

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КРАЕВЫХ СТРУКТУР КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ (*Горный Алтай*) ПО ДАННЫМ ГЕОЭЛЕКТРИКИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИСТОЧНИКОМ

Н.Н. Неведрова^{1,2}, Е.В. Деев^{1,2}, А.М. Санчаа¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090,
Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

На основе интерпретации данных геоэлектрики с контролируемым источником (методы ВЭЗ и ЗС) представлено глубинное строение основных элементов внутренней структуры Курайской впадины и определен характер ее пограничных взаимоотношений с горным обрамлением. Выявлено, что наиболее погруженные части впадины располагаются вдоль ее северного, южного и восточного горного обрамления. Установлено, что осадочное выполнение во впадине разделяется на два геоэлектрических комплекса, имеющих разные величины УЭС. Нижний низкоомный комплекс соответствует палеоген-неогеновым существенно глинистыми озерным отложениям. Перекрывающий их высокоомный комплекс соотносится с более грубозернистыми фациями полифациальных четвертичных отложений. Эти комплексы отвечают различным этапам формирования структуры Курайской впадины. В палеогене—неогене в качестве основного механизма формирования впадины следует рассматривать формирование левосдвигового бассейна типа *pull-apart*. С началом четвертичного периода в северной части Курайской впадины при сдвиговых движениях обособляется Центрально-Курайская впадина, а обрамляющие хребты и блоки в условиях общего сжатия надвигаются на Курайскую впадину, превращая ее в структуру рампового типа. При этом в краевых частях возникают форберговые поднятия, а ограничивающие впадину краевые грабены превращаются в рампы и полурампы.

Неотектоника, электромагнитные зондирования (ЗС), метод ВЭЗ, Курайская впадина, Горный Алтай.

DEEP STRUCTURE AND MARGINS OF THE KURAI BASIN (*Gornyy Altai*), FROM CONTROLLED-SOURCE RESISTIVITY DATA

N.N. Nevedrova, E.V. Deev, and A.M. Sanchaa

The deep structure of the Kurai basin and its junction with the flanking mountains has been studied by controlled-source resistivity surveys (vertical electric sounding and transient electromagnetic methods). According to the data processing results, the basin is the deepest along its northern, southern, and eastern margins. The sedimentary fill comprises two resistivity units corresponding to two sequences deposited at different stages of the basin history. The lower, less resistive unit consists of Paleogene–Neogene lacustrine clay and the higher-resistivity upper unit represents coarser Quaternary deposits. In Paleogene–Neogene time, the basin formed by the left-lateral pull-apart mechanism. The earliest Quaternary strike-slip faulting in the setting of overall compression produced the Central Kurai basin within the northern Kurai basin, while the flanking ranges and fault blocks thrust upon the basin transforming it into a ramp. Thus, piedmont steps rose along the basin margins, and the marginal grabens became ramps and half-ramps.

Neotectonics, resistivity surveys, TEM, VES, Kurai basin, Gornyy Altai

ВВЕДЕНИЕ

Курайская межгорная впадина является второй по размерам среди аналогичных структур Горного Алтая. Совместно с отделенной от нее межгорной перемычкой (Сукорский массив) Чуйской котловиной они образуют единую систему кайнозойских впадин на юго-востоке Горного Алтая со сходной историей неотектонического развития и кайнозойского осадконакопления. Геолого-геофизические исследования показывают, что Курайская впадина имеет сложные структурные взаимоотношения с обрамляющими хребтами, неоднородное внутреннее строение и разделяется на ряд самостоятельных депрессий [Бондаренко и др., 1968; Дельво и др., 1995; Неведрова и др., 2011].

Значительный объем работ методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) был проведен на территории Курайской впадины в 60—80 годах прошлого века. Измерения были выполнены по системе профилей различного простирания (рис. 1). Следует отметить, что часть данных ВЭЗ по ряду причин не позволяет получить глубины до опорного горизонта (фундамента) впадины.

В настоящее время (2007—2011 гг.) строение впадины уточняется на основе измерений комплексом методов геоэлектрики с контролируемым источником, включающим ВЭЗ и глубинные электромагнитные зондирования становлением поля (ЗС) (см. рис. 1). Применение метода ЗС дает возможность получить глубинные геоэлектрические параметры осадочного заполнения и опорного горизонта для всей территории Курайской впадины. Для построения геоэлектрических моделей используется весь объем полевых данных за разные годы.

Цель статьи — на основе геолого-геофизической интерпретации материалов геоэлектрики представить глубинное строение основных элементов внутренней структуры Курайской впадины и ее пограничных взаимоотношений с горным обрамлением, что в конечном итоге позволит обосновать историю и кинематику ее формирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РАЙОНА КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ И ЕЕ ОСАДОЧНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Курайская впадина характеризуется ромбовидными очертаниями и имеет размеры длинной диагонали ромба, ориентированной субширотно, около 35 км, короткой — около 20 км (см. рис. 1). С севера впадина ограничена Кубадринским массивом, представляющим собой изометричный неотектонический блок, главенствующая вершина которого гора Верховье Ортолыка имеет абсолютную отметку 3446 м над ур. м.

С северо-востока в качестве ограничений впадины выступают Курайский и эшелонированно его надстраивающий Тонгулакский хребты. Оба хребта, в свою очередь, являются наиболее приподнятыми частями (до 3200 м) резко асимметричного Кубадринско-Башкаусского блока, имеющего более пологий и длинный склон, обращенный к долине р. Башкаус. В сторону Курайской впадины хребты погружаются лестницей уступов с абсолютными отметками 2850—2950, 2400—2500 и 2000—2100 м.

Не менее четкие тектонические уступы ограничивают Курайскую впадину и со стороны Северо-Чуйского хребта, абсолютные отметки которого достигают 4000 м. В нижней части склона хребта выделяется серия опущенных блоков с высотами 2000—2500 м, полностью или частично перекрытых ледниковыми и генетически связанными с ними отложениями.

Западными ограничениями Курайской впадины служат Оройский, Белькенекский и Акташский блоки с максимальными высотами, редко превышающими 2200 м. Наконец, с юго-востока и востока Курайская впадина ограничена уступами Сукорского (Чаган-Узунского) массива, выровненная поверхность которого находится на абсолютных отметках 2500—2900 м.

Кайнозойские отложения впадины залегают на дислоцированных осадочных, вулканогенно-осадочных, вулканогенных, магматических и метаморфических комплексах рифея—палеозоя и фрагментах позднемел-раннепалеогеновой коры выветривания [Туркин, Федак, 2008].

Переотложенные продукты коры выветривания (карачумская свита), находящиеся в основании осадочного выполнения впадины, обнажены на дневной поверхности и вскрыты скважинами в северной части впадины [Алешко и др., 1962; Бондаренко и др., 1968]. Здесь они представлены белесыми каолинизированными супесями, зеленовато-серыми и ярко-желтыми суглинками с щебнем местных пород, зеленовато-серыми и красно-бурыми глинами, ярко-желтыми песками. Мощность отложений не превышает 12.5 м. Согласно утвержденной в настоящее время стратиграфической схеме кайнозоя Горного Алтая [Легенда..., 1999], свита датируется палеоценом.

Вышележащий комплекс осадочного выполнения впадины составляют: 1) существенно глинистые и мергелисто-глинистые отложения кошгачской свиты (олигоцен—ранний миоцен), содержащие в своем составе прослой бурых углей; 2) известковистые песчанистые глины, замещающиеся в приобортовых частях галечно-гравийно-песчано-глинистыми осадками — туерькская свита (средний миоцен—средний плиоцен); 3) галечно-гравийно-песчано-глинистые отложения бекенской свиты (эоплейстоцен); 4) валунно-щебнистые, сцементированные палево-желтыми суглинками образования башкаусской свиты (ранний—средний неоплейстоцен), выделенные вдоль южного склона Курайского хребта; 5) полифациальный комплекс отложений среднего—позднего неоплейстоцена, представленный ледниковыми, водно-ледниковыми и озерными фациями, в который вложены или перекрывают его голоценовый аллювий, пролювий и коллювий [Алешко и др., 1962; Бондаренко и др., 1968; Лузгин, Русанов, 1992; Легенда..., 1999].

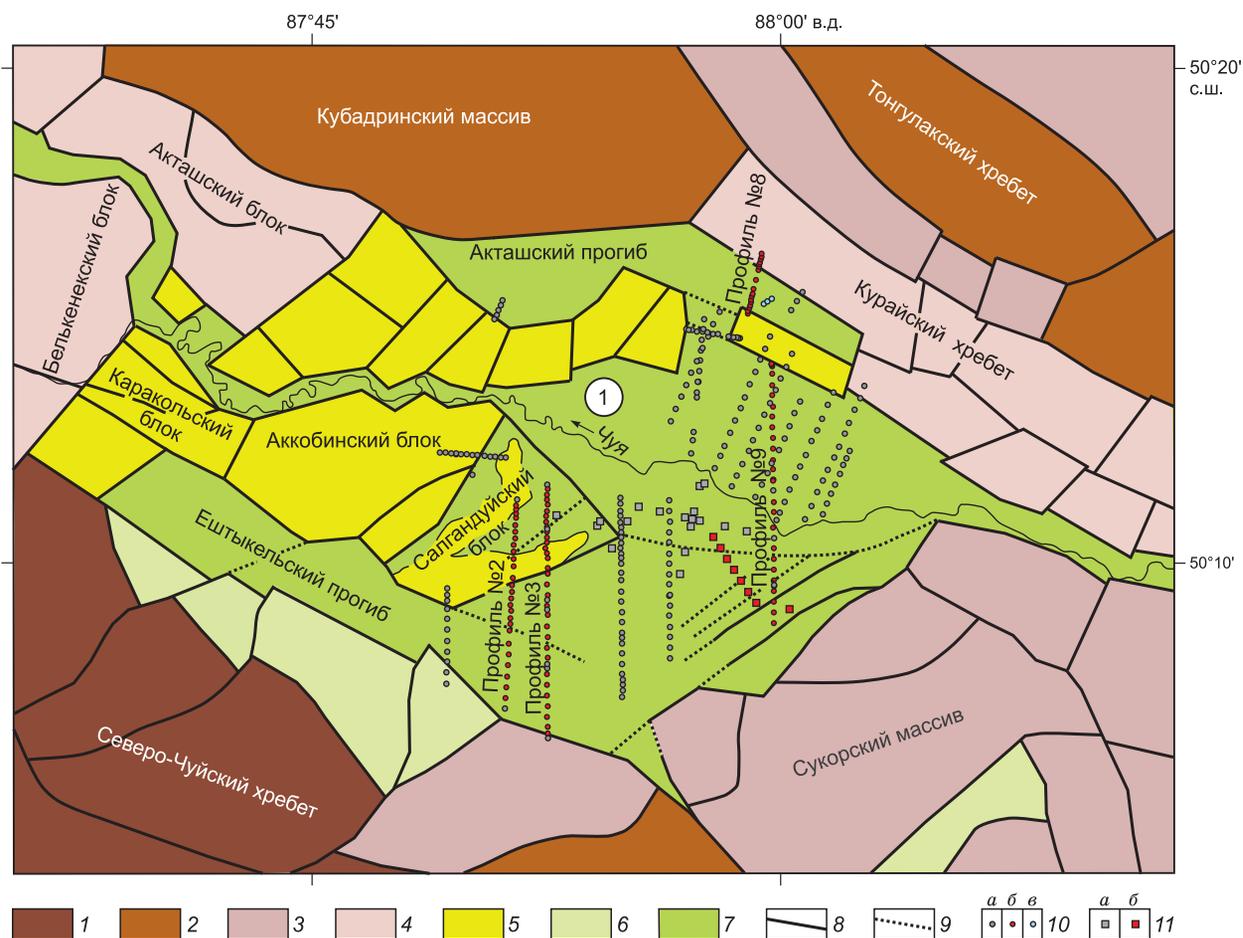


Рис. 1. Неотектоническая схема района Курайской впадины с вынесенными профилями геоэлектрики.

1—6 — поднятые блоки с абсолютными высотами (м): 1 — свыше 3500, 2 — от 3500 до 3000, 3 — от 3000 до 2500, 4 — от 2500 до 2000, 5 — от 2000 до 1500, 6 — от 2500 до 2000, полностью или частично перекрытые осадками; 7 — осадочные комплексы, перекрывающие блоки с отметками ниже 2000 м; 8 — выявленные разломы; 9 — предполагаемые разломы; 10 — пункты ВЭЗ: а — архивные; б — архивные, использованные при построении обсуждаемых в статье профилей; в — пункты ВЭЗ 2010 г.; 11 — пункты ЗС: а — 2007—2010 гг., б — выполненный в 2011 г. профиль. Цифра 1 в кружке — Центрально-Курайская впадина.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ МЕТОДОВ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

Общая схема фактического материала электромагнитных методов, выполненных на территории депрессии в разные годы, представлена на рис. 1.

Метод ВЭЗ. Измерения выполнялись с использованием симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже. Расстояние между профилями варьирует от 1.5 до 4 км. Шаг по профилю изменяется от 400 до 600 м. Максимальные разносы генераторной линии АВ/2 были выбраны в зависимости от предполагаемой мощности осадочной толщи на различных участках впадины и составляли в среднем от 500 до 1000 м.

В настоящее время все данные ВЭЗ, полученные на территории депрессии, проинтерпретированы в программных комплексах моделирования и инверсии с использованием горизонтально-слоистой модели [Эпов и др., 1990]. На рис. 2 показаны характерные кривые ВЭЗ (полевые и синтетические), а также полученные в результате интерпретации геоэлектрические модели. Полевые кривые получены на разных участках Курайской впадины и более подробно будут рассмотрены в следующем разделе. Общий вывод, который можно сделать из анализа кривых (см. рис. 2), — это недостаточная глубинность метода ВЭЗ в условиях межгорной впадины. Основных причин можно назвать несколько. Во-первых, из-за сложных условий рельефа не всегда возможно разложить установку большого размера. Во-вто-

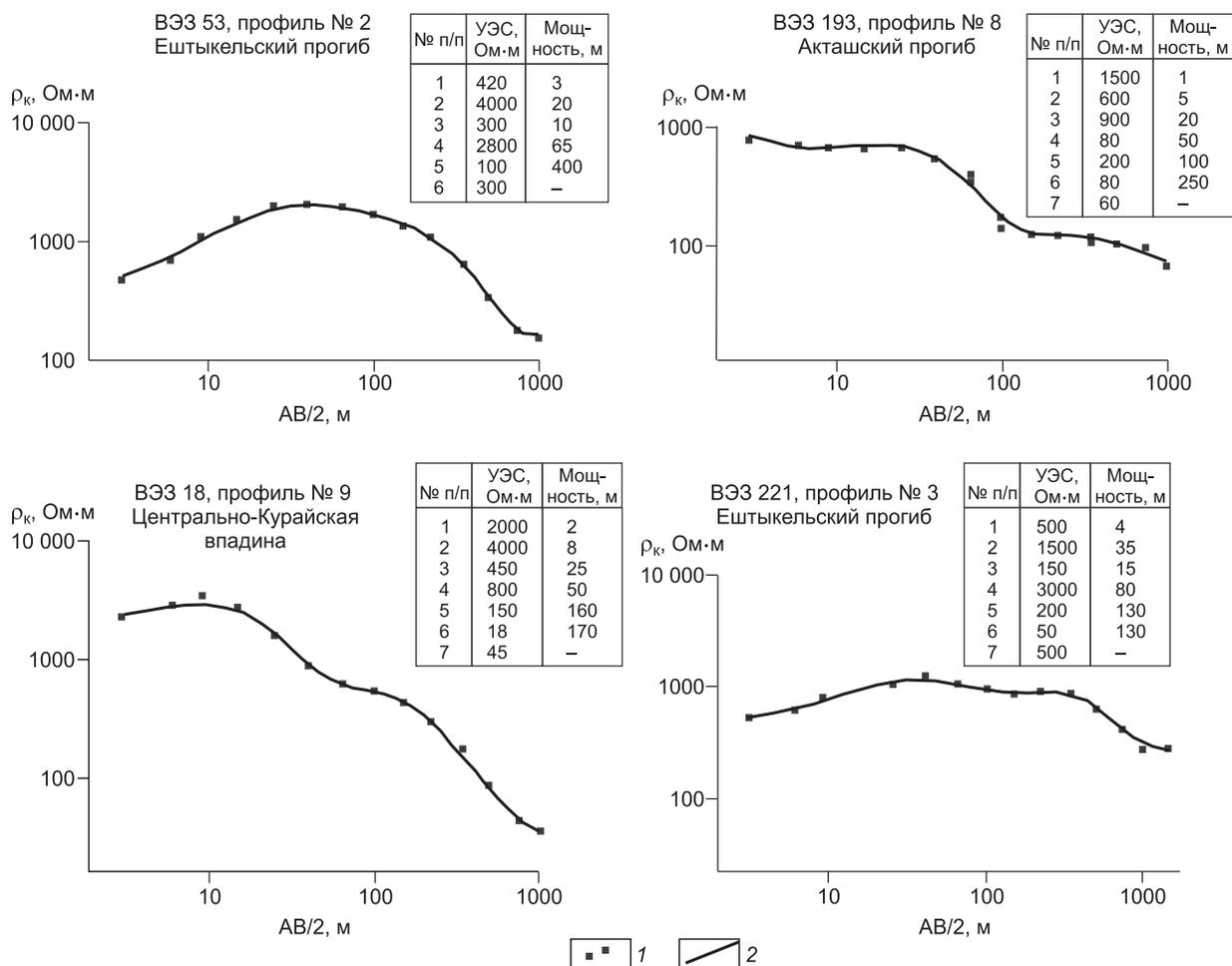


Рис. 2. Характерные кривые ВЭЗ, полученные на различных участках Курайской впадины.

Показаны полевые данные (1), теоретические кривые (2) и геоэлектрические модели.

рых, наличие высокоомных пород в верхней части разреза усложняют условия заземления, зачастую снижая качество материала. И, конечно, главное кроется в физических основах метода — протяженные высокоомные слои являются экраном для методов постоянного тока. К таким отложениям относятся, например, многолетнемерзлые породы с аномально высокими значениями УЭС, присутствующие всегда в межгорных впадинах.

Обоснование и выбор интерпретационной модели приведен в нескольких публикациях [Неведрова и др., 2011; Деев и др., 2012], можно только отметить, что была привлечена вся имеющаяся априорная геологическая информация (данные скважин, геологические разрезы). Выбранная геоэлектрическая модель принципиально сохраняется для всей площади Курайской впадины, хотя имеются данные ВЭЗ, интерпретация которых невозможна в рамках горизонтально-слоистой модели. Для этих данных выполнен предварительный анализ характерных искажений кривых ВЭЗ на основе трехмерного моделирования. В ходе интерпретации полевых данных используются двумерные и трехмерные программы моделирования и инверсии.

Метод зондирования становлением поля. Измерения методом ЗС в Курайской впадине осуществлялись в нескольких модификациях. Для этой работы выполнены индукционные зондирования с возбуждением электромагнитного поля незаземленной петлей. Приемными установками служили соосные и разнесенные петли. Измерения ЗС по профилю (см. рис. 1) были выполнены с установками «соосные» симметричные петли с размерами генераторной петли 200×200 м², а приемной 100×100 м². Ток в генераторном контуре составлял 50 А. Эта установка характеризуется высокой локальностью и ее параметры обеспечивают необходимую глубинность. Данные «соосных» установок наименее всего подвержены искажениям, связанным с неоднородным строением верхней части разреза, поэтому позво-

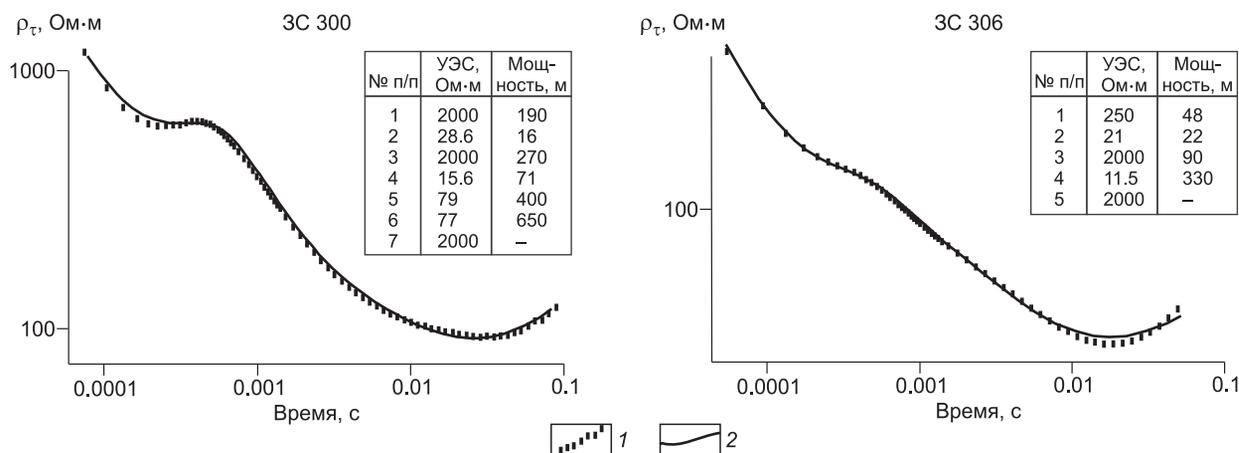


Рис. 3. Полевые (1) и теоретические (2) кривые ЗС по профилю в восточной части Курайской впадины.

ляют получить наиболее достоверные глубинные геоэлектрические параметры. Расстояние между пунктами ЗС было выбрано в 400 м, только пункт ЗС 299 расположен на расстоянии 1500 м от пункта ЗС 300. Интерпретация была выполнена в программных пакетах ЭРА и EMS [Эпов и др., 1990; Хабинов и др., 2009].

На рис. 3 представлены полевые данные ЗС и результат их инверсии — геоэлектрические модели, характеризующие строение восточной части впадины. Сравнение теоретических и полевых кривых показывает, что не всегда полевые данные можно интерпретировать с использованием горизонтально-слоистой модели. Для ЗС 300 на самых ранних временах наблюдается отклонение левой ветви теоретической кривой от полевых данных более чем на 5%. Для ЗС 306 несовпадение данных присутствует в области минимума и правой ветви кривой ρ_{τ} . Отклонения небольшие и, например, для ЗС 306 связаны с неоднородным строением фундамента [Эпов и др., 2006], а для ЗС 300, скорее всего, с присутствием высокоомных неоднородностей в верхнем слое.

По данным ЗС получены геоэлектрические характеристики и общая мощность осадочной толщи, которая превышает 1500 м. Геоэлектрические модели (см. рис. 3) отражают значительную глубинность метода ЗС и целесообразность его использования для глубинных исследований в условиях межгорных впадин.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

Во внутренней структуре Курайской впадины отчетливо намечаются три самостоятельных отрицательных структурных элемента (см. рис. 1): Центральная-Курайская впадина, Акташский и Ештыкельский прогибы [Неведрова и др., 2011].

Акташский прогиб (грабен) занимает наиболее северную часть Курайской впадины. Северная граница грабена представляет собой четвертичный надвиг (входящий в серию разновозрастных надвигов в зоне Курайского глубинного разлома) палеозойских пород на кайнозойские отложения, который геоморфологически выражен в виде уступа вдоль подножия Курайского хребта и Кубадринского массива [Бондаренко и др., 1968]. Предположительно грабен протягивается и далее на запад вдоль подножия Кубадринского массива, затем вписывается в тектоническое ущелье р. Чибитка и, наконец, открывается в Сорулукельскую впадину. По крайней мере, под висячим крылом надвига в районе р. Ярлыамры (Акташское рудное поле) скважинами 328, 326 и 323 вскрыты рыхлые кайнозойские отложения, выполняющие узкий погребенный ныне грабен. Их мощность по скв. 328 составила 215 м. Кроме того, отложения Акташского прогиба вскрыты скважинами 396 и 1/6, которые на забое в 264 и 342 м соответственно не вышли из кайнозойских отложений [Бондаренко и др., 1968]. Зона надвига перекрыта верхнеоценными ледниковыми отложениями, поэтому само время надвиговых подвижек оценено не позднее среднего неоплейстоцена, а их амплитуда могла достигать 200 м [Мухин, Кузнецов, 1939; Бондаренко и др., 1968].

От остальной части Курайской впадины Акташский грабен отделен узким горстовым выступом — форбергом (см. рис. 1). S-образно изогнутый форберг сложен отложениями девонского и камен-

ноугольного возраста и служит примером новейшей инверсионной структуры. На современную активность ограничивающих его разломов указывают возникшие в результате Чуйского землетрясения 2003 г. разнотипные вторичные сейсмогенные деформации, местами частично подновляющие более древние сейсмоуступы высотой до 1.5—2 м [Рогожин, Платонова, 2002; Рогожин и др., 2008]. Исследование авторами указанных работ эскарпа, протягивающегося вдоль северного разломного ограничения форберга, показало наличие в стенках траншей взбросовых трещин, падающих в сторону осевой части горста. Амплитуды смещений по трещинам колеблются от первых сантиметров до 2 м. Радиоуглеродное датирование палеочувств из коллювиальных клиньев указывает, что многоактное подновление сейсмоуступа могло происходить в результате землетрясений с возрастными 7820 ± 140 лет (ГИН-9085, калиброванный возраст — 8589—8602 лет), 2850 ± 110 лет (ГИН-9081, калиброванный возраст — 2847—3083 лет) и 1040 ± 80 лет (ГИН-9082, калиброванный возраст — 906—1057 лет). Аналогичные работы по изучению южного сейсмоуступа позволили выявить малоамплитудные (5—15 см) взбросовые трещины, погружающиеся на северо-восток. Радиоуглеродные датировки нарушенных трещинами отложений в 345 ± 30 лет (ИГАН-1702) и 324 ± 30 лет (ИГАН-1692) показывают, что возраст сейсмического события, при котором сформировались взбросы, моложе 1700 г.

Имеются данные ВЭЗ по трем профилям, полученные в Акташском прогибе. На рис. 4, А представлен разрез, построенный по результатам современной интерпретации архивных данных ВЭЗ по профилю № 8, который полностью пересекает прогиб. Пример обработки типичной кривой ВЭЗ 193 в центральной части профиля представлен на рис. 2. Разносы генераторной установки не превышали 750 м, что в геоэлектрических условиях прогиба, где в верхней части разреза присутствуют высокоомные отложения, не позволило получить необходимую глубинность для выделения опорного горизонта в центральной части профиля. Здесь следует отметить и тот факт, что для архивных ВЭЗ погрешность измерений в ряде случаев превышает 5 %. Анализ полевых данных показал, что это связано, скорее всего, с аппаратными помехами. Тем не менее, по данным ВЭЗ 187-189 (юго-запад) и ВЭЗ 203-205 (северо-восток), получены глубины до опорного горизонта. Предлагаемая геологическая интерпретация границ поверхности фундамента на геоэлектрическом разрезе профиля № 8 отражает ступенчатое воздымание обрамляющих Акташский грабен Курайского хребта с севера и форберга — с юга по системе взбросов, что позволяет на рассматриваемом участке характеризовать его как структуру рампового типа. По данным архивных ВЭЗ можно только примерно оценить мощность осадочной толщи, превышающей 600 м. Распределение УЭС по профилю характеризует сложную структуру осадочной толщи. Имеется крайне неоднородный, судя по значениям УЭС, верхний геоэлектрический слой до глубин 50 м. Ниже по разрезу выделены три относительно проводящих слоя с УЭС 60—250, 130—330 и 50—220 Ом·м соответственно. Руководствуясь параметрическими измерениями ВЭЗ [Деев и др., 2012] и данными бурения в западной части грабена [Бондаренко и др., 1968], верхний из слоев можно условно соотносить с нижней частью четвертичных и эоплейстоценовыми отложениями (гравийные суглинки, пески, гравелиты), а два оставшихся — с существенно глинисто-алевритистыми неогеновыми отложениями. Среди последних местами могут присутствовать прослои песка и более грубых гранулометрических фракций, что может приводить к увеличению значений УЭС до 400—600 Ом·м. Обращают на себя внимание значительные изменения мощности всех геоэлектрических слоев в соседних пунктах ВЭЗ. Это свидетельствует о том, что отложения прогиба деформированы при окончательном оформлении его как рамповой структуры.

По результатам интерпретации данных ВЭЗ, полученных в 2010 г. по короткому профилю в центре Акташского прогиба (см. рис. 4, Б), в двух пунктах наблюдения (Ку_3, Ку_4), где максимальные разносы установки (АВ/2) составили 1 км, прослежена граница осадочный чехол—фундамент и получена мощность осадочного выполнения грабена в 600 м. В пикетах на западном участке профиля (Ку_1, Ку_2) из-за топографических особенностей местности не удалось выполнить измерения на разносах АВ/2 более 600 м и достигнуть необходимой глубинности. По этим данным получены только геоэлектрические параметры осадочного заполнения.

Полевые кривые ВЭЗ для всех пунктов зондирования профиля 2010 г. показаны на рис. 4, В. Анализ качества полевых данных позволяет сделать вывод о возможности интерпретации в каждом отдельном пункте ВЭЗ с использованием горизонтально-слоистой модели. И погрешности измерений, и средняя невязка подбора геоэлектрической модели находятся в пределах 5—7 %, точность определения параметров разреза обусловлена влиянием неоднородной верхней части разреза. В результате инверсии полевых данных ВЭЗ получены четырехслойные геоэлектрические модели. Осадочная толща дифференцирована по значениям удельного электрического сопротивления, опорный горизонт — высокоомный. Таким образом, по результатам интерпретации современных измерений ВЭЗ уточнено геоэлектрическое строение Акташского прогиба — получены глубины до опорного горизонта.

Центральная часть Курайской впадины и ее восточное обрамление. В центральной и восточной частях Курайской впадины геоэлектрические исследования выполнены методами ЗС, ВЭЗ. Необходи-

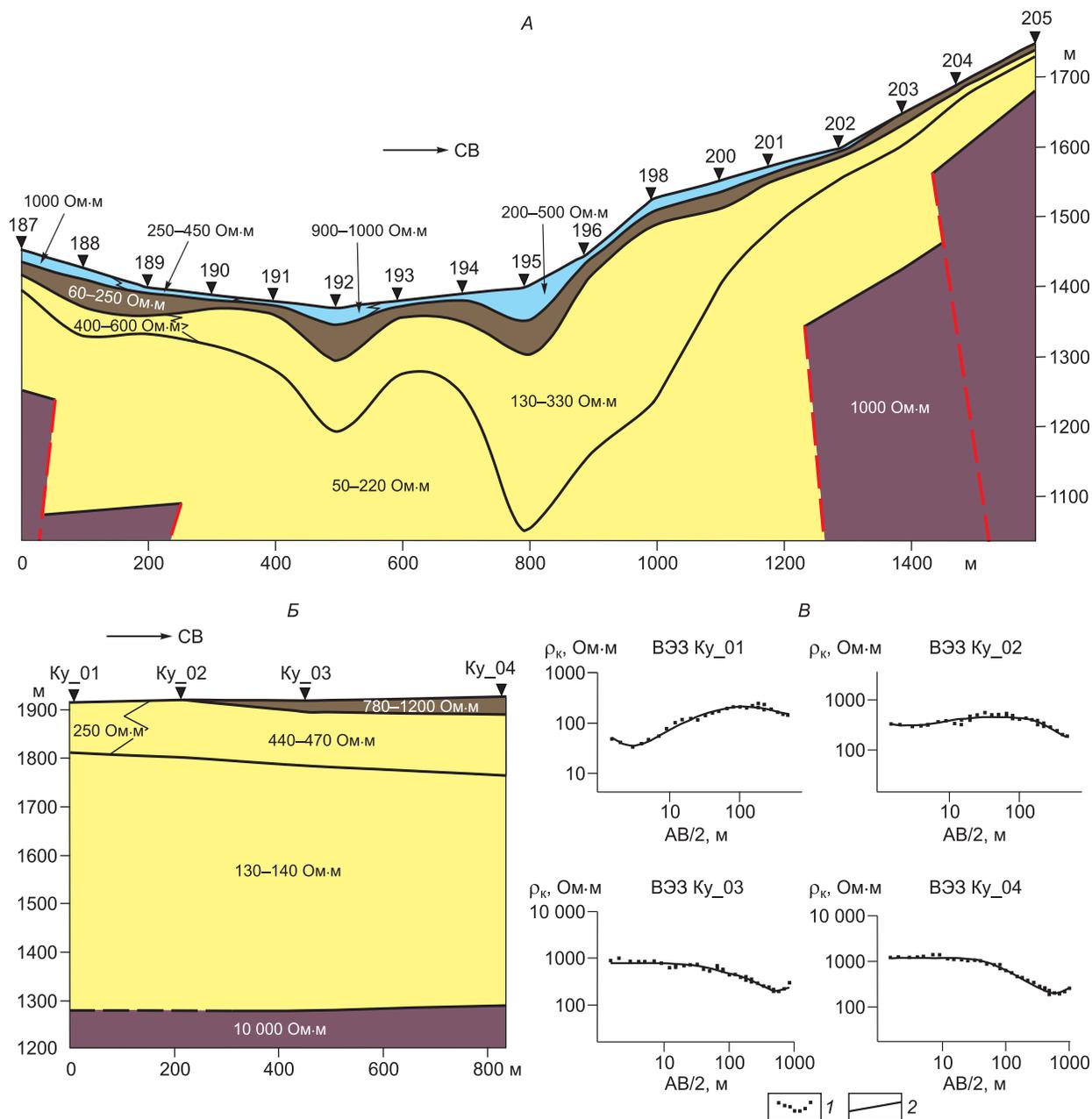


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилям через Акташский прогиб.

A — разрез по профилю № 8, по данным архивных ВЭЗ; *Б* — разрез по профилю 2010 г.; *В* — полевые кривые ВЭЗ (2010 г.). Показаны полевые данные (1), теоретические кривые (2). Красные штриховые линии — предполагаемые разломы. Цветом показаны геоэлектрические слои с различным УЭС.

димось современных измерений в этой области Курайской впадины также обусловлена неполными данными о ее глубинном строении.

В Центрально-Курайской впадине профили ВЭЗ в большинстве своем начинаются от р. Чуя и простираются на северо-восток, где часть из них пересекает границу впадины и форберга, отделяющего Акташский прогиб. Интерпретация электромагнитных данных [Неведрова и др., 2011] показывает, что мощность осадочного выполнения Центрально-Курайской впадины составляет 300—500 м, а при приближении к южной границе форберга фундамент и осадочное выполнение впадины нарушены разломами рис. 5, *A*.

На рис. 5, *A* представлен геоэлектрический разрез по меридиональному профилю № 9 (см. рис. 1), который полностью пересекает Центрально-Курайскую впадину и своим южным концом вплотную

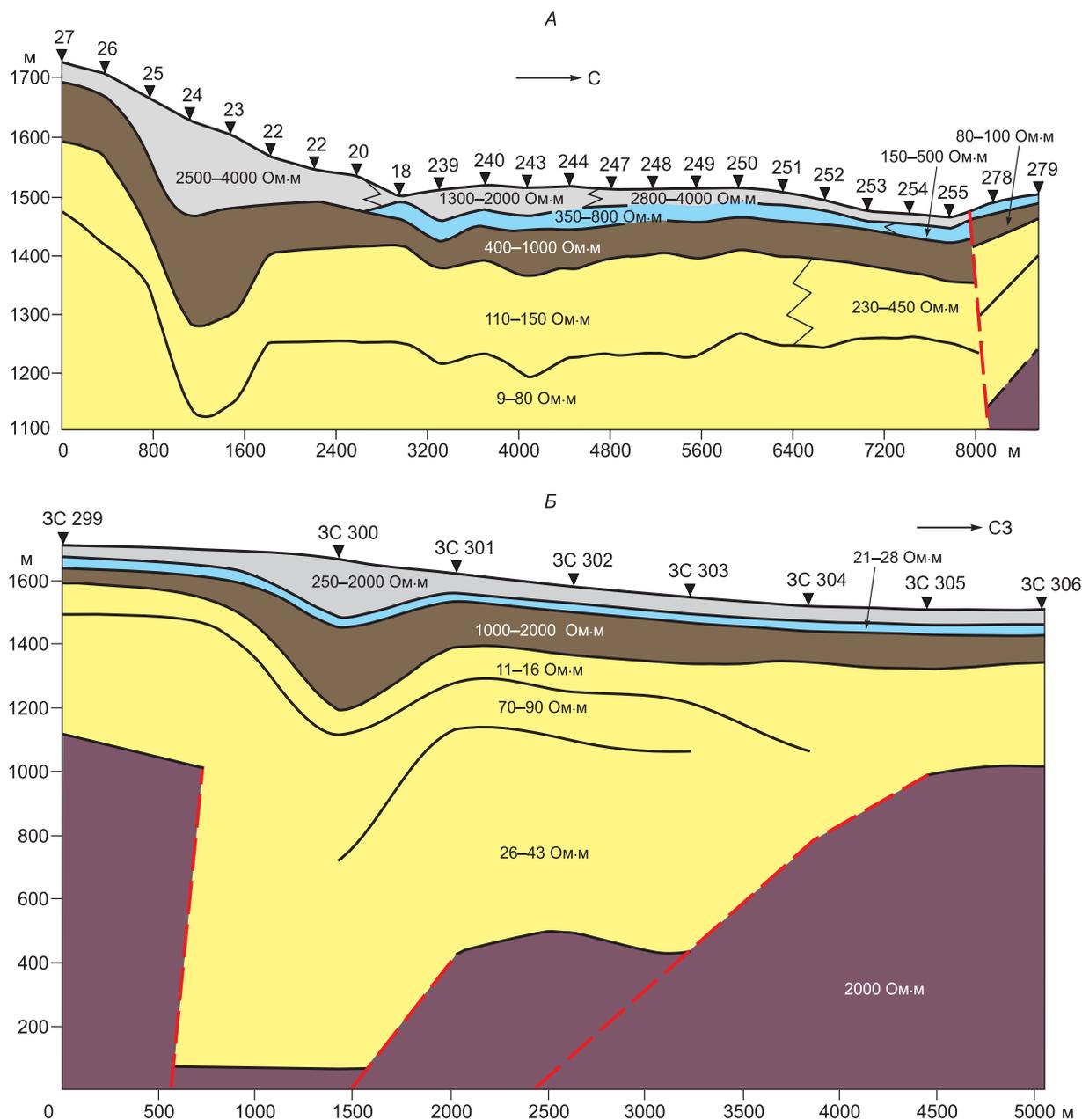


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы в центральной и юго-восточной частях Курайской впадины.

A — разрез по меридиональному профилю ВЭЗ № 9; *Б* — геоэлектрический разрез по данным ЗС. Остальные усл. обозн. см. на рис. 4.

подходит к расположенному перед Сукорским массивом форбергом, в пределах которого в поднятие вовлекается осадочное выполнение Курайской впадины (рис. 6). Измерения по профилю выполнены в 1980-х годах, расстояния между пунктами ВЭЗ составляли 500 м, максимальные разносы генераторной линии изменялись от 500 до 1000 м; значительная часть зондирований выполнена с разносами в 500 м. На рис. 2 для ВЭЗ 18 показаны полевые данные, теоретическая кривая и модель, отражающая геоэлектрические характеристики разреза Центрально-Курайской впадины.

При обработке этих данных было выяснено, что глубинность метода ВЭЗ недостаточна в существующих геоэлектрических условиях. На северном участке профиля по измерениям ВЭЗ границу до опорного горизонта можно было определить только в рамках эквивалентных решений обратной задачи с большой погрешностью, поэтому положение кровли фундамента оценивается условно. Мощность осадочного выполнения впадины предполагается в 400—500 м. В южной и центральной частях профиля

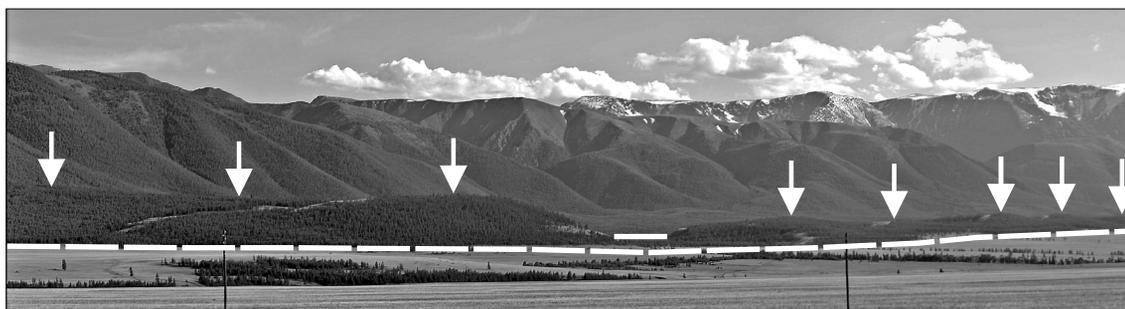


Рис. 6. Вид на форберг вдоль западной границы Сукорского блока с автотрассы М-52 (Новосибирск—Ташанта).

Белые штриховые линии — предполагаемые разломы.

определение глубин залегания кровли опорного горизонта при выбранных параметрах измерений оказалось за пределами возможности метода.

По геоэлектрической модели, отражающей строение осадочного выполнения Курайской впадины вдоль обсуждаемого профиля, отчетливо выделяются два комплекса: нижний — низкоомный (УЭС в интервалах 9—80, 110—150, 230—450 Ом·м) мощностью 300—400 м и верхний — высокоомный мощностью 50—300 м. С учетом параметрических измерений в соседней Чуйской впадине [Деев и др., 2012] и данных бурения в центральной и южной частях Курайской впадины [Лузгин, Русанов, 1992] можно условно сопоставить нижнюю часть геоэлектрического разреза с глинистыми и песчано-глинистыми разрезами неогеновых кошагачской и туерькской свит, а верхнюю — с комплексом четвертичных отложений.

Для уточнения глубинного строения в восточной части Курайской впадины были проведены профильные измерения методом ЗС, позволившие достичь значительно большей глубинности по сравнению с методом постоянного тока. Профиль ЗС ориентирован с северо-запада на юго-восток, где он пересекается с меридиональным профилем ВЭЗ, причем последний юго-восточный пункт ЗС 299 находится на вершине форберга (см. рис. 1).

На рис. 3 в качестве примера приведены полевые и синтетические кривые, а также геоэлектрические модели для двух пунктов ЗС. В обоих случаях получены многослойные модели. Они хотя и характеризуются чередованием проводящих и высокоомных слоев, в то же время имеют существенные отличия, по которым можно судить о неоднородности строения восточной части Курайской впадины.

Уже предварительный качественный анализ кривых кажущегося сопротивления (ρ_{τ}) этого профиля показал, что каждая из них имеют правую восходящую ветвь, что позволяет определить глубины до высокоомного опорного горизонта (фундамента) и его электрическое сопротивление. В результате количественной интерпретации полевых данных получен глубинный разрез всего осадочного чехла по профилю ЗС (см. рис. 5, Б). На геоэлектрическом разрезе видно, что фундамент впадины ступенчато погружается по системе сбросов с северо-запада на юго-восток, образуя глубокий грабен (полурампы), ограниченный со стороны форберга разломом взбросовой кинематики. Наибольшие глубины до фундамента отмечаются в районе пункта ЗС 300 и достигают почти 1600 м. Выделяемый в рельефе поверхности фундамента грабен компенсирован слоями с УЭС 26—43 и 70—90 Ом·м, которые, согласно данным бурения [Лузгин, Русанов, 1992], могут быть сопоставлены с существенно глинистыми осадками туерькской и кошагачской свит. Вероятно, с отложениями туерькской свиты следует соотносить еще один низкоомный слой с УЭС 11—16 Ом·м. Выше по разрезу следуют главным образом высокоомные слои, которые могут быть соотнесены с грубообломочными валунно-галечно-гравийными отложениями бекенской свиты и перекрывающего ее комплекса четвертичных осадков. Присутствие целого ряда участков разреза с пониженными величинами УЭС можно объяснять наличием на этом стратиграфическом уровне песчано-глинистых фаций.

Для двух разрезов (см. рис. 5) геоэлектрические модели на некоторых участках отличаются по количеству слоев и значениям УЭС, что, с одной стороны, связано с физическими основами и методикой измерений методов постоянного и переменного тока, с другой, — с тем, что профили пересекают различные участки впадины с общим крайне неоднородным строением. Тем не менее данные обоих методов отражают основные особенности строения восточной части Курайской впадины: 1) наличие глубокого прогиба в южном завершении профилей; 2) присутствие в осадочном выполнении впадины



Рис. 7. Вид на Ештыкельский прогиб с автодороги на перевальной седловине к оз. Джангыс-коль.

Белые штриховые линии — предполагаемые разломы.

Ештыкельский прогиб (грабен) северо-западной ориентировки протягивается вдоль основания Северо-Чуйского хребта. Его южная разломная граница с Северо-Чуйским хребтом и его северной предгорной ступенью частично перекрыта неоплейстоценовыми ледниковыми отложениями. Северный разлом, ограничивающий прогиб, на участке от оз. Караколь до р. Актуру на поверхности выражен в виде тектонического уступа, в котором обнажаются коренные породы. Высота уступа на некоторых участках может достигать нескольких десятков метров (рис. 7).

Разломные ограничения Ештыкельского грабена проявились при анализе распределения гипоцентров афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. Их проецирование на плоскость, пересекающую прогиб, показало наличие двух разломных зон, отстоящих друг от друга на расстоянии около 4 км и погружающихся под Северо-Чуйский хребет под углом 70° [Новиков и др., 2008]. На поверхности вдоль подножия Северо-Чуйского хребта в результате землетрясения 2003 г. образовалась система протяженных (6—40 м), но малоамплитудных трещин и сейсмогравитационные структуры [Высоцкий и др., 2004]. В аллювии высокой надпойменной террасы р. Актуру и перекрывающих склоновых отложениях выявлена система секущих их древних трещин взбросовой кинематики, плоскости которых падают в сторону Северо-Чуйского хребта [Рогожин и др., 2008].

В юго-западной части Ештыкельского прогиба было выполнено несколько субмеридиональных профилей электроразведки методом ВЭЗ. Максимальные разносы достигали 1000 м. Измерения выполнены в прошлые годы, а современная интерпретация архивных данных ВЭЗ проведена в программном комплексе «СОНЕТ».

На рис. 8 представлены геоэлектрические разрезы по профилям № 2 и № 3. В северной части профилей в районе пунктов ВЭЗ 42, 41, 40, 35, 36 (профиль № 2), а также ВЭЗ 105—111 (профиль № 3) на поверхности присутствуют выходы высокоомных пород, соответствующие Салгандуйскому блоку фундамента. Последний совместно с Аккобинским и Каракольским блоками коренных пород разделяет Центрально-Курайскую впадину и Ештыкельский прогиб. Вершинные поверхности перечисленных блоков находятся на высотах 1500—2000 м (см. рис. 1). Северная часть Салгандуйского блока перекрыта рыхлыми отложениями мощностью 100—150 м (пункты ВЭЗ 30—34, 38, 39 профиля № 2 и пункты 97—104 профиля № 3). По данным ВЭЗ получен полный разрез осадков, перекрывающих северную часть Салгандуйского блока, и характеристики опорного горизонта. Резкие изменения в гипсометрии поверхности фундамента и выклинивание осадков говорят в пользу разломного ограничения наложенной на Салгандуйский блок впадины. По результатам инверсии полевых данных ВЭЗ получены геоэлектрические параметры разреза для этого участка Курайской впадины. В разрезе присутствует высокоомная верхняя часть (первый и второй слои), соотношенная с четвертичными отложениями. Третий и четвертый слои по значениям УЭС могут быть условно отнесены к тонкообломочным неогеновым отложениям, которые на этом участке дифференцированы по значениям сопротивлений. УЭС более 1000 Ом·м характерно для пород фундамента.

К югу от Салгандуйского блока на обоих разрезах наблюдается глубокий Ештыкельский прогиб с мощностью выполняющих осадков более 600 м, имеющий форму телескопического грабена, на который надвигается Северо-Чуйский хребет. В верхней части прогиба до глубин примерно в 150—200 м присутствуют неоднородные по составу четвертичные осадки с резким разбросом УЭС. Ниже по разрезу для профиля № 3 четко выделяются два слоя с интервалами сопротивлений 150—180 и 50—60 Ом·м. По геологическим данным (скважины 13, 14, 15), эти слои могут быть соотношены с отложениями турынской и кошагачской свит [Лузгин, Русанов, 1992]. На разрезе по профилю № 2 граница между этими двумя слоями практически не прослежена. На большей части профиля выделен один слой с мощностью

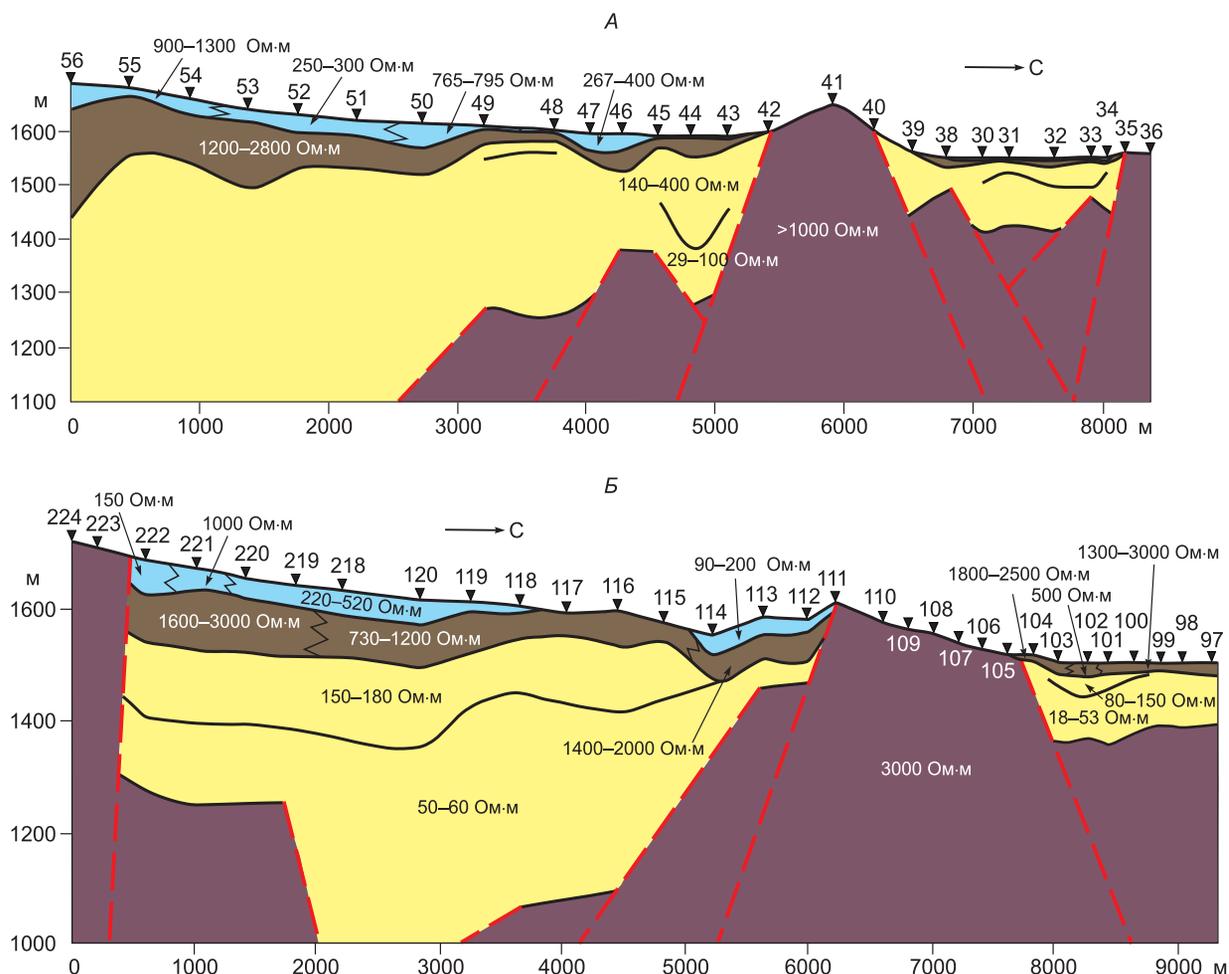


Рис. 8. Геоэлектрические разрезы по профилям ВЭЗ № 2 и № 3.

более 400 м и УЭС в интервале от 70 до 120 Ом·м. Лишь в районе пунктов ВЭЗ 43—45 выделены два слоя с сопротивлениями 29—100 и 140—400 Ом·м. Ниже осадочного комплекса данным ВЭЗ выделяется опорный электрический горизонт с УЭС ~ 1000—3000 Ом·м, который, по геологическим данным, соотнесен с палеозойским фундаментом.

В юго-западной части Ештыкельского прогиба, по данным ВЭЗ, не удалось оценить максимальные глубины залегания фундамента. Можно лишь констатировать, что мощность отложений, выполняющих прогиб, превышает 600—650 м.

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Геолого-геофизические данные свидетельствуют о том, что Курайская впадина имеет многостадийную историю формирования, а достаточно резкие изменения мощностей осадочного выполнения впадины отражают блоковую структуру ее строения и подвижки по разломам. Первый импульс медленного воздымания обрамляющих Курайскую и Чуйскую впадины структур отмечается в раннем палеогене, когда после этапа тектонической стабильности, начавшемся в позднем мелу и сопровождавшимся интенсивной денудацией, формированием пенеппена и коры выветривания, начинают накапливаться продукты переротложения коры выветривания (карачумская свита), представленные пролювиально-делювиальными отложениями с присутствием грубообломочных (щебнегалечных и гравийных прослоев и пачек) [Девяткин, 1965; Дельво и др., 1995; Деев и др., 2012].

Выявленный на основе комплексных электромагнитных исследований с контролируемым источником характер распределения мощностей, выполняющих Курайскую впадину отложений, при котором наиболее погруженные части впадины располагаются вдоль ее северного (Акташский грабен), южного (Ештыкельский грабен) и восточного горного обрамления, позволяет высказать предположение, что в

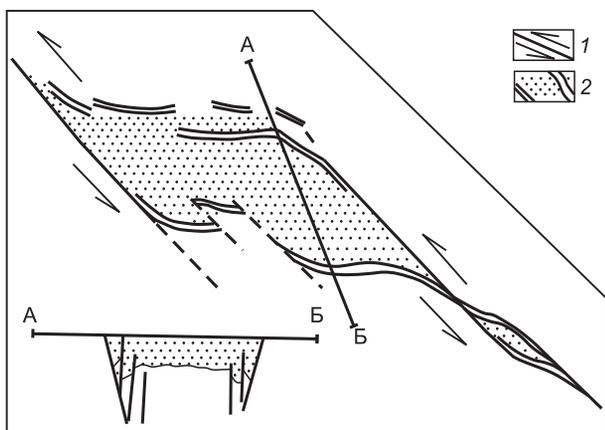


Рис. 9. Схема строения впадины, образовавшейся в зоне растяжения, по [Буртман и др., 1963].

1 — структуры сдвига, 2 — структуры растяжения.

дробления. В таких случаях образуются впадины с плоскими днищами и резко нарушенными бортами, т.е. вдоль их бортов сосредоточены наиболее погруженные участки, что придает профилю этих впадин характерную форму (рис. 9). Такой вывод частично подтверждается и анализом трещиноватости отложений на западном участке четвертичного надвига, в районе Красных ворот, где восстановлен условно третичный тензор напряжений, соответствующий косому взбросово-левосдвиговому смещению ЗСЗ простирания с падением поверхности разлома на СВ [Дельво и др., 1995]. Доминирование сдвигового режима в этот временной интервал объясняет отсутствие активных вертикальных движений по данным трекового датирования [De Grave et al., 2007; Glorie et al., 2012]. В пределах Курайского осадочного бассейна на протяжении рассматриваемого стратиграфического интервала господствовал режим озерной седиментации с формированием существенно глинистых отложений, замещающихся в прибортовых частях осадками галечно-гравийно-песчаных гранулометрических фракций [Девяткин, 1965; Лузгин, Русанов, 1992; Дельво и др., 1995], что хорошо согласуется с преимущественно низкоомными значениями УЭС соответствующих геоэлектрических слоев.

В четвертичный период в северной части Курайской впадины при правосдвиговых(?) движениях обособляется Центрально-Курайская впадина, возникают грабенообразные участки долины р. Чуя между Сукорским блоком и Курайским хребтом, а также Белькенекским, Каракольским, Аккобинским блоками, с одной стороны, Акташским блоком и другими блоками, отделяющими Акташский грабен, с другой. Сдвиговый режим постепенно сменяется на режим сжатия (с ориентировкой главной оси сжатия СВ-ЮЗ). На фоне быстрого роста окружающих хребтов до современных абсолютных отметок [De Grave et al., 2007; Glorie et al., 2012] происходит их надвигание по ограничивающим разломам, превращающихся во взбросы (рис. 10), на Курайскую впадину, а сама она превращается в структуру рампового типа [Дельво и др., 1995]. При этом в краевых частях впадины возникают форберговые поднятия, а ограничивающие впадину краевые грабены превращаются в рампы и полурампы. В восточной части впадины определенную роль при этом играло вращение Сукорского блока против часовой стрелки [Буслов и др., 1999].

С этой фазой неотектонических движений коррелируется накопление песчаных и более грубообломочных отложений буроцветной серии (бекенская и башкауская свиты), представляющих собой межгорную молассу с резким сокращением площади озерной седиментации. Высоты горных хребтов, которых они достигли к среднему неоплейстоцену, с одной стороны, общеклиматический фон, с другой, — обусловили развитие на протяжении оставшейся части неоплейстоцена оледенений и разделяющих их межледниковий [Зольников, 2009]. В это время формируется сероцветный комплекс — сложенно-построенная толща моренных диамиктонов, флювиогляциальных валунно-галечников, озерно-ледниковых и подпрудно-ледниковых песков, алевритов и глин, катафлювиальные отложения. Помимо них на поверхности впадины присутствуют и полифациальные голоценовые отложения, наложенные или вложенные в более древние комплексы. В целом охарактеризованные четвертичные отложения относительно палеоген-неогеновой части имеют более грубозернистый состав и, соответственно, характеризуются значительно более высокими значениями УЭС.

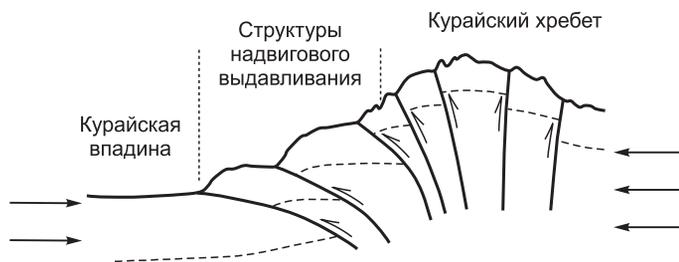


Рис. 10. Схема надвиговых структур выжимания в районе Курайского хребта [Чиков и др., 2008].

ВЫВОДЫ

На основе интерпретации данных геоэлектрики с контролируемым источником (ВЭЗ и ЗС) представлено глубинное строение основных элементов внутренней структуры Курайской впадины и определен характер ее пограничных взаимоотношений с горным обрамлением. Выявлено, что наиболее погруженные части впадины располагаются вдоль ее северного (Акташский грабен), южного (Ештыкельский грабен) и восточного горного обрамления. Мощности осадочного выполнения впадины здесь составляют 600—1600 м, тогда как в Центрально-Курайской впадине — 300—500 м. При этом осадочное выполнение во впадине разделяется на два литологических комплекса, обладающих разными величинами УЭС. Нижний низкоомный комплекс соответствует палеоген-неогеновым существенно глинистым озерным отложениям. Перекрывающий их высокоомный комплекс соотносится с более грубозернистыми фациями полифациальных четвертичных отложений. Эти комплексы отвечают различным этапам формирования структуры Курайской впадины. В палеогене—неогене в качестве основного механизма образования впадины следует рассматривать формирование левосдвигового бассейна типа *pull-apart*, при котором центральная относительно слабонарушенная часть впадины погружалась как единое целое между крыльями разлома. С началом четвертичного периода в северной части Курайской впадины при сдвиговых движениях обособляется Центрально-Курайская впадина, а обрамляющие хребты и блоки в условиях общего сжатия надвигаются на Курайскую впадину, превращая ее в структуру рампового типа. При этом в краевых частях возникают форберговые поднятия, а ограничивающие впадину краевые грабены превращаются в рампы и полурампы.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 12-05-33048-мол_a_вед).

ЛИТЕРАТУРА

- Алешко Ю.Б., Ланда М.Н., Столбина И.В., Раковец О.А.** Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000. Серия Алтайская. Лист М-45-XVI. Объяснительная записка. М., Госгеолтехиздат, 1962, 102 с.
- Бондаренко П.М., Девяткин Е.В., Лискун И.Г.** Материалы по новейшей тектонике и стратиграфии кайнозойских отложений Акташского района Курайской неотектонической зоны Горного Алтая // Проблемы геоморфологии и неотектоники орогенных областей Сибири и Дальнего Востока. Материалы Всесоюзного совещания по геоморфологии и неотектонике Сибири и Дальнего Востока. Т. II. Новосибирск, Наука, 1968, с. 65—73.
- Буртман В.С., Лукьянов А.В., Пейве А.В., Руженцев С.В.** Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения // Разломы и горизонтальные движения земной коры. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 5—34. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 80).
- Буслов М.М., Зыкин В.С., Новиков И.С., Дельво Д.** Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозойе // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (12), с. 1720—1736.
- Высоцкий Е.М., Новиков И.С., Агатова А.Р., Деев Е.В., Скобелицин Г.А., Макарова Д.Д.** Строение зоны поверхностных деформаций Чуйского землетрясения 2003 года (Горный Алтай) // Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования. Материалы XXVIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, с. 65—67.
- Девяткин Е.В.** Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. М., Наука, 1965, 244 с. (Труды ГИН, вып. 126).
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д., Русанов Г.Г., Пономарев П.В.** Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (1), с. 120—139.
- Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А.** Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 31—51.
- Зольников И.Д.** Гляциогенно обусловленные суперпаводки неоплейстоцена Горного Алтая и их связь с историей формирования отложений и рельефа Западно-Сибирской равнины // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 2009, № 69, с. 58—70.
- Легенда** Алтайской серии Государственной геологической карты Российской Федерации м-ба 1 : 200 000 (издание второе). Объяснительная записка. Новокузнецк, 1999, 136 с.
- Лузгин Б.Н., Русанов Г.Г.** Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая // Геология и геофизика, 1992 (4), с. 23—29.
- Мухин А.С., Кузнецов В.А.** Четвертичные надвиги в Юго-Восточном Алтае // Вест. ЗСГУ, 1939, № 1, с. 49—52.

Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Геоэлектрическое строение Курайской впадины Горного Алтая с учетом тектонических особенностей // Геофизика, 2011, № 6, с. 56—64.

Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1139—1149.

Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М., ОИФЗ РАН, 2002, 130 с.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В. Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // Физика Земли, 2008, № 6, с. 31—51.

Туркин Ю.А., Федак С.И. Геология и структурно-вещественные комплексы Горного Алтая. Томск, СГГА, 2008, 460 с.

Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: сборник научных статей. Новосибирск, Изд-во СГГА, 2009, с. 108—113.

Чиков Б.М., Зиновьев С.В., Деев Е.В. Мезозойско-кайнозойские коллизионные структуры Большого Алтая // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (5), с. 426—438.

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, 1990, 29 с. (Препринт ИГиГ СО АН СССР; № 3).

Эпов М.И., Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю. Способ учета характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах // Геофизический вестник, 2006, № 6, с. 8—14.

De Grave J., Buslov M.M., Van den haute P., Dehandschutter B., Delvaux D. Meso-Cenozoic evolution of mountain range — intramontane basin systems in the Southern Siberian Altai mountains by apatite fission-track thermochronology // Thrust belts and foreland basins, frontiers in Earth sciences / Eds. O. Lacombe, J. Lavé, F. Roure, J. Vergés. Berlin, Heidelberg, 2007, p. 457—470.

Glorie S., De Grave J., Buslov M.M., Zhimulev F.I., Elburg M.A., Van den haute P. Structural control on Meso-Cenozoic tectonic reactivation and denudation in the Siberian Altai: insights from multi-method thermochronometry // Tectonophysics, 2012, v. 544—545, p. 75—92.

*Рекомендована к печати 10 апреля 2013 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
4 декабря 2012 г.*