

УДК 550.372, 552.321.6, 550.837 (575.2)(04)

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев

Лабораторные измерения электропроводности образцов эклогитов при высоких РТ-условиях при сопоставлении с геоэлектрической и тепловой моделями позволили оконтурить эклогитовый массив под хр. Ат-Баши.

Ключевые слова: магнитотеллурика; петрология; электропроводность; тепловая модель; эклогиты, термобарометрия; глубинное строение; Тянь-Шань.

Введение. Электромагнитные зондирования земной коры, изучение теплового потока, а также петрофизические исследования широко используются для изучения глубинных электропроводящих зон, геотермальных резервуаров, глубин-

ных разломов и т.д. Для понимания физических процессов, приводящих к сейсмической активности, требуется привлечение данных петрологии, петрофизики, региональной тектоники, структурных данных, а также геотермических,

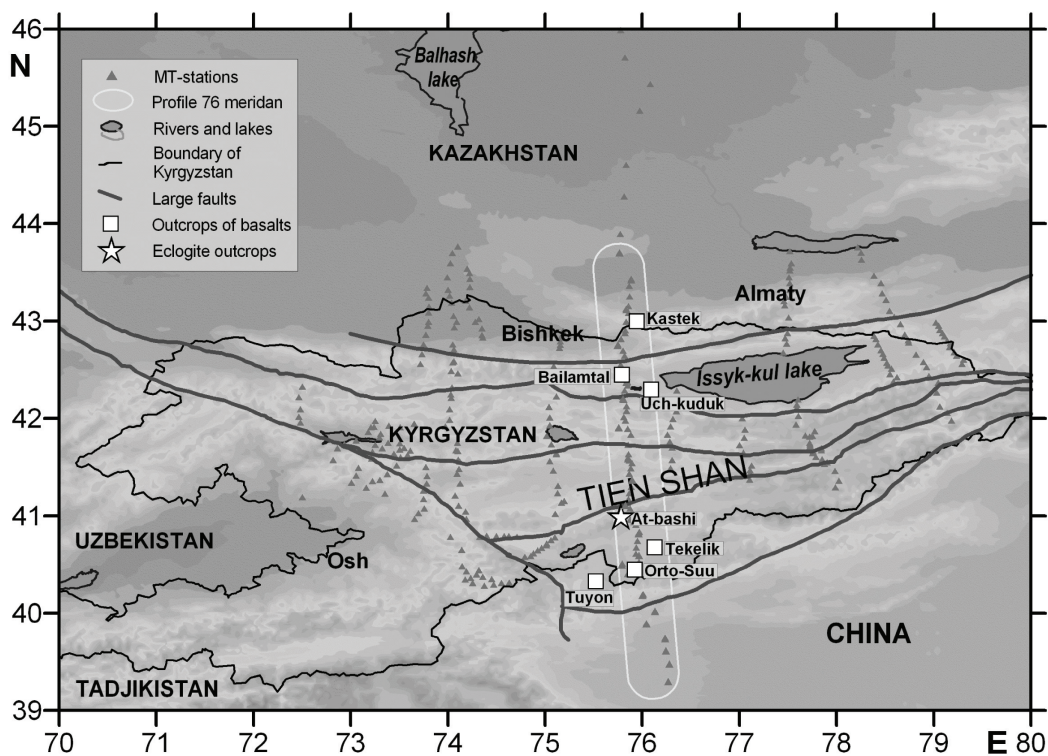


Рис. 1. Схема выходов глубинных пород вдоль магнитотеллурического профиля по меридиану 76° через Тянь-Шань.

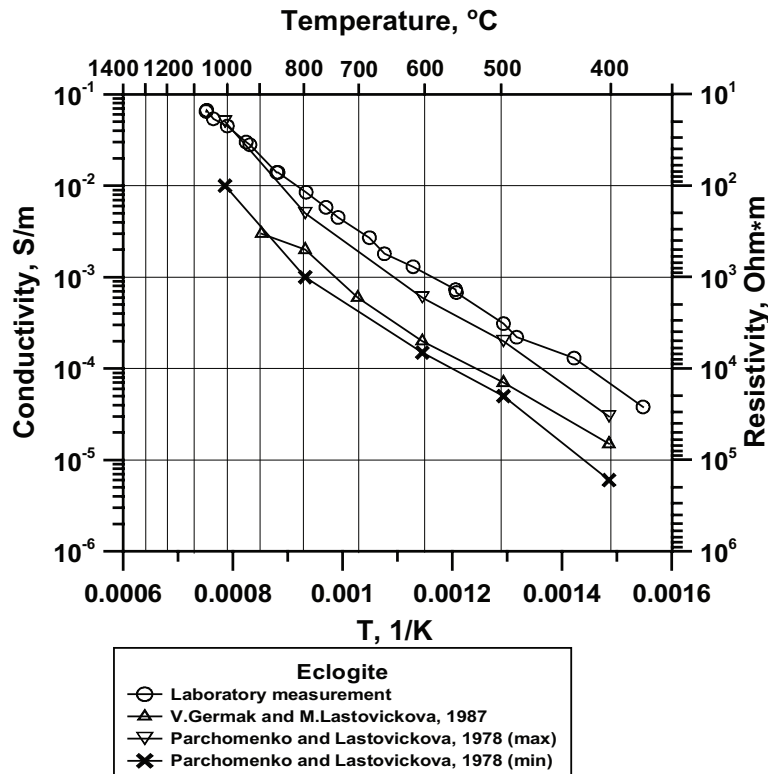


Рис. 2. Результаты лабораторных измерений электропроводности эклогита от температуры при давлении 2 ГПа в сопоставлении с данными [10, 11].

которые привлекают все большее внимание из-за значительного влияния температуры на свойства пород. Основной целью петрофизических работ, проведенных для интерпретации результатов магнитотеллурического (МТ) зондирования, является получение данных по электропроводности глубинных пород Тянь-Шаня.

При интерпретации полевых МТ-данных использовались результаты лабораторного эксперимента по определению физических свойств пород при Р-Т условиях равновесия минеральных фаз, представленных в рассматриваемых образцах эклогитов. Геодинамические процессы, вызываемые Индо-Азиатской коллизией [1] отражаются в геоэлектрической структуре земной коры [2]. Эклогиты хребта Ат-Баши, расположенного в Кыргызстане (рис. 1), являются частью протяженного пояса высокобарических пород, прослеживающегося до Урала [3, 4] и уходящего в Китай [5]. Эклогитовые комплексы Тянь-Шаня, маркирующие сутуру закрытия Туркестанского палеоокеанского бассейна, образовались в результате погружения и эклогитизации океанической коры в зонах субдукции.

Особенности образования и эксгумации эклогитов Ат-Башинского хребта привлекают внимание геологов, и эта проблема широко обсуждается в ряде публикаций. Наши работы позволили получить новые данные по петрофизическим параметрам эклогитов и оконтурить эклогитовый массив в глубинной части разреза под Атбашинским хребтом.

Создание температурной модели. Данные по тепловому потоку на поверхности вдоль МТ-профиля 76° ВД через Тянь-Шань были сняты с карты теплового потока Тянь-Шаня и Памира [6]. Вариации значений теплового потока оцениваются от 40 до 80 мВт/м². Кроме того, использовались новые геотермальные данные, полученные в [7], согласно которым значения теплового потока оцениваются в среднем около 48,3 мВт/м². Этот тепловой поток ниже оценок предыдущих наблюдений на 15–20 мВт/м². Данные по распределению верхнекоровых источников тепла также были сняты с разрезов [6]. Для расчета температурной модели использовалась геометрия слоев и блоков земной коры, полученная сейсмическими методами. Изменения

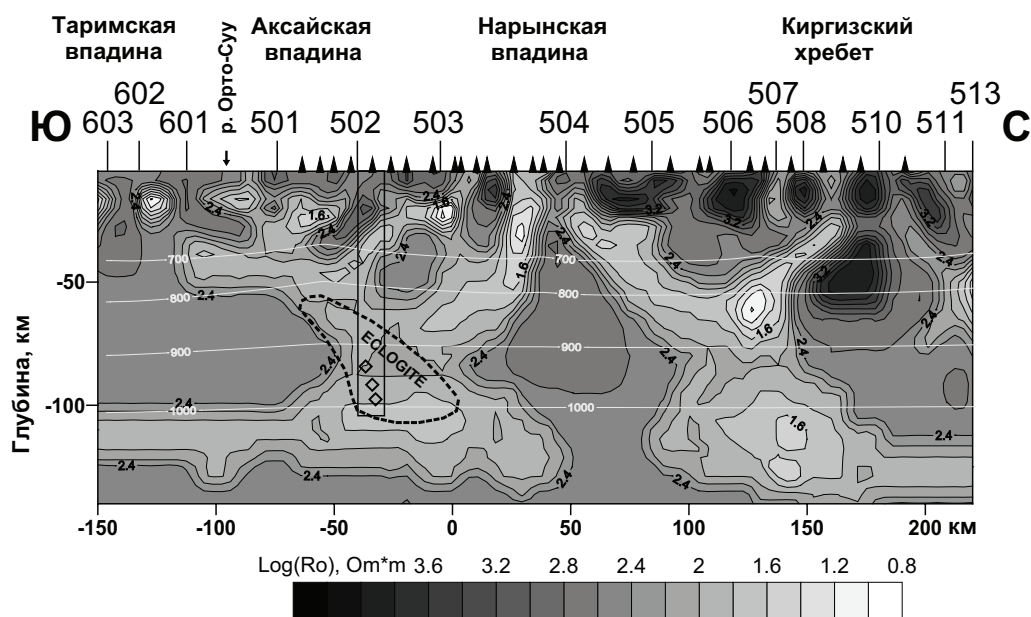


Рис. 3. Геоэлектрическая структура земной коры, вдоль МТ-профиля 76° в.д. через Тянь-Шань [2], сопротивления показаны оттенками серого. Распределение глубинных температур показано в виде изолиний. Пунктирным контуром выделена область предполагаемого расположения глубинного эклогитового массива по данным петрологической интерпретации. Прямоугольником показано расположение зоны вертикального профиля электропроводности для сопоставления с лабораторными измерениями электропроводности эклогитов (ромбики).

коэффициента теплопроводности вдоль профиля оценивались от 1,2 до 2,8 W/m/K и с глубиной от 2,3 до 3,4 W/m/K. Граничные условия на нижней границе модели это зафиксированный на глубине 140 км тепловой поток 14 mW/m². Расчеты глубинной температурной модели производились с помощью программ COMSOL Multiphysics (Femlab).

Лабораторные измерения электропроводности. Измерения электропроводности образцов эклогитов хребта Ат-Баши производились при РТ-условиях, близких к условиям их образования в коре и верхней мантии. Лабораторный эксперимент выполнялся с использованием импедансной спектрометрии во Франкфуртском университете под руководством Н. Багдассарова на установке “поршень – цилиндр” при давлении 2 GPa и при 600 < T < 1300 °C (не достигая точки плавления). Конструкция измерительной ячейки описана в работе [8]. Химический состав, возраст и другие характеристики используемых образцов эклогитов, описаны [9]. Общее поведение графика зависимости электропроводности эклогита от температуры при давлении 2 ГПа представлено на рис. 2.

Геологическая интерпретация геоэлектрических данных. Геоэлектрическая структура земной коры и верхней мантии по профилю 76° в.д. через Тянь-Шань была определена при совместных работах по проекту “Геодинамика Тянь-Шаня” в 1999–2003 гг. [2]. Результирующая геоэлектрическая модель приводится на рис. 3. Инверсия полученных магнитотеллурических данных выполнялась в Калифорнийском университете в Риверсайде под руководством проф. Стива Парка.

Псевдоразрезы кажущегося сопротивления, фазы и магнитные передаточные функции были инвертированы с помощью регуляризируемой инверсии [12]. При инверсии исходных данных в качестве стартовой модели использовался однородный слой с сопротивлением 500 Ом·м до глубины 150 км и слоистая модель нормального разреза глубже. Для аппроксимации данных в модели использовалась сетка из 213 столбцов и 179 строк (свыше 38000 ячеек в целом), причем большое число слоев было необходимо для адекватного отображения топографии (3500 м).

Граница зоны сочленения Тарима и Южного Тянь-Шаня в геоэлектрической модели проявляется как погружающаяся в северном на-

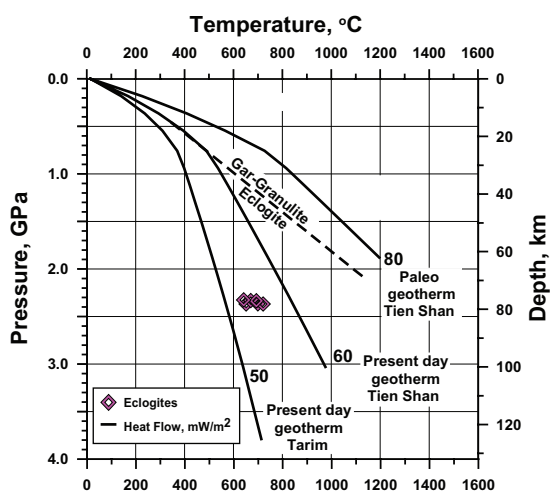


Рис. 4. Термобарометрия эклогитов Ат-Башинского хребта Киргизстан [9] показана ромбиками, и геотермы со значениями теплового потока в мВт/м².

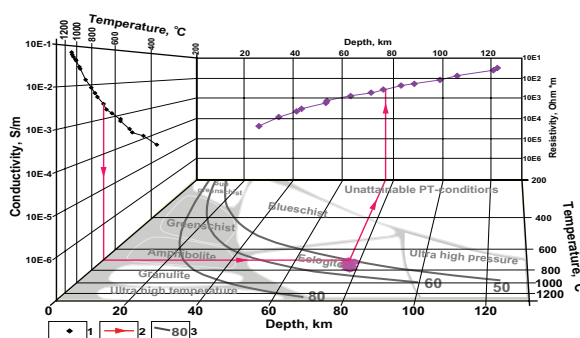


Рис. 5. Конверсия результатов лабораторных измерений эклогитов Ат-Баши “электропроводность от температуры” в зависимость “электропроводность от глубины” для различных значений геотерм и фаций метаморфизма; 1 – значения электропроводности, 2 – схема конверсии, 3 – геотермы.

правлении зона пониженных сопротивлений, по отношению к проводящим, с одной стороны, и высокоомным, с другой стороны, структурам.

Петрологическая интерпретация геоэлектрических моделей предполагает “наполнение” глубинных горизонтов моделей нижнекоровыми и верхнемантийными породами путем подбора пород с необходимой зависимостью электропроводности от температуры и с выполнением следующих условий:

1) распределение электропроводности в зависимости от современного поля температур в глубинных горизонтах модели должно соответствовать результатам лабораторных измерений электропроводности от температуры на образцах рассматриваемых глубинных пород;

2) глубинность интерпретируемых горизонтов в модели и их положение по отношению к региональным тектоническим структурам должны соответствовать фациям метаморфизма для анализируемых глубинных пород;

3) рассматриваемые породы должны быть репрезентативными, т. е. представлять значительные объемы нижней коры и литосферной мантии;

4) предпочтительно при интерпретации какого-либо участка профиля в первую очередь анализировать глубинные породы, образцы которых вынесены на поверхность на рассматриваемом участке, в случае их отсутствия использовать литературные данные.

Для анализа геодинамических условий, в которых образовывались исследуемые геологические объекты, и происходили метаморфические изменения пород, петрологическая интерпретация включает в себя построение палеогеотермы (рис. 4) на момент образования рассматриваемых глубинных пород и современной геотермы. Это обеспечивает возможность конверсии результатов лабораторных измерений “электропроводность от температуры” в зависимость “электропроводность от глубины” для различных значений геотерм, что позволяет сопоставлять эти данные с данными по вертикальным профилям электропроводности от глубины для геоэлектрических моделей МТЗ. На рис. 5 показана конверсия лабораторных измерений эклогитов, т.е. определены возможные значения электропроводности по разрезу в зависимости от глубины как если бы сухие эклогиты слагали весь рассматриваемый диапазон глубин (давлений). По мнению [13], природа аномалий электропроводности верхних-средних частей земной коры флюидная. Развивается также гипотеза о графитовых пленках [14], формирующих аномалии электропроводности. Однако для обеих гипотез сопротивление горных пород на этих глубинах в малой степени зависит от петрологических характеристик, а в основном определяется количеством флюида или наличием графитовых пленок в межзерновом пространстве. В настоящей

работе изучаются вопросы электропроводности нижнекоровых и верхнемантийных объектов.

Средняя величина удельного сопротивления на глубинах 100–140 км ~100 Ом·м, что выше, чем таковая для частичного расплава [15]; таким образом, расплав может присутствовать лишь в малых количествах (<1 %) или в изолированных камерах. Напротив, вода, содержащаяся в кристаллической решетке оливина, может уменьшить удельное сопротивление до 100 Ом·м [16], но недавние измерения содержания воды в кристаллической решетке оливина из ксенолитов шпинелевых лерцолитов Орто-Суу методом ИК спектроскопии в Институте геологии и минералогии СО РАН показали практически полное её отсутствие [Егорова В.В., устное сообщение]. В связи с этим, для объяснения невысоких значений удельного сопротивления в верхней мантии на глубинах 100–140 км (~100 Ом·м) должны существовать другие причины.

Выводы. Предполагается, что в зоне сочленения Тарима и Тянь-Шаня эти горизонты не содержат свободного флюида в количестве, достаточном для формирования аномально проводящих объектов, а особенности электропроводности этих горизонтов, в основном, обуславливаются их вещественным составом и распределением температур. В интервале температур от ~750 до ~950°C, соответствующем глубинам литосферной мантии, наблюдается совпадение результатов “сухих опытов” лабораторных измерений электропроводности образцов эклогитов со значениями электропроводности по рассматриваемому участку вертикального профиля. Тем самым подтверждается, во-первых, предположение об отсутствии свободной воды в этом интервале глубин, а во-вторых, предположение об эклогитовом составе рассматриваемого массива. Расположение глубинного эклогитового массива в продолжение пологого поддвига Таримской платформы под кору Тянь-Шаня и морфология геоэлектрических структур, соответствующая субдукционно-коллизийному сценарию (рис. 3) являются дополнительным аргументом для такой интерпретации.

Для интервала температур от ~300 до ~700°C, соответствующего глубинам корового проводящего слоя, значения электропроводности по вертикальному профилю превышают данные лабораторных измерений электропроводности почти на порядок, что возможно связано с заполнением порового пространства в породе проводящим флюидом.

При температурах более 1000°C данные лабораторных измерений электропроводности превышают значения электропроводности по вертикальному профилю, что вероятно, связано с фазовыми изменениями, происходящими в веществе верхней мантии.

Литература

1. Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.A. and Batalev V.Yu. Cenozoic tectonic and geodynamic evolution of the Kyrgyz Tien Shan Mountains: A review of geological, thermochronological and geophysical data // *Journal of Asian Earth Sciences*. Vol. 29, Iss. 2-3, February 2007. P. 205–214.
2. Bielinski R.A., Park S.K., Rybin A., Batalev V., Jun S., Sears C. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies // *Geophys. Res. Lett.* Vol. 30, № 15, 180610.1029/2003 GL017455 08 August 2003.
3. Добрецов Н.Л. Глаукофансланцевые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 429 с.
4. Бакиров А., Тагири М., Сакиев К. Породы метаморфических фаций сверхвысоких давлений в Тянь-Шане // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 12. С. 1722–1732.
5. Gao J., Klemd R. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints // *Lithos*, 2003. Vol. 66. P. 1–22.
6. Shvarcman Yu.G. *Lithosphere of Tien Shan*. М.: Наука, 1986. P. 129–141 (in Russian).
7. Vermeesch P., Poort J., Duchkov A. D., Klerckx J. and De Batist Lake Issyk-Kul (Tien Shan): Unusually low heat-flow in an active intermontane basin // *Russian Geology and Geophysics*. 2004. Vol.45. №5. P. 616–625.
8. Maumus J., Bagdassarov N.S., Schmeling H. Electrical conductivity and partial melting of mafic rocks under pressure // *Geochim. Cosmochim.* 2005. Acta 69 (19), 4703–4718. 20.
9. Simonov V.A., Cakiev K.S., Volkova N.I., Stupakov S.I., Travin A.V. Conditions of eclogites generation beneath At-Bashi ridge (South Tien Shan) // *Russian Geology and Geophysics* 49. 2008. P. 803–815.
10. Cermak V. and Lastovckova M. Temperature Profiles in the Earth of Importance to Deep Electrical Conductivity Models // *Pure Appl. M.*, 1987. *Geophys.* № 125. P. 255–284.
11. Lactovickova M. and Parkhomenko E. I. Elektricheskiye svoystva bazaltov Cheskogo mas-siva pri visokikh termodinamicheskikh param-

- etrakh // Trav. Inst. Geophys. Acad. Tcheosl. Sci. 464, Geofis. sbornik 1976, Academia. Prague. P. 289–304.
12. *Rodi W.L., Mackie R.L.* Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2D Magnetotelluric Inversion // *Geophys.* 2001. Vol. 66. P. 174–187.
 13. *Vanyan L.L. and Gliko A.O.* Seismic and electromagnetic evidence of dehydration as a free water source in the reactivated crust // *Geophys. J.* 1999. Int. 137. P. 159–162.
 14. *Жамалетдинов А.А., Семенов А.С.* Электронно-проводящие породы кристаллического фундамента – объект глубинных электрических зондирований. Коровые аномалии электропроводности. Л.: Наука, 1984. С. 8–21.
 15. *Park S.K., Hirasuna B., Jiracek G.R., Kinn C.L.* Magnetotelluric Evidence of Lithospheric Mantle Thinning beneath the Southern Sierra Nevada // *J. Geophys. Res.* 1996. vol. 101. P. 16241–16255.
 16. *Karato S.* The Role of Hydrogen in the Electrical Conductivity of the Upper Mantle // *Nature*, 1990. Vol. 347. P. 272–273.