

УДК 551.4: 551.24: 550.837: 550.372 (571.53-13)  
DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-145-153

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН В ЗЕМНОЙ КОРЕ  
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КОЛЫВАНЬ-ТОМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ЗОНЫ  
ПО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ  
И ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННОГО МОРФОГЕНЕЗА РЕЛЬЕФА**

*Павел Степанович Лапин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат географических наук, научный сотрудник, тел. (913)061-02-24, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

*Елена Валентиновна Поспеева*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (953)86-97-88, e-mail: PospeevaEV@ipgg.sbras.ru

*Айдиса Михайловна Санчаа*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией, тел. (913)920-17-47, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Рассмотрены результаты комплексных электромагнитных исследований (МТЗ и ЗС) по профилю п. Пихтовка – п. Половинка (Колывань-Томская складчатая зона). На базе полученных данных и методов генетической морфологии и морфометрии выявлены ослабленные зоны в земной коре северо-восточной части Колывань-Томской складчатой зоны.

**Ключевые слова:** магнитотеллурические зондирования, зондирования становлением поля в ближней зоне, удельное электрическое сопротивление, геоэлектрический разрез, морфогенез, неотектонические движения, ослабленная зона, Колывань-Томская складчатая зона.

**REMOVAL OF WEKENED ZONES IN THE EARTH'S CRUST  
OF THE NORTH-EASTERN PART OF THE KOLYVAN-TOMSK FOLDER ZONE  
USING A COMPLEX OF METHODS OF ELECTROMAGNETIC SOUNDING  
AND ASSESSMENT OF THE CURRENT MORPHOGENESIS OF RELIEF**

*Pavel S. Lapin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (913)061-02-24, e-mail: LapinPS@ipgg.sbras.ru

*Elena V. Pospeeva*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (953)86-97-88, e-mail: PospeevaEV@ipgg.sbras.ru

*Ydisa M. Sanchaa*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Head of of Laboratory, phone: (913)920-17-47, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

The results of complex electromagnetic studies (MTZ and ZS) on the profile of p. Pihtovka – p. Polovinka (Kolyvan-Tomsk folder zone) re considered. On the basis of the obtained data and methods of genetic morphology and morphometry, weakened zones in earth's crust of the north-eastern part of the Kolyvan-Tomsk folded zone are revealed.

**Key words:** magnetotelluric sensing, sounding field formation in the near zone, electrical resistivity, geoelectric section, morphogenesis, neotectonic movements, weakened zone, Kolyvan-Tomsk folded zone.

### *Введение*

Актуальность настоящего исследования объясняется необходимостью разработки критериев оценки активизации глубокопогруженных геологических тел в современном рельефе земной поверхности и выделении в его структуре особенностей, отражающих ослабленные зоны в земной коре. В настоящей работе ослабленные зоны выявляются на основе анализа морфогенетических особенностей в развитии рельефа земной поверхности. Границы районов и областей, определяемые на основе установленных морфогенетических закономерностей, не всегда совпадают с разломами, что подчеркивает различия морфоструктурного и морфогенетического подходов к изучению развития рельефа земной поверхности. Могут возникнуть ситуации, при которых при осуществлении морфоструктурного анализа в осадочном бассейне будут отсутствовать признаки активизации глубокопогруженных геологических тел, а при морфогенетическом – проявляться. Колывань-Томская складчатая зона является примером такой области. В её северо-восточной части (бассейн р. Бакса) были проведены электромагнитные исследования (МТЗ и ЗС), результаты которых позволили определить основные черты глубинной электропроводности верхней части земной коры, в том числе и осадочного чехла. Показано, что самый верхний геоэлектрический горизонт, приуроченный к отложениям неогена, имеет субгоризонтальное залегание. Так же отмечено резкое несоответствие структурного плана нижней и верхней частей современного разреза осадочного бассейна. Основная задача настоящих исследований заключалась в выделении в рельефе земной поверхности свойств, характеризующих современную активизацию глубокопогруженных геологических тел и контролирующих в пределах современного разреза области с низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС).

### *Объект и методы исследования*

Колывань-Томская складчатая зона (КТСЗ) является составной частью территории, на которой происходит сочленение крупных тектонических структур, различающихся по геологическому, геоморфологическому и глубинному строению, времени заложения, магматизму и условиям геодинамического развития. На протяжении многих десятилетий интерес к изучению особенностей развития КТСЗ обусловлен необходимостью прогноза и поиска рудных объектов. КТСЗ

относится к областям, где уровень геологического познания и освоенности существенно ниже, поскольку её большая часть покрыта четвертичными отложениями [1]. В дополнение к этому объект исследования перекрыт субгоризонтально залегающими неогеновыми отложениями, что, с одной стороны, в значительной степени усложняет выявление морфогенетических особенностей развития рельефа земной поверхности до неоген-четвертичного этапа, а с другой, – упрощает их выявление на современном этапе его развития, поскольку формирование современного рельефа происходит за счет активизации неотектонических движений в четвертичное время.

По результатам геоморфологического районирования исследуемая область расположена в пределах Кузнецко-Салаирской провинции и соответствует Колывань-Томской возвышенности. Последнюю можно рассматривать как погребенный мел-палеогеновый пенеппен с останцами раннемезозойского пенеппена [2]. Современная речная сеть вскрывает этот пенеппен и разрушает перекрывающий его покров кайнозойских осадков. Следовательно, опираясь на результаты ранее проведенных геоморфологических исследований можно предположить, что в современных рельефообразующих процессах отражается активизация глубокопогруженных геологических тел, и их анализ позволит решить поставленную перед исследователями задачу.

Для решения поставленной задачи применялись электромагнитные методы (МТЗ и ЗС) и методы морфогенетического анализа современного рельефа земной поверхности. Кратко дадим описание применяемых методов.

Работы МТЗ выполнялись на основе технологий V5 System – 2000 тремя комплектами аппаратуры «MTU-5» компании «Phoenix Geophysics» (Канада) (рис. 1). Регистрация пяти компонент магнитотеллурического поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) в диапазоне периодов 0,003 – 1000 секунд осуществлялась в синхронном режиме, что позволило увеличить точность и производительность наблюдений. Шаг наблюдений по профилю в среднем составил 5-7 км. Для регистрации электрических компонент магнитотеллурического поля (МТ-поля) применялась крестообразная установка с длиной приемных линий 100 м. Плановая и высотная привязка пунктов зондирования проводилась с помощью системы GPS. Длительность записи на точке наблюдения в среднем составляла 19-22 часов.

Для обработки полевых данных использовалось программное обеспечение «Phoenix Geophysics» (программа SSMT), основанное на корреляционном методе, позволяющим рассчитать функции взаимной корреляции всех компонент МТ-поля. 1-D и 2-D инверсия выполнены в программном комплексе «WinGLink». Качественная и количественная интерпретация проводилась по методике, подробно рассмотренной в [3-7].

В процессе качественной интерпретации выполнялся анализ магнитотеллурических данных на основе упрощенного теста М.Н. Бердичевского. Анализируются три магнитотеллурических параметра:  $N_{mt}$  – параметр неоднородности [6],  $skew_s$  – параметр асимметрии [7],  $skew_B$  – фазочувствительный па-

раметр асимметрии [8]. Они оценивались по отношению к пороговым значениям  $\delta$ , лежащими в интервале  $0,05 \div 0,15$  [6]. На периодах  $T < 40$  с значения всех магнитотеллурических параметров лежат в пределах пороговых:  $0,05 \div 0,15$ , что свидетельствует о возможности одномерных оценок верхней части разреза. С понижением частоты на периодах  $T > 40$  с значения параметров возрастают и лежат в интервале  $0,15 \div 0,5$ , что говорит о наличии глубинных трехмерных эффектов. Количественная интерпретация осуществлялась в рамках 1D инверсии методом подбора на ПК, путем минимизации функционала невязки (1), характеризующего среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой от модельной.

$$L(q) = \sum \left[ \frac{\rho_T(T_m) - \rho_{Tg}(T_m)}{\rho_T(T_m)} \right]^2 \quad (1)$$

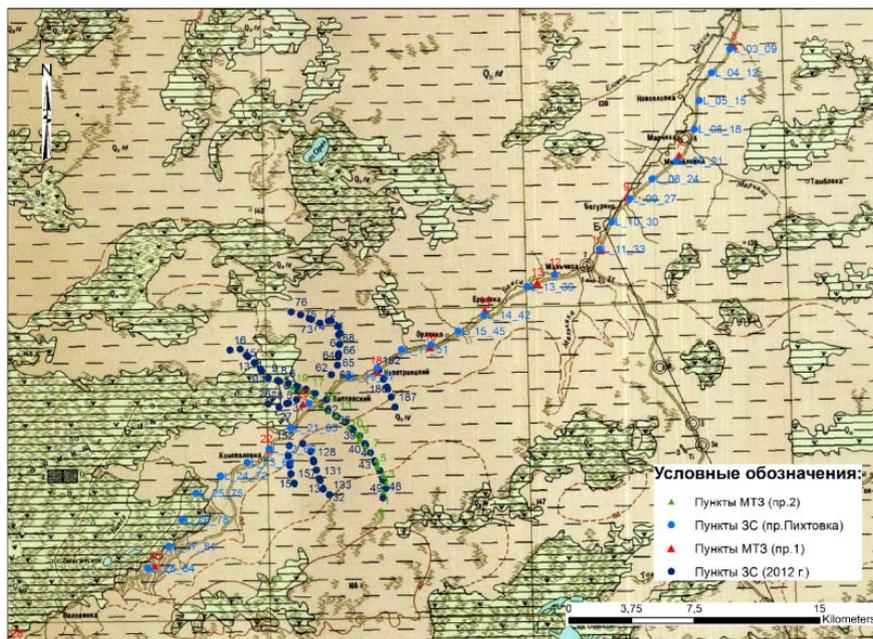


Рис. 1. Схема расположения пунктов электромагнитных зондирований

Таким образом, определены значения  $\rho$  и  $h$  в каждом пункте зондирования. Геоэлектрический разрез осадочного чехла строился в программе полойной интерпретации Geology cross section, глубинный – в программе WinGLink (Оссам). Глубинный разрез строился в два этапа. На первом этапе была выполнена 1-D инверсия продольных ( $\rho_{yx}$ ) кривых, выбор которых осуществлялся на основе комплексирования с зондированиями становлением поля. Затем была проведена совместная (бимодальная) инверсия продольных и поперечных кривых.

Использованные в работе данные метода ЗС получены с установками в модификации «разнесенные симметричные петли». Разнос составил 20-155 м и 430-700 м, в зависимости от особенностей рельефа местности, размеры генераторной петли 500×500 м, приемной 72×72 м. Интерпретация данных основана на решении обратной задачи с использованием программы 1-D моделирования и инверсии EMS, разработанной в ИНГГ СО РАН [3]. В данной работе представлены результаты по одному профилю (на карте пункты этого профиля отмечены голубым цветом. Профиль Пихтовка). Геоэлектрическая модель в пункте ЗС 2 была построена исходя из информации по скважине 1-Р на Пихтовской площади. Геоэлектрический разрез построен в программе CorelDraw.

Метод морфогенетического анализа рельефа земной поверхности достаточно подробно описан нами ранее [9, 10]. В настоящей работе оценка влияния новейших движений осуществлена в рамках системно-формационного подхода на основе анализа баланса масс, который учитывал перемещение объема обломочного материала в пределах экзогенно-активного слоя и вычислялся с привлечением общего показателя эрозионно-денудационного расчленения. Общая расчлененность рельефа земной поверхности зависит от многих факторов, которые суммарно отражаются в результирующей взаимодействия эндогенных и экзогенных сил и проявляются в рельефообразующих процессах. В результате проведенного анализа были построены схема и разрез, характеризующий проявления современных рельефообразующих процессов. Совместный анализ профиля МТЗ и разреза, характеризующего проявления современных процессов, позволил нам выявить ослабленные зоны в земной коре северо-восточной части КТСЗ.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Результаты исследований по профилю п. Пихтовка – п. Половинка. Исследуемый профиль располагается в северо-западной части Колывань-Томской складчатой зоны (КТСЗ). КТСЗ, представленная комплексами обширного задугового бассейна в тылу островодужной системы, слагающей фундамент юго-восточной части Западно-Сибирской плиты, прошла сложный и длительный путь геологического развития. Это обусловило формирование здесь разнообразных структурно-вещественных комплексов: островодужных ( $D_2-C_2$ ), коллизионных ( $C_2-T_1$ ) и внутриплитовых ( $T_2-Q$ ). В современных тектонических структурах КТСЗ является единственной обнаженной частью Центрально-Западносибирской складчатой системы, слагающей фундамент юго-востока Западно-Сибирской плиты. Юго-восточной границей КТСЗ служит система крупных пологих тектонических разломов, по которым комплексы зоны надвинуты на каледонско-герцинские структуры северо-западной части Салаира, Кузбасса и кузнецкого Алатау. На северо-западе зона перекрывается мезо-кайнозойским чехлом.

По зондированиям становлением поля на геоэлектрическом разрезе (рис. 2) выделяются 4 основных горизонта. Первый, самый верхний ( $\rho_1$ ), включает

озерно-аллювиальные верхне-плиоцен-нижнечетвертичные отложения верхне-кочковской подсвиты (N2-Q1Kс2) и верхнечетвертичные отложения федосовской свиты (Q2fd) с УЭС 10-40 Ом·м. Второй геоэлектрический горизонт (ρ2) приурочен к отложениям покурской свиты нижнего мела (K1-2рк) и палеогена (Pg2-3) с УЭС 6-12 Ом·м. Третий геоэлектрический горизонт (ρ3) включает отложения нижнего мела (K1kls, K1tr, K1klm) и юрско-меловой и юрской систем (J3-K1mr, Jtm) с УЭС 3,8-16 Ом·м. Четвертый геоэлектрический горизонт (ρ4) можно разделить на две части: низкоомную (пикеты 84-57) и высокоомную (пикеты 54-2). Область с высокими значениями удельного электрического сопротивления также делится на области повышенного (35-120 Ом·м) и пониженного УЭС (10-23 Ом·м на пикетах 45-18). Эту область по геологическим данным можно отнести к породам палеозойского основания, в котором на пикетах 2-15 выделяется интрузивное тело. Область пониженных значений УЭС на пикетах 45-42, по всей видимости, соответствует разломной зоне. Область с низкими значениями удельного электрического сопротивления четвертого слоя (0,23-8 Ом·м) содержит два или три геоэлектрических подслоя.

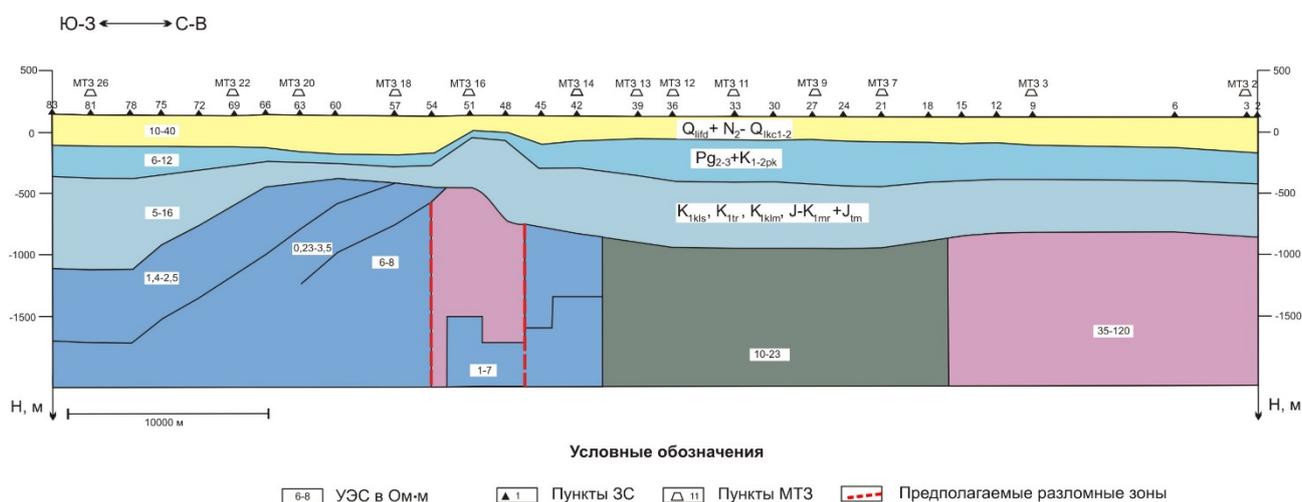


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по данным ЗС

По особенностям распределения глубинной электропроводности изученный профиль можно разделить на две контрастно различающиеся части: восточную и южную (рис. 3, а). В разрезе земной коры восточного отрезка профиля (п.п. 2-14) выделяется обширная область с высокими значениями удельного электрического сопротивления (более 600 Ом·м), разделенная на две неравные части проводящей зоной (п.п. 9-11) (30 Ом·м) с явным наклоном боковых границ. В плане высокоомная область совпадает с Пихтовским интрузивным телом кислого состава, выделенным по данным магнитной съемки (рис. 3, б). Это интрузивное тело показано на ряде тектонических схем [11], и установлено, что его активизация проявляется в морфогенетических особенностях развития рельефа земной поверхности [12,13].

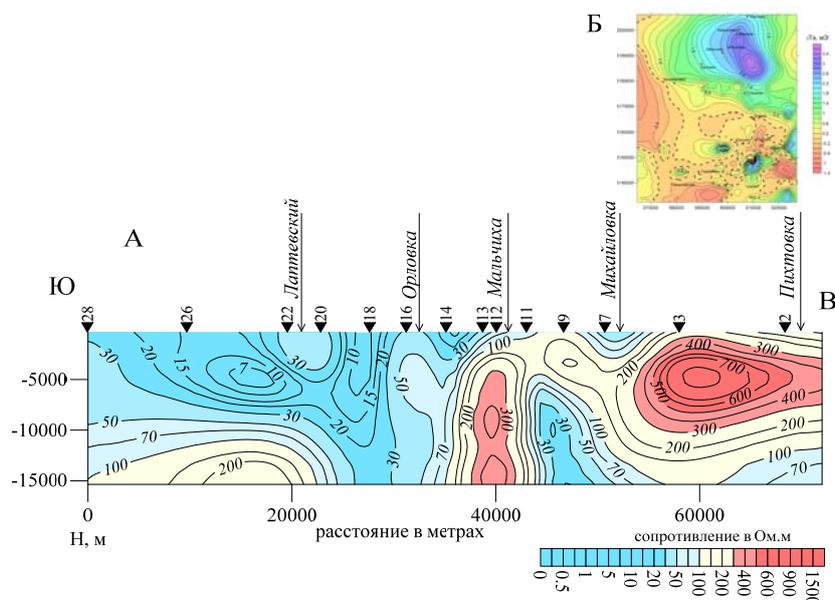


Рис. 3. Глубинный геоэлектрический разрез по профилю п. Пихтовка-п. Половинка (а) и карта магнитных аномалий листа N-44-V (б)

Разрез земной коры южного отрезка профиля характеризуется преобладанием абсолютно низких значений УЭС (7-30 Ом·м). Верхняя часть разреза осложнена серией субвертикальных и наклонных неоднородностей с минимальными значениями УЭС (пп.26-22; 20-16). Геологическая природа этих проводящих объектов пока не ясна и предполагает более детальное изучение этого отрезка профиля.

Глубинный геоэлектрический разрез был сопоставлен с интенсивностью проявления современных рельефообразующих процессов, характеризующих активизацию глубокопогруженных геологических тел (рис. 4). Совместный анализ двух разрезов позволил нам в пределах п.18 выявить ослабленную зону в современном разрезе земной коры. Она характеризуется низкоомными значениями УЭС и максимальным значениям интенсивности современных рельефообразующих процессов. Выявленная зона проявляется до глубины 15000 м и является тем водоразделом, который, как указывалось выше, делит анализируемые профили на южный и восточный отрезок. Каждый из них характеризуется разным литологическим строением не только по горизонтали, но и по вертикали. По вертикали отрезки имеют диаметрально противоположное литологическое строение. Южный отрезок в верхней части разреза имеет низкие, а в нижней – высокие значения УЭС. Для восточного отрезка профиля отмечена обратная закономерность.

Именно эти различия не позволили нам выявить между п.п. 9-11 ослабленную зону, которая фиксировалась бы на дневной поверхности. Эта зона прослеживается до глубин 5000 м и перекрывается выше по разрезу высокоомными значениями УЭС. Однако, следует отметить, что Пихтовское интрузивное тело, фиксирующееся в восточной части разреза, всё же проявляется в современных рельефообразующих процессах, что согласуется с ранее полученными данными [12].

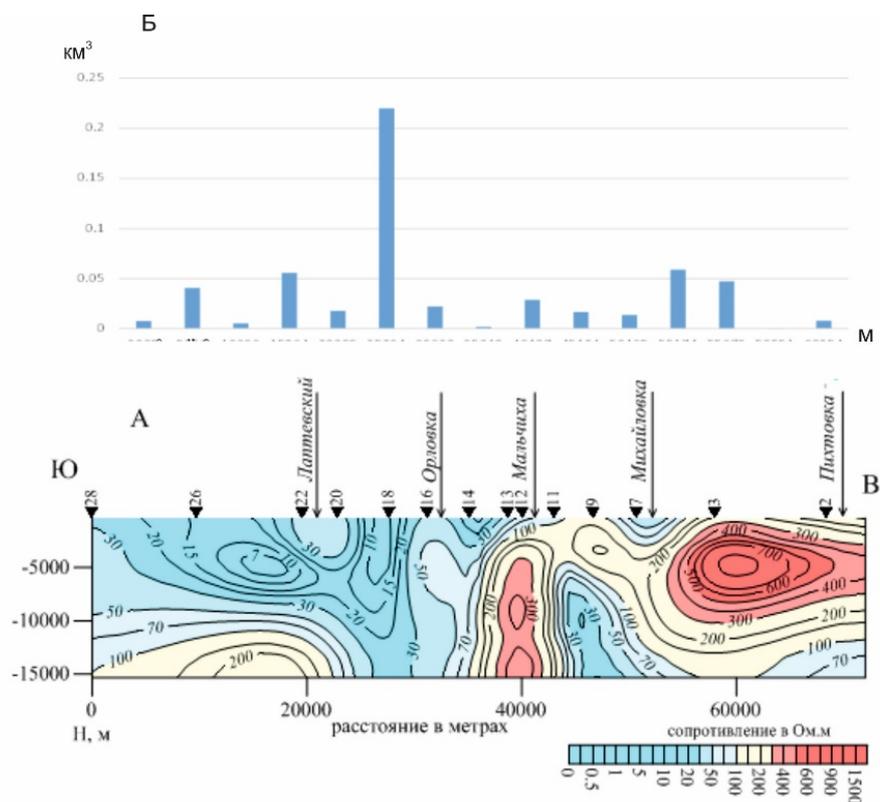


Рис. 4. Глубинный геоэлектрический разрез по профилю п. Пихтовка-п. Половинка (а) и интенсивность проявления современных рельефообразующих процессов по профилю п. Пихтовка – п. Половинка (б)

### Заключение

По результатам интерпретации электромагнитных зондирований построен детальный разрез верхней части земной коры (включая осадочный чехол) в пределах северо-восточной части КТСЗ и выявлена ослабленная зона, которая ранее не проявлялась в верхней части разреза по результатам морфотектонического анализа. Предложенный комплекс методов позволил выявить глубинный характер проявления рельефообразующих процессов и подтвердить наличие в пределах изученного объекта ослабленной зоны глубокого заложения. Так же установлена современная активизация глубокопогруженного Пихтовского интрузивного тела. Все вышперечисленное позволяет говорить об информативности предложенного комплексного подхода при выявлении ослабленных зон в земной коре.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минерагения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. – Новосибирск: Гео, 2001. – 243 с.
2. Рельеф Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука, 1988. – 206 с.

3. 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.
4. Магнитотеллурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности / Е.В. Поспеева, Л.В. Витте, В.В. Потапов, М.А. Сахарова // Геофизика. – 2014. – № 4. – С. 8-16.
5. 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.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 679 с.
7. Swift С.М. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: thesis of dissertation. – Cambridge: MIT, 1967. – 223 p.
8. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // Journal of Geophysics. – 1988.. – Vol. 62. – P. 119-127.
9. Лапин П.С. Изменение элементов морфогенеза земной поверхности как инструмент эстетических преобразований рельефа / Рельеф и человек. – М: Научный Мир, 2007. – С. 65-71.
10. Лапин П.С. Морфогенез как критерий оценки изменения современного морфологического состояния мезо-кайнозойского чехла на примере Каймысовской нефтегазоносной области Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2018. – № 2 (34). – С. 24-35.
11. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты – М.: Недра, 1981. – 143 с.
12. Лапин П. С., Оленченко В. В. Проявление интрузивных тел в современном рельефе земной поверхности Колывань-Томской складчатой зоны // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 3. – С. 176–183.
13. Лапин П.С., Оленченко В.В. Региональная составляющая в неравномерности неотектонического развития Ононской впадины и сопредельных территорий // Геология и минерагения Северной Евразии: материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР (Новосибирск, 3-5 октября 2017 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2017. – С. 127-128.

© П. С. Лапин, Е. В. Поспеева, А. М. Санчаа, 2019