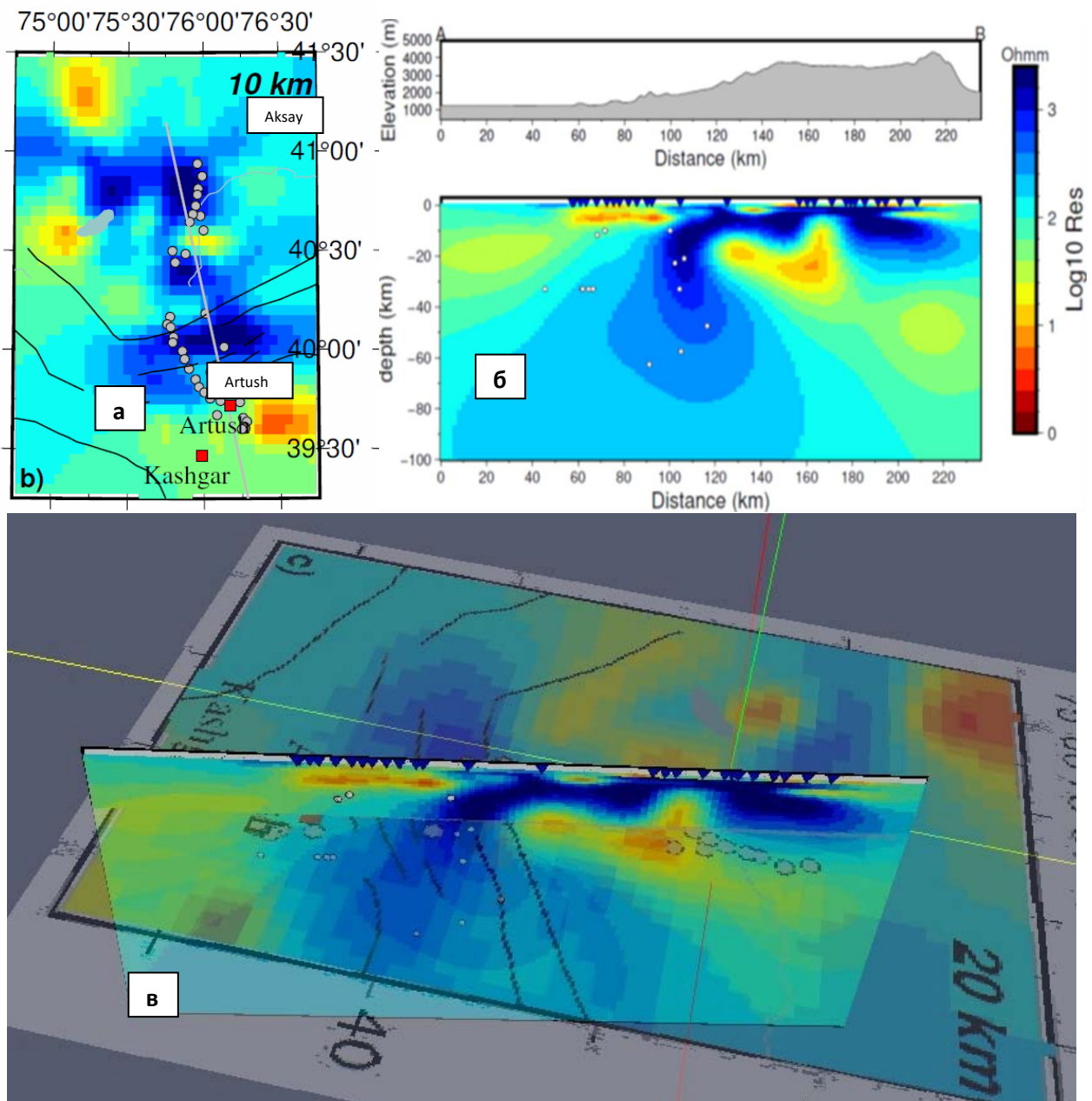


Рисунок – Результаты 3D инверсии данных МТЗ на профиле «Аксай-Артуш», полученных с помощью кода [10]: (а) – горизонтальное сечение объемной модели удельного сопротивления ($RMS=1,89$) на глубине 10 км (серые кружки – пункты используемых зондирований); (б) - поперечное сечение объемной модели вдоль серой линии (показана в а) с гипоцентров сильных землетрясений, отмеченных белыми кружками; (в) – пространственный монтаж вертикального сечения модели вдоль серой линии и горизонтального на глубине 20 км (вид с северо-востока)

В заключение, полученные геоэлектрические модели рассматриваются совместно с результатами пространственного анализа аномального магнитного поля региона сочленения СЗ Тарима и Южного Тянь-Шаня (в модели 2023 года WDMAM2.1, покрывающей всю исследуемую территорию). Анализ проводится в ГИС Integro [16] и дает представление об изменчивости глубинного распределения намагниченности пород вдоль простираения коллизионного пояса, обеспечивая возможность оценить корреляции аномалообразующих объектов обоих типов в разрезе и сделать предположения о латеральной изменчивости структур электропроводности.

Литература

1. De Grave J., Buslov M.M., Van den Haute P. Distant effects of India–Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: constraints from apatite fission-track thermochronology // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29, p. 188–204.
2. Burtman V.S. Geodynamics of Tibet, Tarim, and the Tien Shan in the Late Cenozoic // *Geotectonics*, 2012, Vol. 46, No. 3, pp. 185–211. © Pleiades Publishing, Inc., 2012.
3. Макаров В.И. и др., Подвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: основные результаты сейсмических исследований по профилю МАНАС (Кашгар-Сон-Кёль) // *Геотектоника*. 2010. № 2. С. 23-42.
4. Li Z., Roeker S. et al., 2009. Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination. *Tectonophysics*, 477. P. 49-57. doi:10.1016/j.tecto.2009.05.007
5. Zabelina I.V., Koulakov I.Yu., Buslov M.M. Deep mechanisms in the Kyrgyz Tien Shan orogeny (from results of seismic tomography) // *Russian Geology and Geophysics*, 2013, 54, 695–706.
6. Li W. et al. Intracontinental deformation of the Tianshan Orogen in response to India-Asia collision. *Nature communications* (2022) 13:3738 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30795-6>
7. Zhang, B., Bao, X., & Xu, Y. (2020). Distinct orogenic processes in the south- and north-central Tien Shan from receiver functions // *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086941. <https://doi.org/10.1029/2019GL086941>
8. Gao R. et al. Fine crustal structure beneath the junction of the southwest Tian Shan and Tarim Basin, NW China. *Lithosphere*, 2013. doi: 10.1130/L248.1 (active seismic)
9. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Магнитотеллурические свидетельства глубинных геодинамических условий в зоне сочленения южного Тянь-Шаня и Таримской впадины // *Записки горного института*. 2009. Т. 183. С. 272–276.
10. Rodi W.L., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. 2001. V 66, pp.174-187.
11. Varentsov, Iv.M. Joint robust inversion of MT and MV data in *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior*, Ser. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, vol. 40, Spichak, V., Ed., Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 189–222.
12. Sokolova E.Yu., Berdichevsky M., Varentsov Iv., Rybin A., Baglaenko N., Batalev V., Golubtsova N., Matukov V., Pushkarev P. 2007. Advanced methods for joint MT/MV profile studies of active orogens. The experience from the Central Tien Shan. *Protokoll uber das 22 Kolloquium. "Elektromagnetische Tiefenforschung"* (Eds. O. Ritter, H. Brasse). *Dtsch. Geophys. Ges Potsdam. Germany*. P. 132-141.
13. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Александров П.Н., Непейна К.С. Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 2022. № 5. С. 98-115. DOI: 10.31857/S0002333722050234
14. Шелочков Г.Г. и др. Глубинное строение и инструментальные методы изучения литосферы внутриконтинентальных орогенов: Неоднородности, физическая природа границ, коллизийные и аккреционные орогены: сходство и различие процессов формирования // *Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы*. Сб. материалов 4 Междунар. симп. Москва-Бишкек. 2009. С. 59-67.
15. Dong H., Egbert D. Divergence-free solutions to electromagnetic forward and adjoint problems: a regularization approach. 2019. *GJI* 216(2):906-918 DOI: 10.1093/gji/ggy462
16. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М. ГИС INTEGR0. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // *Геология нефти и газа*. 2021. № 3. С. 31–40. DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.