

Я. О. Бондарчук¹✉

Особенности геоэлектрического строения районов новейшей тектоники западной части АССО (на примере Горного Алтая)

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты магнитотеллурических исследований по профилю п. Акташ - берег Телецкого озера. На геоэлектрических разрезах установлено мелкоблочное строение земной коры региона. Зоны новейших разрывных нарушений и флюидопроводящие каналы маркируются аномально низкими значениями УЭС (менее 5-10 Ом·м), в том числе субвертикальными и наклонными областями проводимости. Охарактеризованы четыре основных тектонических блока, определены их геоэлектрические параметры и глубинное строение. В пределах разреза выделены высокоомные интрузивные тела, элементы Телецко-Башкаусской зоны сдвига, а также участки повышенной тектонической раздробленности и флюидонасыщения коры. Полученные данные важны для понимания глубинных геодинамических процессов и новейшего тектонического строения Горного Алтая.

Ключевые слова: Магнитотеллурические зондирования, Горный Алтай, неотектоника, земная кора, геоэлектрические неоднородности, Телецкое озеро

Y. O. Bondarchuk¹✉

Features of the geoelectric structure of the regions of the latest tectonics of the western part of the Altai-Sayan Orogenic Area (using the example of the Altai Mountains)

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: y.bondarchuk@g.nsu.ru

Abstract. The paper presents the results of magnetotelluric studies along a profile from the village of Aktash to the shores of Lake Teletskoye. The geoelectric sections reveal a small-block structure of the Earth's crust in the region. Zones of recent fault disturbances and fluid-conducting channels are marked by anomalously low electrical resistivity values (less than 5–10 Ohm·m), including subvertical and inclined conductivity domains. Four main tectonic blocks are characterized, and their geoelectric parameters and deep structure are determined. Within the section, high-resistivity intrusive bodies, elements of the Teletsk–Bashkaus strike-slip zone, as well as areas of increased tectonic fragmentation and fluid saturation of the crust are identified. The obtained data are important for understanding deep geodynamic processes and the neotectonic structure of Gorny Altai.

Keywords: Magnetotelluric sounding, Gorny Altai, neotectonics, Earth crust, geoelectric inhomogeneities, Lake Teletskoye

Введение

Горный Алтай представляет собой сложно построенную систему метаморфизованных комплексов активных и пассивных континентальных окраин, пронизанных интрузиями. В позднем девоне – раннем карбоне произошла коллизия

Казахстанско-Байкальского и Сибирского континентов, после чего на территории Горного Алтая установился континентальный режим, однако сформированная зона оставалась мобильной. Последний период активизации разломо- и горообразования происходит в неоген-четвертичное время в результате коллизии Евразийской и Индо-Австралийской плит [1].

Тектонические структуры региона имеют преимущественно северо-западное простирание и характеризуются длительной историей геологического развития. Для территории характерна тесная связь крупных озер с тектоногенными межгорными впадинами. Телецкое озеро, расположенное на границе Алтая и Западного Саяна, находится в узком новейшем грабене. Его длина составляет 45 км, ширина около 4 км, а уровень водной поверхности находится на отметке 434 м [2]. Согласно исследованиям [3], формирование бассейна озера произошло в результате неотектонической активизации в позднем плейстоцене. Телецкое озеро представляет собой локальный бассейн растяжения, возникший в результате разнонаправленных движений тектонических блоков в условиях общего регионального сжатия Центральной Азии.

Профиль магнитотеллурических исследований проходит по территории Курайского хребта, Улаганского плато и Чулышманской долины, что позволяет охарактеризовать глубинное строение различных структур региона.

Изучение новейших тектонических структур, флюидного режима и глубинного строения является актуальным для понимания геодинамических процессов, распространенных на территории юго-восточной части Горного Алтая.

Методы и материалы

При изучении строения юго-восточной части Горного Алтая методом магнитотеллурического зондирования применялась аппаратура канадской компании «Phoenix Geophysics Ltd». При помощи измерительных модулей MTU-5 регистрировались четыре компонент магнитотеллурического поля (E_x , E_y , H_x , H_y) в диапазоне периодов 0,003 – 1000 с. Шаг по профилю в среднем составлял 4 – 5 км. Использовалась крестообразная установка, ориентированная на север – ось X , на восток – ось Y , длина приемных электрических линий составляла 100 м. Пространственная и высотная привязка пунктов зондирования осуществлялась с помощью встроенной системы GPS. Запись на каждой точке наблюдения длилась в среднем 19 – 22 ч. Полевые данные были обработаны с помощью программного обеспечения SSMT-2000 компании «Phoenix Geophysics Ltd». Для дальнейшего редактирования кривых, 1D и 2D инверсий использовался программный комплекс «WinGLink», а построение разреза осадочного чехла происходило с помощью электронной палетки MTZ.exe. Методика качественной и количественной интерпретация подробно рассмотрена в [4, 5, 16].

Результаты

Исследуемый профиль протягивается от поселка Акташ до южного берега Телецкого озера.

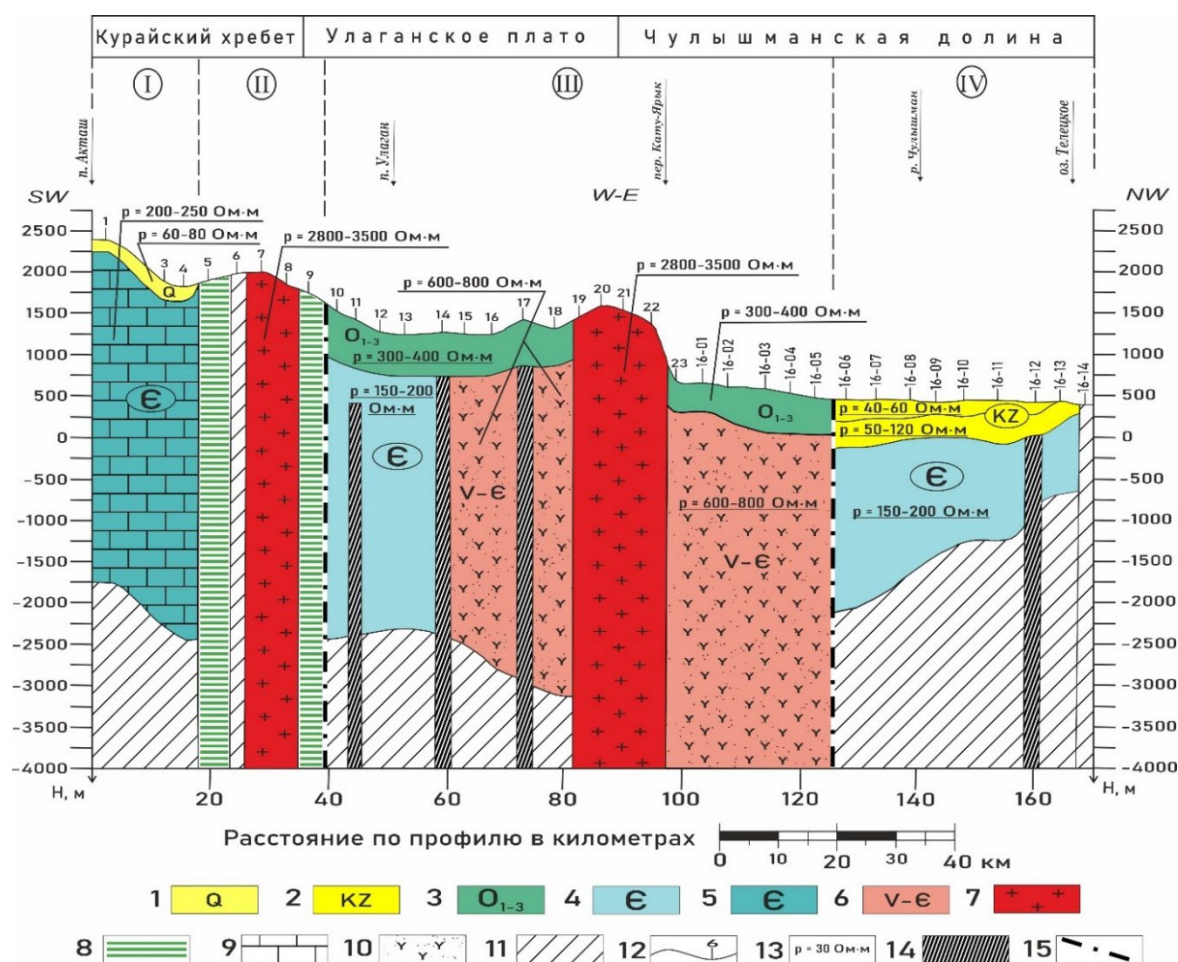


Рис. 1. Геоэлектрический разрез осадочного чехла вдоль профиля п. Акташ – оз. Телецкое:

- 1 – отложения четвертичной системы; 2 – нерасчлененные отложения кайнозоя; 3 – нерасчлененные отложения ордовикской системы; 4 – отложения среднего-верхнего отделов кембрийской системы; 5 – отложения нижнего отдела кембрийской системы; 6 – отложения венда-кембрия; 7 – среднепалеозойские граниты; 8 – метаморфизованные блоки; 9 – мраморизованные известняки; 10 – вулканогенно-осадочные отложения нерасчлененные по составу; 11 – области аномально низких значений удельного; 12 – пункты МТ-зондирования; 13 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м; 14 – области распространения зон дробления; 15 – разрывные нарушения, выделенные по данным МТЗ.

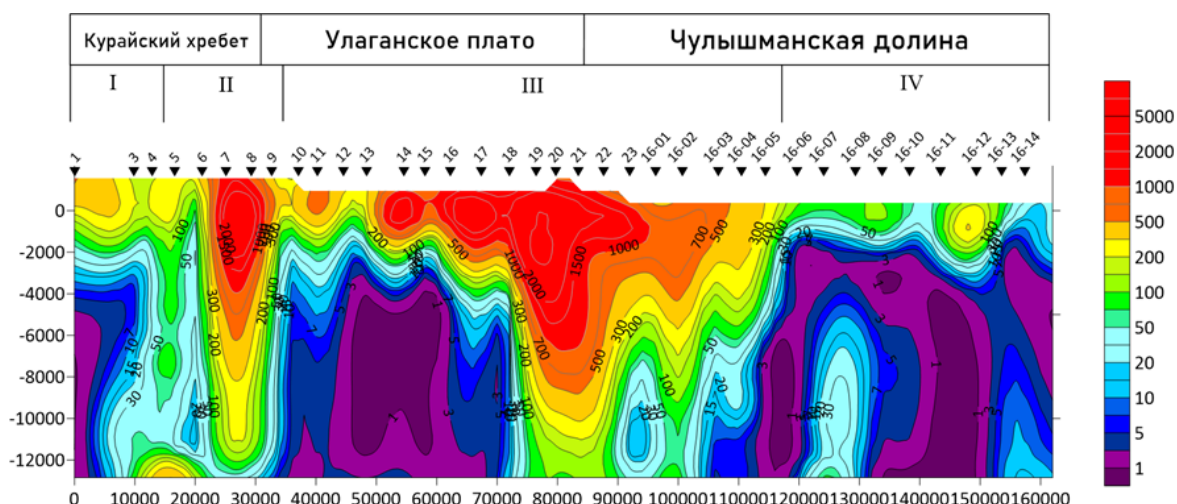


Рис. 2. Глубинный геоэлектрический разрез вдоль профиля п. Акташ – оз. Телецкое по результатам инверсии данных МТЗ.

Обсуждение

Данный профиль протягивается от п. Акташ до берегов оз. Телецкого с юго-запада на северо-восток до п. 20, после него направление меняется, и профиль проходит с северо-востока на северо-запад. Профиль пересекает различные тектонические блоки (рис. 3).

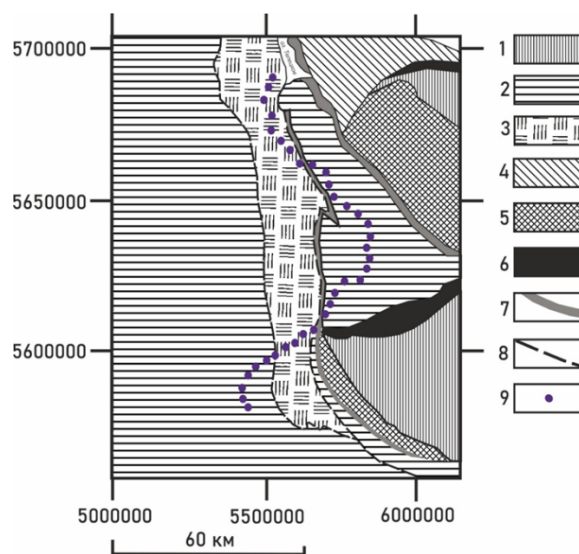


Рис. 3. Структурная схема восточной части Горного Алтая (по данным [7]):

1 – Алтае-Монгольский терреин гондванской группы; 2 – 4 – тектонические единицы окраины Сибирского континента: 2 – Горно-Алтайская, 3 – Телецкая, 4 – Западно-Саянская; 5 – пермская континентальная моласса; 6 – Улаганский сегмент Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны; 7 – позднедевонско-раннекарбоновые зоны сдвигов (Телецко-Башкауская зона сдвига); 8 – позднекарбоново-пермские надвиги и сдвиго-надвиги; 9 – пункты МТ-зондирований.

Первый (п. п. 1 – 4) приурочен к Горно-Алтайской тектонической единице (рис. 1 (I)) и представляет собой фрагмент северо-западного обрамления Курайской впадины. Он представлен мощной толщей нижнекембрийских пород со значениями сопротивления 200 – 250 Ом·м и мощностью около 4000 м, которая перекрыта четвертичными отложениями, характеризующимися сопротивлением 60 – 80 Ом·м и мощностью порядка 200 м.

Следующий структурный блок (п. п. 5 – 9) соответствует Телецкой тектонической единице (рис. 1 (II)). Этот блок сложен породами зеленосланцевой фации метаморфизма (п. 5, п. 9), которые прорваны массивом гранитоидов среднепалеозойского возраста (п. п. 7 – 8). В пределах данного блока, под п. 6, выделяется субвертикальная разломная зона, которая на геоэлектрическом разрезе контрастно проявляется в виде аномалии с низкими значениями УЭС ($\rho = 1 - 3$ Ом·м), на фоне высокоомных магматических пород.

Далее располагается структурный блок (п. п. 10 – 16-05) полностью принадлежащий Горно-Алтайской единице (рис. 1 (III)). Его границы контролируются субвертикальными разломными нарушениями, четко выраженными на разрезе между п. п. 9 – 10 и п. п. 16-05 – 16-06. Эти нарушения являются элементами Телецко-Башкаусской зоны сдвига, которая дважды пересекается исследуемым профилем.

В строении основания данного блока выделяются два основных геологических комплекса, разделенные тектоническим контактом. Первая представлена отложениями среднего-верхнего кембрия с удельным сопротивлением 150 – 200 Ом·м (п. п. 10 – 13). Вторая (п. п. 15 – 18 и п. п. 23 – 16-05) – более древними вулканогенно-осадочными отложениями венда-кембрия со значениями УЭС – 600 – 800 Ом·м. Контакт между этими разновозрастными блоками, согласно данным МТЗ, представляет собой зону дробления, локализованную под п. 14. Общая латеральная целостность этих комплексов также нарушена зонами дробления, прослеженными под п. 11 и п. 17. Эти комплексы перекрыты нерасчлененными отложениями ордовикской системы, выходящими на дневную поверхность. Они выдержаны по мощности – около 500 м, а значения сопротивления составляют 300 – 400 Ом·м.

В центральной части рассматриваемого блока (п.п. 19 – 22), выделена высокоомная область со значениями удельного сопротивления 2800 – 3500 Ом·м. Она интерпретируется как гранитоидный массив среднепалеозойского возраста, которая отличается повышенной устойчивостью к денудации по сравнению к вмещающим породам.

Участок профиля между п. 16-06 и п. 16-14 пересекает Телецкую тектоническую единицу (рис. 1 (IV)). Верхнюю часть разреза составляют кайнозойские осадки, которые четко разделяются на два геоэлектрических горизонта: 1) верхний с сопротивлением 40 – 60 Ом·м и мощностью 200 м; 2) нижний с сопротивлением 50 – 120 Ом·м и мощностью 300 м. Эти современные отложения, согласно полученным данным, залегают на отложениях среднего-верхнего кембрия с сопротивлением 150 – 200 Ом·м и изменяющейся мощностью от 750 м до 2000 м в пределах изучаемого участка.

Нижняя часть разреза представляет собой область аномально низких сопротивлений ($\rho = 1 - 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), глубина залегания верхней кромки которой погружается от -500 м до -3000 м.

Полученный в результате инверсии данных магнитотеллурических зондирований глубинный геоэлектрический разрез (рис. 2) отражает масштабные структурные элементы земной коры в пределах исследуемого профиля.

Приповерхностная часть разреза (до глубин около -2500 м) отличается относительно высокими значениями удельного сопротивления (от 100 до 2000 $\text{Ом} \cdot \text{м}$), что соответствует комплексу пород осадочного чехла.

На глубинном геоэлектрическом разрезе (рис. 2) четко прослеживаются все особенности строения, выделенные на разрезе осадочного чехла.

– Блок I (п. п. 1 – 4). Начиная с глубин -2500 м данный блок характеризуется пониженными значениями УЭС (1 – 20 $\text{Ом} \cdot \text{м}$). В районе пункта 4 выделяется проводящая аномалия с явным наклоном боковых границ и сопротивлением 5 $\text{Ом} \cdot \text{м}$, которая маркирует зону разрывного нарушения.

– Блок II (п. п. 5 – 9) характеризуется высокими значениями УЭС (до 2000 $\text{Ом} \cdot \text{м}$). Этот блок, сложенный метаморфическими и магматическими породами, прослеживается до глубины порядка -12 км. Его целостность нарушается вертикальной разломной зоной, четко выраженной областью аномально пониженных значений удельного сопротивления (5 – 10 $\text{Ом} \cdot \text{м}$) под пунктом 6.

– Блок III (п. п. 10 – 16-05) отличается сложным строением.

1) Участок профиля в районе п.п. 10 - 18 характеризуется сильной раздробленностью земной коры в интервале глубин от -1000 м до -13 км. Это выражается в системе субвертикальных аномальных зон пониженных значений УЭС. Вследствие сглаживающей инверсии по методу Оссат, эти зоны сливаются в единую проводящую область, однако на разрезе осадочного чехла (рис. 1) они уверенно разделяются между собой. Разломная зона под пунктом 17 на глубине, вероятно, имеет слабый наклон на юго-запад, тогда как остальные зоны (между п.п. 9 – 10, 11, 14) сохраняют субвертикальную ориентацию. Данные зоны могут являться глубоко проникающими флюидопроводящими каналами, пронизывающими всю толщу земной коры.

2) Второй участок от п. 18 до п. 22 отличается аномально повышенными значениями УЭС (до 5000 $\text{Ом} \cdot \text{м}$). Этот высокоомный массив интерпретируется как интрузивное тело.

3) Для последнего участка рассматриваемого блока от п. 21 до п. 16-05 характерны повышенные значения сопротивлений в среднем $\sim 700 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

– Блок IV (п.п. 16-06 – 16-14) отделен от предыдущего разломной зоной (между п.п. 16-05 и 16-06), которая является элементом Телецко-Башкаусской зоны сдвига. На разрезе (рис. 2) отчетливо определяется ее наклонный характер. В строении этого блока (рис. 2 (IV)) от глубины -1000 м преобладают проводящие области (1 – 5 $\text{Ом} \cdot \text{м}$), которые чередуются с участками относительно повышенного сопротивления (до 70 $\text{Ом} \cdot \text{м}$). Такая ситуация может указывать на

высокую степень тектонической раздробленности коры и, вероятно, ее повышенном флюидонасыщении.

Заключение

Полученные результаты интерпретации магнитотеллурических данных демонстрируют достаточно раздробленное строение территории как на глубинном разрезе, так и на разрезе осадочного чехла. Важным является выделение неотектонических нарушений, которые четко определяются на геоэлектрических разрезах как области с аномально низкими значениями удельного электрического сопротивления (менее 5 Ом·м). Они, вероятно, могут являться флюидопроводящими каналами, играющими важную роль в современных тектонических процессах. Выявленные особенности распределения электрического сопротивления позволяют сделать вывод о сложной глубинной геодинамике региона, контролируемой коллизионными процессами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонбаатор Д., Куликова А.В., Чен Минг, Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек Е.Э., Трофимова Д.А. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 10, с. 1600-1626.
2. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. – Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 312 с.
3. Дельво Д., Высоцкий Е.М., Клеркс Ж., Кузьмин А., Маттон К., Селегей В.В., Тениссен К., Фернандес-Алонсо М. Свидетельства активной тектоники Телецкого озера (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 10, с. 109-122.
4. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплексных электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая) // Физика Земли, 2011, № 11, с. 63—75.
5. Поспеева Е.В., Витте Л.В., Потапов В.В., Сахарова М.А. Магнитотеллурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности (на примере Горного Алтая) // Геофизика, 2014, № 4, с. 8—16.
6. Эпов М.И., Поспеева Е.В., Витте Л.В. Особенности состава и строения земной коры краевой части Сибирского кратона (в зоне влияния рифтогенных процессов) по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 380—398.
7. Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В., Фудживара И., Ивата К., И. де Граве, Семаков Н.Н., Травин А.В., Кирьянова А.П., Кох Д.А. Роль сдвигов в позднепалеозоо-каменноугольной тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика, 2003, т. 44, № 1-2, с. 49-75.

© Я.О. Бондарчук, 2026