



THE NEOTECTONIC STRUCTURE OF INTERMOUNTAIN BASINS OF MOUNTAINOUS ALTAI ACCORDING TO ELECTROMAGNETIC AND GEOLOGICAL DATA

N. N. Nevedrova¹, A. M. Sanchaa¹, E. V. Deev¹, S. M. Babushkin²

¹A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Seismological Branch of Geophysical survey SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract: The article presents new data on the geoelectrical structure of Chuya, Kuray and Uymon intermountain basins, which are the three largest ones in Mountainous Altai, Russia. Geoelectrical models of the basins were constructed using the data obtained from field studies with application of a complex of electromagnetic methods, including transient electromagnetic, vertical electric soundings and electric tomography. Different amounts of field geoelectric data were collected for each basin. Chuya and Kuray basins are studied better, and their basic geoelectrical models were constructed; however, the structure of their marginal parts is still unclear, and additional measurements are underway there. The structure of Uymon basin has not been properly studied by geophysical methods yet; therefore during 2011–2012 field seasons, it was subject to comprehensive electromagnetic (direct- and alternating-current) surveys carried out with the use of modern equipment sets. Measuring equipment ensured high accuracy and efficiency of field measurements. Software systems for modeling and inversion were applied for quantitative electromagnetic data interpretation based on geological data and parametrical measurements in known profiles. The conclusions are supported by results of joint analysis of the available electromagnetic and geological data and confirmed by multidimensional modeling.

Key words: electromagnetic methods (TEM, VES), electrotomography, neotectonics, intermountain basins of Mountain (Gorny) Altai.

Recommended by Yu.L. Rebetsky

Citation: Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V., Babushkin S.M. 2013. The neotectonic structure of intermountain basins of Mountainous Altai according to electromagnetic and geological data. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 301–312. doi:10.5800/GT-2013-4-3-0102.

НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕЖГОРНЫХ ВПАДИН ГОРНОГО АЛТАЯ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ И ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Н. Н. Неведрова¹, А. М. Санчаа¹, Е. В. Деев¹, С. М. Бабушкин²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: В статье представлены новые данные о геоэлектрическом строении трех наиболее крупных межгорных впадин Горного Алтая: Чуйской, Курайской и Уймонской. Для построения геоэлектрических моделей на территории впадин были выполнены измерения комплексом электромагнитных методов, включающим электромагнитные зондирования становлением поля, вертикальные электрические зондирования и электротомографию. Количественная интерпретация электромагнитных данных выполнена в программных комплексах моделирования и инверсии, опирается на обширный геологический материал, параметрические измерения на известных разрезах. Результаты обоснованы совместным анализом данных, полученных электромагнитными и геологическими методами, а также подтверждены на основе многомерного моделирования.

Ключевые слова: электромагнитные методы (ВЭЗ, ЗС), электротомография, неотектоника, межгорные впадины Горного Алтая.

1. ВВЕДЕНИЕ

Межгорные впадины Горного Алтая являются ключевыми объектами для понимания закономерностей формирования его современной структуры. Методы геоэлектрики с контролируемым источником широко используются для изучения глубинного строения впадин в различных сейсмоактивных регионах, в том числе и в Горном Алтае. Исследуются три наиболее крупные отрицательные структуры этого региона. Чуйская и Курайская депрессии, разделенные Чаган-Узунским горным массивом, образуют единую систему впадин на юго-востоке Горного Алтая. Уймонская впадина, расположенная западнее, замыкает цепочку котловин меньшего размера. Полевые работы методами постоянного и переменного тока выполнены на территории Алтайских впадин в несколько этапов.

Значительное количество полевых данных электромагнитных зондирований было получено коллективами геофизических партий в 60–80-е гг. прошлого века в Чуйской и Курайской депрессиях. Результаты этих работ ранее использованы для выявления общей неотектонической структуры Чуйской впадины и для создания региональных геологических разрезов [Devjatkin, 1965; Luzgin, Rusanov, 1992; Buslov et al., 1999]. Далее на основе интерпретации этих же измерений с помощью современных компьютерных средств была построена глубинная геоэлектрическая модель Чуйской депрессии [Nevedrova et al., 2001], в рамках которой уточнен рельеф поверхности фундамента и предпринята попытка выделения основных геологических границ в осадочном выполнении. Были построены карты мощностей отдельных литолого-стратиграфических комплексов, карта рельефа фундамента, геоэлектрические разрезы по профилям измерений. В настоящее время предполагается дальнейшее уточнение геоэлектрической модели впадины с учетом электромагнитных измерений 2004–2012 гг., выполненных современной аппаратурой, с использованием новых программно-алгоритмических средств многомерного моделирования и инверсии, геологических данных.

Очередной этап исследования Алтайских впадин связан с изучением последствий Чуйского землетрясения 2003 г. и его афтершокового периода. После этого события в эпицентральной области, которая включает западную часть Чуйской депрессии, Северо-Чуйский хребет, Курайскую впадину, были начаты комплекс-

ные работы электромагнитными методами. Измерения выполняются методами зондирования становлением поля (ЗС) в нескольких модификациях с индуктивным и гальваническим источником и двумя методами постоянного тока: вертикальным электрическим зондированием (ВЭЗ), электротомографии в период с 2004 по 2012 г.

Можно отметить, что строение Уймонской котловины до последнего времени практически не исследовалось геофизическими методами, только в 60-х годах прошлого века через нее был проведен региональный профиль гравиметрических измерений. Для выяснения строения котловины в полевые сезоны 2011–2012 г. на ее территории был проведен комплекс электромагнитных наблюдений.

Самая большая впадина региона – Чуйская котловина, а выполняющий ее комплекс континентальных отложений, мощностью более одного километра, представляет собой один из наиболее полных разрезов кайнозоя Внутренней Азии. Но, в общем, все три наиболее крупные кайнозойские депрессии Горного Алтая имеют, скорее всего, похожую историю неотектонического развития и осадконакопления.

Вместе с тем депрессии существенно отличаются одна от другой по целому ряду признаков, например по строению краевых частей, общей мощности осадочного заполнения и отдельных литолого-стратиграфических комплексов. По результатам геологической съемки тектонические подвижки хорошо прослеживаются в северном горном обрамлении впадин, а также проявляются в эрозионных формах четвертичного рельефа и палеосейсмодислокациях. Однако главные особенности внутреннего строения депрессий, мощность осадочного заполнения, глубины до основных геоэлектрических границ, проявление разломов на глубине установлены в результате интерпретации электромагнитных данных. В настоящее время получены характеристики внутривпадинных разломных структур, построены предварительные схемы неотектоники Чуйской и Курайской депрессий на основе комплексной интерпретации геологических и электромагнитных данных [Nevedrova et al., 2011]. Эти схемы каждый год корректируются с учетом новых измерений. Планируется построение такой же схемы для Уймонской впадины.

В статье представлена методика интерпретации полевых данных геоэлектрики. Цель работы – показать особенности строения межгорных впадин на основе

современной обработки электромагнитных данных и совместного анализа результатов с максимально полным учетом геологической информации.

2. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ, АППАРАТУРНЫЕ РАЗРАБОТКИ

В электромагнитный комплекс включены методы, основанные на использовании постоянного и переменного тока с контролируемым источником. К преимуществам этой группы электромагнитных методов следует отнести большое количество модификаций, которые позволяют изучать осадочное заполнение впадин от дневной поверхности до значительных глубин, включая верхнюю часть фундамента. Кроме того, у электромагнитных методов относительно низкая стоимость, возможность оперативной обработки данных в полевых условиях, развитие программно-алгоритмические средства углубленной интерпретации, включающие многомерное моделирование и инверсию. В результате полного цикла интерпретации полевых данных получают наиболее точные количественные оценки геоэлектрической модели: глубины до фундамента, вертикальные размеры отдельных литологических комплексов, слагающих осадочный чехол, глубинное положение и характеристики разломных нарушений. Далее, опираясь на уже созданную модель, можно уточнить строение отдельных особенно сложнопостроенных участков на основе дополнительных измерений и трехмерного моделирования.

Рассмотрим методику наблюдений и интерпретации методами постоянного тока (ВЭЗ, электротомография). Измерения методом ВЭЗ выполняются с симметричной градиентной четырехэлектродной установкой Шлюмберже. Измерения проведены как в отдельных пунктах, так и по профилям с различным шагом между пикетами. Полуразносы генераторной линии находились в интервале от 1.5 до 1000 м. Измерения на небольших разносах позволяют получить детальные характеристики приповерхностных отложений, что в дальнейшем служит привязкой при построении интерпретационной модели по данным ЗС. Величина максимального полуразноса $AB/2$ определяется в зависимости от предполагаемой глубины исследования на различных участках впадин и сложности рельефа. При выполнении ВЭЗ использованы два типа аппаратуры: АНЧ-3 и SARIS, имеющие высокую помехозащищенность. Аппаратура SARIS является одной из современных аппаратурных разработок для метода сопротивления. Эта разработка предоставляет пользователю экономически эффективный, простой в обращении прибор с совмещенным мощным генератором и приемником, позволяющий интерпретировать полученные данные в поле.

Для повышения однозначности интерпретации данных геоэлектрики на территории Чуйской депрессии

были выполнены параметрические наблюдения, для которых на первом этапе был выбран метод ВЭЗ. Измерения этим методом были осуществлены на целом ряде хорошо изученных геологических разрезов, когда известны геологические характеристики пород, слагающих разрез, и зачастую мощность отдельных слоев и пропластков. При таких условиях удельные электрические сопротивления (УЭС) отложений определяются однозначно. Как уже отмечалось, именно метод ВЭЗ дает возможность определить УЭС и толщины как приповерхностных слоев небольшой мощности в 1–2 м, так и более глубоко залегающих отложений – до глубин в среднем до 200–300 м (в зависимости от величины максимального разноса питающей линии и геоэлектрических параметров разреза). Очевидно, что далее при полной обработке полевых данных параметрические измерения позволят уменьшить модельную эквивалентность решения обратных задач, особенно на участках, где отсутствуют скважины, и дадут возможность идентифицировать аналогичные отложения в сложных случаях, когда они полностью перекрыты другими породами и находятся на значительных глубинах [Deev et al., 2012a].

Количественная интерпретация полевых данных ВЭЗ осуществлялась в программных комплексах моделирования и инверсии СОНЕТ, IPI2Win с использованием горизонтально-слоистой модели. На первом этапе обработки был использован программный пакет IPI2Win [Hmelevskiy, Shevnin, 1992], который позволяет выполнить визуализацию результатов по профилю. Окончательные модели получены с помощью комплекса СОНЕТ [Епов et al., 1990]. Погрешности подбора модели в среднем не превышали 5 %. Далее привлечены программы двумерной инверсии Res2Dinv (Geotomo software) и трехмерного моделирования. С помощью программы Res2Dinv верифицируются построения одномерной интерпретации. На основе трехмерных программ анализируются искажения горизонтально-слоистых кривых и моделируются сложные структуры.

Электротомография на постоянном токе выполняется на территории впадин в последние два года (2011–2012 гг.) Для измерений была использована станция «Скала-48М», предназначенная для работы методом сопротивлений в различных модификациях. К станции подключаются два 24-электродных кабеля с шагом 5 м между электродами, что позволяет получить геоэлектрический разрез по профилю протяженностью 235 м. Более протяженные непрерывные профили реализуются путем переноса первого сегмента многоэлектродного кабеля предыдущей расстановки на место второго в последующей. Для увеличения глубины измерений до 100 м были использованы два выносных электрода, расположенные перпендикулярно к многоэлектродной кабельной линии на расстояниях в 500 м.

Использование методики плотной съемки электро-

томографии позволяет детально изучать близповерхностные отложения впадин, например на границах с горным обрамлением. Ограничения впадин чаще всего фиксируются серией тектонических уступов, на которых мощность осадков составляет первые десятки метров. Кроме того, электротомография выполняется и на участках с большей мощностью осадочной толщи в зонах с предполагаемыми разломными нарушениями. На геоэлектрических разрезах по данным электротомографии разломы выделяются зонами с пониженными значениями УЭС относительно вмещающих пород. Обработка данных электротомографии осуществляется в программе Res2Dinv.

Из методов переменного тока в настоящее время применены несколько модификаций нестационарных зондирований становления электромагнитного поля (ЗС) с использованием индуктивных, гальванических и комбинированных установок. Зондирования становлением электромагнитного поля 80-х годов в Чуйской депрессии проводились по профилям соосной симметричной установкой («петля в петле»). Для большей части зондирований применяли генераторные и приемные петли размером 400×400 м с таким же шагом по профилю. При проведении работ применялась аппаратура «Цикл». Расстояние между профилями в среднем составляло 4–5 км. Обычно в каждом пункте проводилось два зондирования с различным током (12 и 40 А). При величине тока 12 А измерения ЭДС начинались в среднем с 0.3 мс, а при токе в 40 А – от 0.6 до 1.0 мс. Конечное время измерений ограничивалось уровнем помех и составляло от 40 до 90 мс. В каждом пункте зондирований на меньшем токе регистрировался один цикл измерений при 100 накоплениях, на большем токе проводилось три цикла измерений при одном и том же числе накоплений. Минимальная величина измеряемого полезного сигнала составляла в среднем 10 мкВ. Средняя относительная ошибка измерений оценивалась примерно с 3–5 % на ранних временах и достигала 10–15 % на поздних.

Современные измерения методом ЗС были выполнены с использованием двух систем регистрации сигнала: «Байкал-МЭРС» (Институт лазерной физики, ГС СО РАН, г. Новосибирск) и «Импульс» (ФГУП СНИИГГиМС, г. Новосибирск). Регистраторы «Байкал-МЭРС» являются новой перспективной разработкой, позволяющей оперативно выполнять измерения методом ЗС. «Байкал-МЭРС» – многоканальная система, предназначенная для организации как профильной, так и площадной системы регистрации высокой плотности. Измерительные модули располагаются непосредственно у приемных петель, что позволяет избавиться от проблемы передачи аналоговых сигналов по длинным коммуникационным цепям и тем самым повысить качество записываемого материала и помехозащищенность измерителя. Система «Байкал-МЭРС» имеет модульную структуру, состоящую из 15 отдельных регистраторов. Каждый регистратор – это

4-канальный прибор для сбора данных; три канала низкочастотных – до 4 кГц, сделанных на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 31 бит, и один канал высокочастотный – до 100 кГц, сделанный на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бит. В состав регистратора входит GPS-модуль, который привязывает измеряемые данные к всемирному времени (UTM) не более 1 мкс, съемная флеш-карта SD с файловой системой FAT-32. Предусмотрено четыре независимых входа для регистрации сигналов от разных секций приемной петли (отличающихся, например, количеством витков) и приемных линий MN. Полевой измеритель состоит из устройства управления, АЦП, усилителя, встроенного источника питания. Он герметичен, защищен от воздействия факторов окружающей среды. Эта разработка позволяет получить полезный сигнал до 0.1 мкВ и при интерпретации данных ЗС наиболее точные глубинные параметры модели.

Для первичной обработки и интерпретации полевых данных ЗС были привлечены две автоматизированные системы, разработанные в электромагнитных лабораториях ИНГГ СО РАН. Программные комплексы ЭРА и EMS созданы для решения обратных задач и математического моделирования нестационарных электромагнитных полей [Епов et al., 1990; Khabinov et al., 2009]. «Эра» – универсальная диалоговая система для работы с данными электроразведки. Интерпретационная система EMS является развитием и расширением программного комплекса «Эра» для современных компьютерных средств. В ней заложены значительные перспективы для использования новых модификаций ЗС, а также способов визуализации результатов. Обе системы позволяют выполнить обработку и интерпретацию полевых данных электромагнитных зондирований с активным источником с использованием моделей горизонтально-однородных сред. Для формирования базовой интерпретационной модели ЗС привлекается дополнительная априорная информация: были проанализированы и обобщены данные по всем имеющимся скважинам, привлечены результаты параметрических измерений ВЭЗ, данные геологической съемки, выполненной в последние годы. Для обоснования разломных структур используются программы трехмерного моделирования.

Метод ЗС дает возможность получить необходимую глубинность – полную мощность осадочного заполнения, геоэлектрические характеристики опорного горизонта практически на любом участке тектонической впадины. При этом размеры установок обычно значительно меньше глубины исследования. Кроме того, с помощью индуктивных модификаций метода, не требующих заземлений, можно выполнять измерения в зонах развития многолетней мерзлоты и присутствия на поверхности грубообломочных отложений.

Можно отметить одну из главных концепций авторов, которая заключается в изучении внутреннего строения межгорных впадин Горного Алтая на основе

комплексного подхода, для которого принципиальным является использование нескольких электромагнитных методов и совместный анализ данных, полученных электромагнитными и геологическими методами на каждом этапе интерпретации.

3. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АЛТАЙСКИХ ВПАДИН

Чуйская межгорная впадина расположена среди горных хребтов в юго-восточной части Горного Алтая. Ее длина около 70 км, а ширина примерно 35 км. С севера впадину ограничивает Курайский хребет с высотами до 3000–3400 м, с юга – Южно-Чуйский хребет (3300–3900 м) и Сайлюгемское плато (2800–3000 м), на западе – Чаган-Узунский горстовый блок с абсолютными отметками 2600–2900 м, а с востока протягивается хребет Чихачева, состоящий из нескольких массивов, поднимающихся до высот 3700–4000 м.

Рассмотрим кратко основные геологические данные, важные для построения геоэлектрических моделей. Кайнозойские осадочные отложения впадины залегают на дислоцированных породах палеозоя и фрагментах мел-палеогеновой коры выветривания. В последнее время на периферии впадины обнаружены незначительные по размерам блоки нижнеюрских и верхнемеловых пород [Zykin et al., 2008]. На породах палеозоя и коре выветривания залегает мощная кошагачская свита. Она широко распространена в Чуйской котловине [Devjatkin, 1965] и в центральных частях вскрыта рядом скважин. Отложения свиты полифациальны и представлены существенно озерными и озерно-болотными образованиями. Залегающие выше неогеновые отложения туерьской и кызылгирской свит, а также эоплейстоценовые отложения бекенской свиты, являясь фациально разнородными, представляют собой формационно-единный комплекс отложений. Туерьская свита имеет площадное распространение, ее выходы на дневную поверхность прослеживаются преимущественно вдоль северного борта впадины и по ее западной и юго-западной периферии. Бекенская свита состоит из переслаивания мелкогалечниковых конгломератов и песчаников на известковистом и глинисто-известковистом цементе, галечников, гравийников, песков, алевролитов и глин. Снизу вверх по разрезу возрастает мощность и частота встречаемости грубообломочных прослоев. Анализ геологических данных показывает, что отложения отдельных свит должны быть дифференцированы по значениям УЭС.

Для территории Чуйской впадины имеются самые представительные полевые данные, полученные методом становления электромагнитного поля. Для восстановления общей структуры депрессии были привлечены обширные архивные материалы метода ЗС. Использование архивных данных является крайне важным для исследования Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны. В результате их интерпретации были

оценены количественные электромагнитные параметры осадочного чехла и верхней части фундамента до разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. Современные вариации этих параметров позволяют оценить степень воздействия сильного сейсмического события на геологическую среду.

На основе интерпретации всех имеющихся полевых данных ЗС отмечается неоднородное ступенчато-блоковое строение осадочного чехла и палеозойского фундамента. Наиболее сложно устроен северный борт впадины, расположенный вблизи зоны Курайского разлома. Здесь обнаружены надвиги высокоомных пород палеозойского основания на более поздние третичные осадочные отложения. Мощность осадочного выполнения в северной части депрессии превышает 1300 м. Фундамент пересечен многочисленными тектоническими нарушениями, которые фиксируются резкими его уступами и достаточно четко прослеживаются выше – ступенями в осадочном чехле [Nevd-rova et al., 2001]. Все электромагнитные данные используются для построения неотектонической карты разломно-блокового строения депрессии. Для уточнения положения основных блоков, ограниченных, скорее всего, разломными структурами, была построена серия субширотных (с запада на восток) геоэлектрических разрезов через территорию Чуйской впадины. При интерпретации были учтены как современные, так и архивные данные ЗС.

На рис. 1 представлен геоэлектрический разрез по одному из таких профилей. Разрез по профилю построен на участке от долины р. Чаган, расположенной в западном замыкании впадины, до пос. Кош-Агач в ее центральной части. Так как расстояние между пунктами ЗС достаточно большое, получены некоторые осредненные характеристики разреза, но, тем не менее, четко выделяются приподнятые блоки с общей мощностью осадков в 200–300 м и погруженные блоки, мощность которых достигает 800 м. Границы между выделенными блоками разломные, что в большинстве случаев обосновано геологическими данными. Представленный на рис. 1 разрез характеризует общее тектоническое строение Чуйской впадины.

Курайская межгорная впадина характеризуется ромбовидными очертаниями и имеет размеры по длинной диагонали ромба, ориентированной субширотно, около 35 км, по короткой – около 20 км. С севера впадина ограничена Кубадринским массивом, представляющим собой изометричный неотектонический блок, с северо-востока находится Курайский хребет. Со стороны Курайской впадины хребет погружается лестницей уступов. Нижняя ступень Курайского хребта к западу надстраивается S-образно изогнутым переходным хребтом (форбергом). В состав хребта входит и выступающий на дневную поверхность блок каменноугольных отложений, именуемый в литературе как «карбонный горст». Хребет отделяет от основной части впадины прогиб, выполненный кайнозойскими

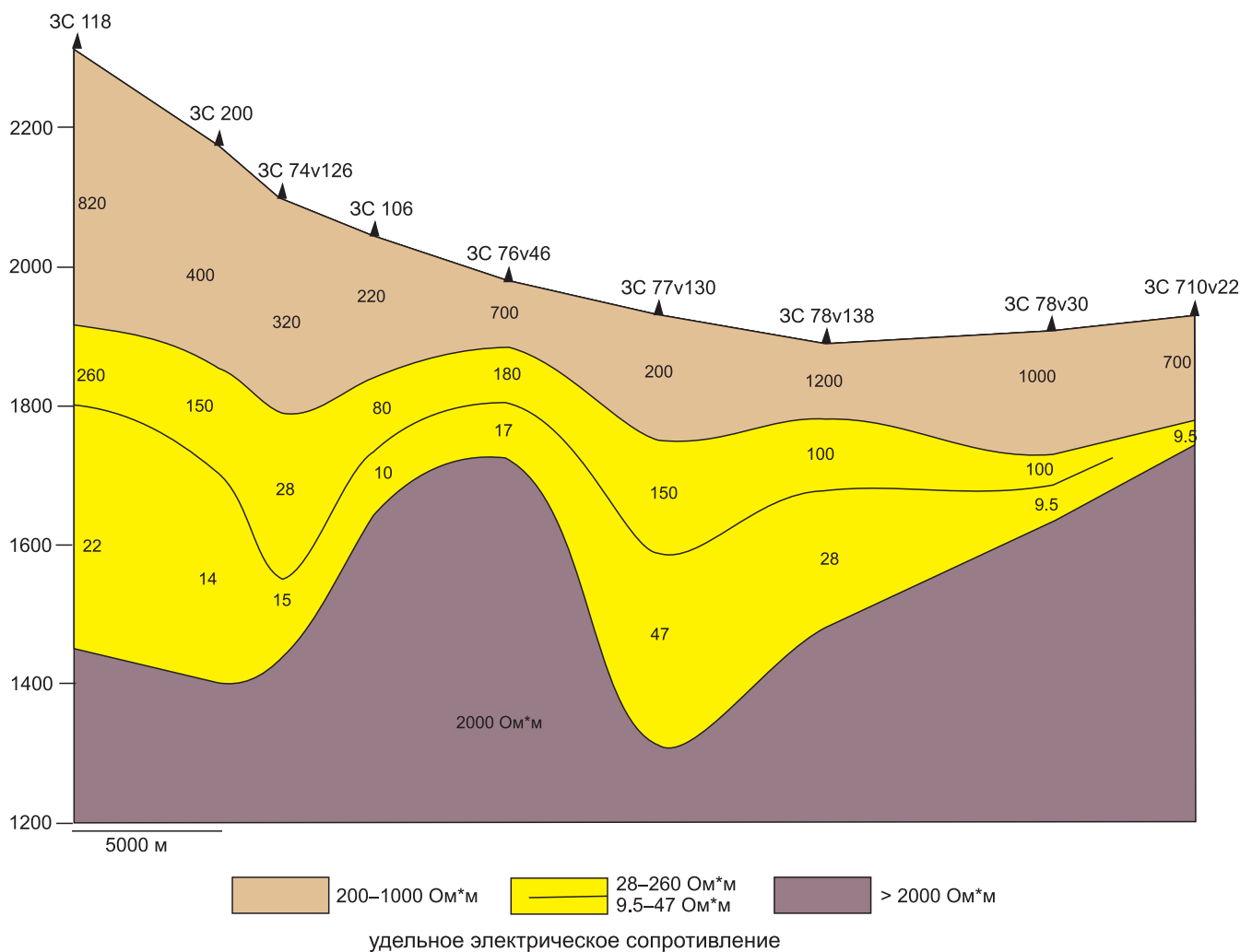


Рис. 1. Геоэлектрический разрез по субширотному профилю в Чуйской депрессии.

Fig. 1. EW-trending subsurface electrical profile in the Chuya depression.

осадками мощностью не менее 500 м, – «Акташский грабен» [Bondarenko et al., 1968]. К югу от рассмотренных структур расположена наиболее глубоко погруженная часть – Центрально-Курайская впадина. Блоки коренных пород (Аккобинский, Салгандуйский, Каракольский) обнажаются в западной части впадины и южнее р. Чуя. Вершинные части этих поднятий находятся на высотах 1800–2000 м. Западными ограничениями самой же Курайской впадины служат Оройский, Белькенецкий и Акташский блоки с максимальными высотами, редко превышающими 2200 м. Не менее четкие тектонические уступы ограничивают Курайскую впадину и со стороны Северо-Чуйского хребта, абсолютные отметки которого достигают 4000 м. Отметим, что в нижней части склона хребта выделяется серия опущенных блоков с высотами 2000–2500 м, полностью или частично перекрытых ледниковыми отложениями. В основании Северо-Чуйского хребта расположен Ештыкельский прогиб северо-западной ориентировки.

Кайнозойские отложения впадины залегают на дислоцированных вулканогенно-осадочных, магматических и метаморфических породах рифея–палеозоя и фрагментах поздне мел-раннепалеогеновой коры выветривания [Turkin, Fedak, 2008]. Комплекс осадочного выполнения впадины составляют: глинистые отложения кошагачской свиты, известковистые песчанистые глины с присутствием галечно-гравийных осадков туерькской свиты и галечно-гравийно-песчано-глинистых отложений бекенской свиты, валунно-щебнистых образований башкаусской свиты, а также полифациальный комплекс отложений среднего – позднего неоплейстоцена, представленный ледниковыми, водно-ледниковыми и озерными фациями [Aleshko et al., 1962; Bondarenko et al., 1968; Luzgin, Rusanov, 1992; Legend of Altai..., 1999]. Таким образом, отложения, слагающие Курайскую и Чуйскую депрессии, сопоставимы по литолого-стратиграфическим характеристикам и так же принципиально согласуются по геоэлектрическим параметрам.

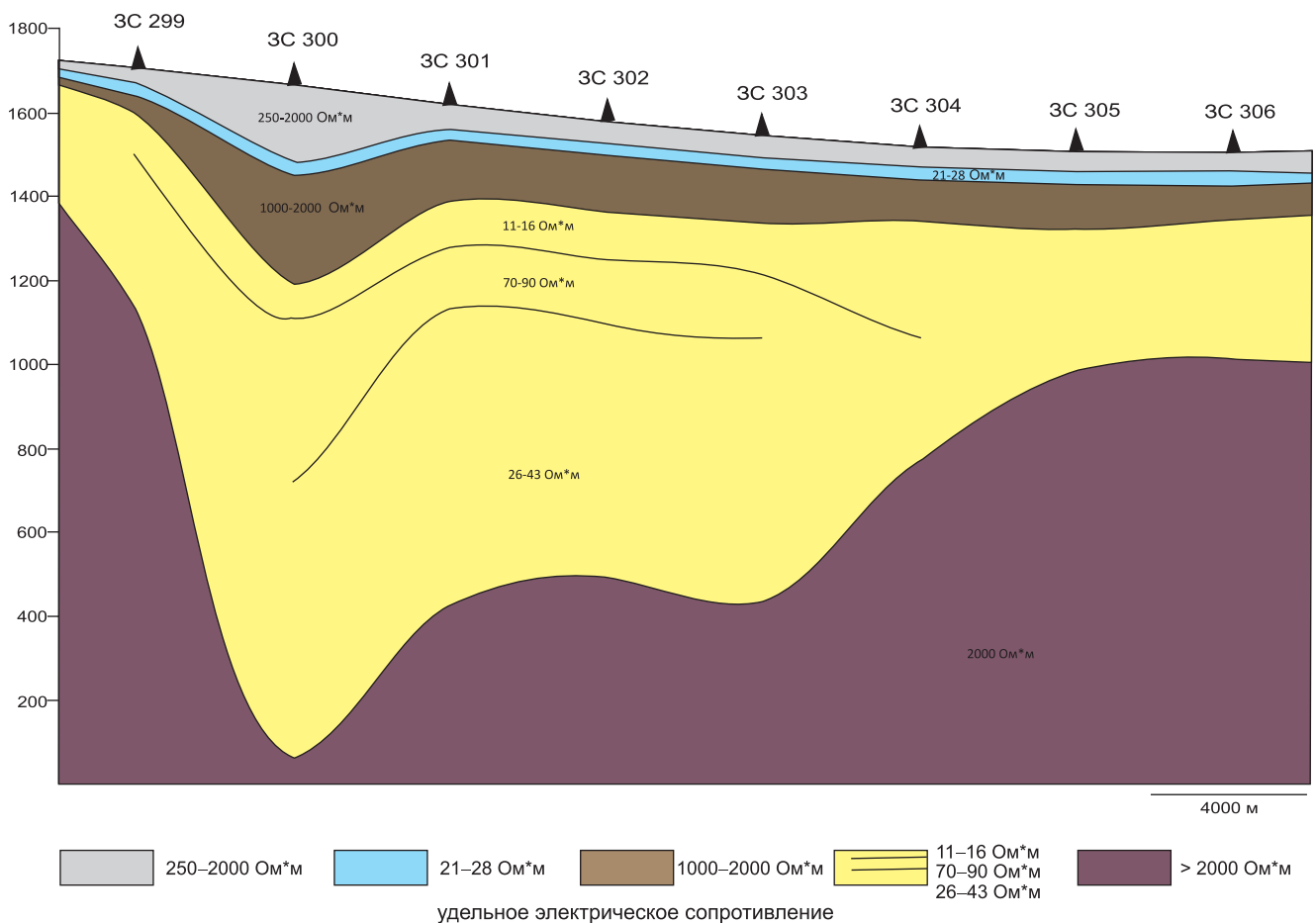


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю в южной части Курайской впадины по данным ЗС.

Fig. 2. Subsurface electrical profile in the southern Kurai depression according to TEM sounding.

Базовая геоэлектрическая модель Курайской котловины была построена по архивным данным ВЭЗ и рассмотрена в работе [Nevdrova *et al.*, 2011]. В настоящее время строение Курайской впадины уточняется на основе современных измерений комплексом электромагнитных методов, включающим глубинные электромагнитные зондирования становлением поля. В результате применения метода ЗС получены наиболее точные глубинные характеристики осадочного заполнения и опорного горизонта для всей исследуемой территории Курайской котловины.

Структурные особенности этой депрессии наиболее ярко проявляются на границах с горным обрамлением. В качестве примера рассмотрим измерения методом ЗС, выполненные в южной части впадины по профилю, ориентированному от юго-восточного горного обрамления на северо-запад до русла реки Чуя. Следует отметить, что юго-восточный пункт ЗС 299 находится в пределах Сукорского горного массива, уступом приподнятого относительно дневной поверхности впадины (рис. 2). Нестационарные зондирования были выполнены с использованием «соосных» установок с размерами генераторного модуля 200×200 м и прием-

ного 100×100 м. Эти установки характеризуются высокой локальностью и глубиной исследования. Расстояние между пунктами ЗС по профилю составляло 4 км.

На разрезе, построенном в результате интерпретации данных ЗС, во всех пунктах получены глубины до опорного высокоомного горизонта. На геоэлектрическом разрезе наблюдается глубокий предгорный прогиб на границе с юго-восточным горным обрамлением. В нем отмечаются наибольшие глубины до фундамента, составляющие 800 м.

Таким образом, по данным геоэлектрики на юго-востоке впадину ограничивает глубокий прогиб. Строение верхней части разреза на этом участке согласуется с данными ВЭЗ. Граница этого прогиба с горным обрамлением, скорее всего, разломная. В качестве ограничения впадины с северным горным обрамлением наблюдается аналогичная структура. Курайский хребет от основной части впадины отделен прогибом («Акташский грабен»), выполненным кайнозойскими осадками, мощность которых в центре прогиба по данным геоэлектрики достигает 600 м.

Уймонская котловина расположена в центральной

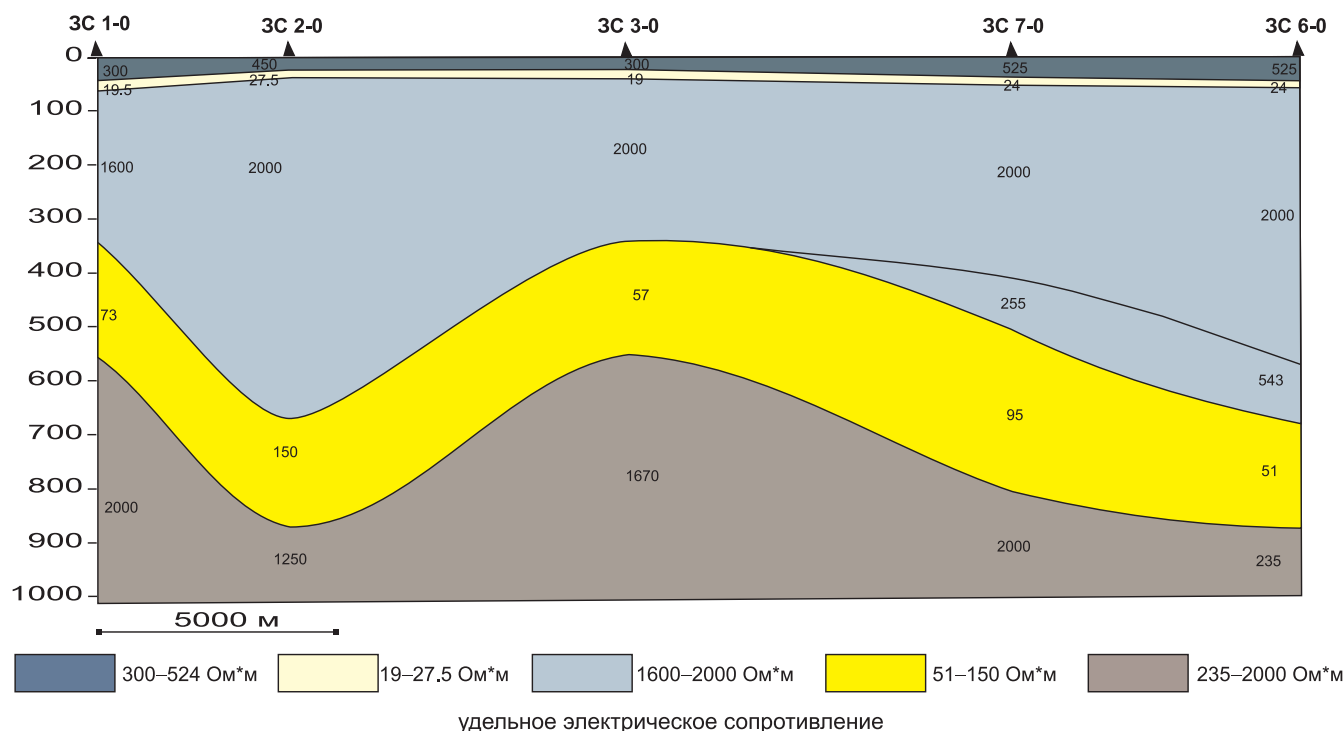


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю в северной части Уймонской впадины.

Fig. 3. Subsurface electrical profile in the northern part of the Uimon basin.

части Горного Алтая и является малоизученным элементом его неотектонической структуры. Котловина вытянута вдоль субширотной оси на 35 км, при средней ширине 10–12 км. Река Катунь протекает вдоль южного наиболее прогнутого борта впадины, поэтому днище котловины воздымается в сторону ее северного борта. Предположительно впадину выполняют достаточно мощные толщи четвертичных и неогеновых отложений, но до настоящего времени ни стратиграфия, ни генезис, ни их вещественный состав в должной мере не изучены. Ничего не известно о рельефе поверхности фундамента впадины и его строении, поскольку ни одна скважина его не вскрыла. Плохо исследована и неотектоническая блоковая структура горного обрамления впадины. Работы выполнены в 2011–2012 гг. методами ВЭЗ, ЗС, электротомографии.

Метод ВЭЗ использован с четырехэлектродной симметричной установкой Шлюмберже. Измерения методом ЗС были выполнены в двух модификациях с соосными и разнесенными установками. Сторона генераторной петли равнялась 500 м, измерительной – 200 м. Измерительные модули в разнесенных установках размещались в 600–1000 м от центра генераторной конструкции. Все зондирования проведены с помощью регистраторов «Байкал-МЭРС».

В настоящее время выполнена предварительная обработка и интерпретация полевых данных ВЭЗ и ЗС, которые проводились в интерактивных компьютерных системах интерпретации и математического модели-

рования электромагнитных полей (СОНЕТ, EMS). На первом этапе для построения геоэлектрического разреза были рассмотрены данные ЗС с соосными петлями. Данные для разнесенных установок, как более подверженные искажениям, обусловленным латеральными неоднородностями разреза, нуждаются в дополнительном анализе. На рис. 3 приведен предварительный глубинный геоэлектрический разрез по ЗС с соосными установками по профилю через северную часть Уймонской впадины.

При рассмотрении разреза (рис. 3) следует учитывать большие расстояния между пунктами наблюдений, возможное наличие разломов между пунктами во внутренней структуре впадины. Таким образом, полученный результат можно охарактеризовать как общее схематичное приближение глубинного строения этой части впадины. Следует отметить, что на протяжении всего профиля наблюдаются значительные глубины до опорного горизонта от 550 м в районах пикетов ЗС № 1-0, 3-0 до 850–870 м (пикеты ЗС № 2-0, 7-0, 6-0). Удельное электрическое сопротивление (УЭС) горизонта, соответствующего докайнозойскому фундаменту впадины, находится в интервале от 1250 до 2000 Ом·м. Выше выделен проводящий горизонт мощностью от 200 до 300 м, имеющий значения УЭС от 50 до 150 Ом·м. Основная часть осадочного выполнения впадины представлена мощным (более 630 м в районе пикета ЗС № 2-0) высокоомным слоем с УЭС=1600–2000 Ом·м. В районе пикетов ЗС № 6-0 и 7-0 получена

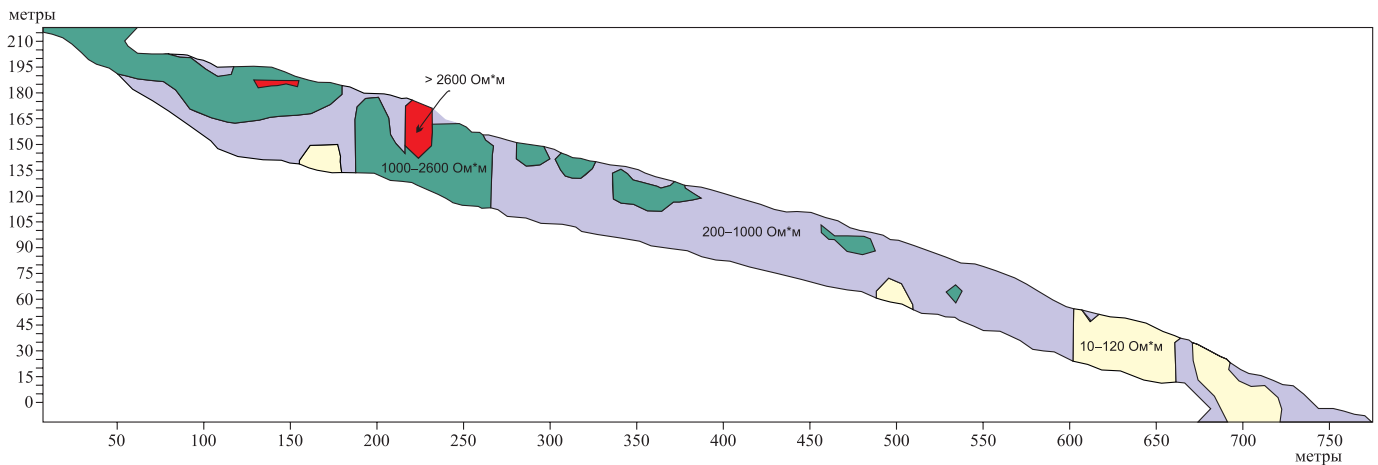


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю электротомографии в районе пос. Баштала, Уймонская впадина.

Fig. 4. Subsurface electrical profile by electrical tomography near Bashtala village, the Uimon depression.

более сложная шестислойная модель: между проводящим и высокоомным горизонтами находится слой со значениями УЭС в интервале 255–543 Ом·м. Наконец, в верхней части профиля до глубин в среднем 40–50 м выделено два относительно маломощных слоя, нижний из которых, проводящий, характеризуется УЭС в диапазоне 19.0–27.5 Ом·м, а верхний имеет значения УЭС от 300 до 525 Ом·м. Существенно грубообломочные отложения верхней части разреза в районе пикета ЗС № 6 подтверждаются материалами гидрогеологической скважины № 151, пробуренной в 1966 г. в районе пос. Полеводка. Глубина на забое скважины составила 110 м. На всем протяжении вскрыт обломочный материал осадочных и метаморфических пород с песчаным и песчано-глинистым заполнителем [Levitsky et al., 1964].

Электротомографическое профилирование выполнено с использованием станции «Скала-48», которая предназначена для работы методом сопротивлений в различных модификациях, включая ВЭЗ, электропрофилирование, 2D и 3D томографию. Профили электротомографии, выполненные в зоне Южно-Теректинского разлома, пересекают серию разломных тектонических уступов, хорошо выраженных в рельефе. Рассмотрим геоэлектрический разрез по профилю электротомографии в районе пос. Баштала (рис. 4). Разрез показан с учетом рельефа дневной поверхности. Разломные зоны отчетливо выделяются на разрезах электротомографии низкоомными наклонными блоками. Эти блоки соответствуют на дневной поверхности цепочкам небольших источников, образующих локальные заболоченные участки. Полученные разломные характеристики отражают надвигание юго-восточного горного обрамления на осадочное выполнение котловины.

Таким образом, для Уймонской впадины получены первые представления о геоэлектрическом строении осадочного чехла, положении кровли докайнозойского

фундамента, структуре зоны сочленения котловины и ее северного горного обрамления. Электроразведочные данные свидетельствуют о значительных глубинах залегания фундамента впадины и ее сложной блоковой внутренней структуре, о присутствии разветвленной системы разломных нарушений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Межгорные впадины Горного Алтая изучены в разной мере: более детально Чуйская и Курайская, исследования Уймонской котловины только начаты. Можно отметить, что, несмотря на различное количество полевых данных геоэлектрики этих депрессий, строение каждой из них не до конца понятно на целом ряде участков. Это объясняется тем, что общая структура впадин формируется под постоянным воздействием геодинамических процессов, часто разнонаправленных. Рассмотрим кратко основные результаты.

Для Чуйской депрессии наиболее детальные модели построены по западной части, где выполняется электромагнитный мониторинг изменения электромагнитных параметров под воздействием сеймотектонических процессов. Было установлено, что вариации параметров существенно зависят от геоэлектрического строения и фактически от того, над каким тектоническим блоком расположен пункт наблюдения. В статье продемонстрировано строение депрессии по широтному профилю. Полученный разрез отражает общую концепцию строения: на разных участках депрессии наблюдаются блоки с различной мощностью осадочной толщи, разделенные разломными структурами. Эти тектонические особенности строения депрессии определяют чувствительность пунктов мониторинга и для регулярных наблюдений позволяют выбрать наиболее оптимальную сеть.

Для Курайской депрессии построены геоэлектрические модели, отражающие ее общее тектоническое строение и демонстрирующие существование глубоких прогибов на границе с северным и южным горным обрамлением. Эти результаты обосновывают многостадийную геологическую историю формирования впадины. Первая стадия медленного воздымания обрамляющих впадину структур отмечается в первой половине палеогена, когда после этапа тектонической стабильности в позднем мелу – раннем палеогене накапливаются продукты переотложенной коры выветривания (карачумская свита), представленные пролювиально-делювиальными отложениями с присутствием грубообломочных прослоев [Devjatkin, 1965; Delvaux et al., 1995; Deev et al., 2012b]. На протяжении оставшейся части палеогена и большей части неогена Курайская впадина формировалась как сдвиговый бассейн между северным (Курайским) и южным (Чуйским) крыльями разлома [Delvaux et al., 1995]. При таких движениях образуются впадины с плоскими днищами и резко нарушенными бортами. Вдоль их бортов сосредоточены наиболее погруженные участки, что придает профилю этих впадин весьма характерную форму (см. рис. 2, 3). В позднем плейстоцене началась завершающая тектоническая фаза, когда происходил быстрый рост обрамляющих впадину горных хребтов до современных абсолютных отметок. С этой фазой коррелируется накопление в разрезе «буроцветной серии» (бекенская и башкайская свиты), и происходит смена доминирующего сдвигового режима на режим сжатия (с ориентировкой главной оси сжатия с северо-востока на юго-запад). Впадина превращается в структуру рампового типа [Delvaux et al., 1995].

Геолого-электромагнитные исследования подтвердили сложное строение зон сочленения Уймонской впадины с северным горным обрамлением, которое надрывается на ее осадки по зоне Южно-Теректинского разлома, вовлекая их в процесс тектонических подвижек. Получены предварительные глубины до опорного горизонта, и установлено неоднородное блочное строение осадочного заполнения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно отметить, что горные породы на территории межгорных впадин Горного Алтая хорошо дифференцированы по геоэлектрическим харак-

теристикам и методы электромагнитных зондирований, с учетом современных способов интерпретации, эффективны для исследований в этом сейсмоактивном регионе.

По данным геоэлектрики составлены базовые геоэлектрические модели крупных впадин Горного Алтая, в настоящее время исследуется и уточняется строение пограничных наиболее сложных участков, характеризующихся наличием разломных зон.

Нестационарные электромагнитные зондирования имеют некоторые преимущества по сравнению с методами постоянного тока. Методом ЗС получена необходимая глубина исследования при относительно небольших размерах установок, их данные позволяют получать глубины до фундамента на любом участке впадин, дополняя данные ВЭЗ. Индуктивные модификации ЗС не требуют заземления, что важно в условиях развития многолетней мерзлоты и грубообломочных разностей в приповерхностных отложениях.

Технология выполнения метода ВЭЗ с симметричной установкой Шлюмберже дает возможность на малых разносах детально восстанавливать самую верхнюю часть разреза с присутствием маломощных горизонтов (~1 м), как проводящих, так и высокоомных. На больших разносах АВ/2, достигающих 1000 м, разрез исследуется до 200–300 м, этого достаточно для изучения окраинных частей впадин, а для участков с большей мощностью осадков данные ВЭЗ являются дополнительной информацией при интерпретации данных ЗС.

Показано, что электромагнитный комплекс (ВЭЗ, ЗС, электротомография) оптимален для изучения детальной структуры как верхней части осадочного чехла, так и глубинных слоев, включая верхнюю часть фундамента, а также для выявления и уточнения положения разломных нарушений. Все полученные результаты важны для целого ряда фундаментальных и прикладных задач, связанных с геологической историей формирования структур Горного Алтая, проблемами сейсmobезопасности, поиском полезных ископаемых.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-05-33048 мол_а_вед; проекта РАН ОНЗ-7.5 «Построение моделей земной коры Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны на основе данных электромагнитных зондирований».

6. References

- Aleshko Yu.B., Landa M.N., Stolbina I.V., Rakovets O.A., 1962. Geological USSR map of scale 1:200000. Altai series. Sheet M-45-XVI. Explanatory note. Gosgeolotekhizdat, Moscow, 102 p. (in Russian) [Алешко Ю.Б., Ланда М.Н., Столбина И.В., Раковец О.А. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Алтайская. Лист М-45-ХVI. Объяснительная записка. М.: Госгеолотехиздат, 1962. 102 с.
- Bondarenko P.M., Devjatkin E.V., Liskun I.G., 1968. Materials on recent tectonics and stratigraphy of the Cenozoic sediments of the Aktashsky area in the Kurai neotectonic zone (Gorny Altai). In: Problems of geomorphology and neotecton-

- ics of orogenic regions of Siberia and the Far East. Proceedings of the All-Union conference on geomorphology and neotectonics of Siberia and the Far East. Siberian Branch, Nauka, Novosibirsk. V. II, p. 65–73 (in Russian) [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. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1968. Т. II. С. 65–73].
- Buslov M.M., Zykin V.S., Novikov I.S., Delvaux D., 1999. The cenozoic history of the Chuya basin (Gorny Altai): structure and geodynamics. *Geologiya i Geofizika* 40 (12), 1720–1736.
- Deev E.V., Nevedrova N.N., Ponomarev P.V., Zol'nikov I.D., Rusanov G.G., 2012a. Geoelectrical studies of the Chuya basin sedimentary fill (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics* 53 (1), 92–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.007>.
- Deev E.V., Nevedrova N.N., Rusanov G.G., Sanchaa A.M., Babushkin S.M., Krechetov D.V., El'tsov I.N., Zol'nikov I.D., 2012b. New data on the structure of the Uimon depression (Gorny Altai). *Geology and Mineral Resources of Siberia* 9 (1), 15–23 (in Russian) [Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Русанов Г.Г., Санчаа А.М., Бабушкин С.М., Кречетов Д.В., Ельцов И.Н., Зольников И.Д. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. Т. 9. № 1. С. 15–23].
- Delvaux D., Tenissen K., Van-der-Meyer R., Berzin N.A., 1995. Dynamics of formation and paleostress at formation of the Chuysko-Kuraysky depression of Mountain Altai: tectonic and climatic control. *Geologiya i Geofizika* 36 (10), 31–51 (in Russian) [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].
- Devjatkin E.V., 1965. The Cenozoic Sediments and Neotectonics of the South-East Altai. GIN Proceedings. Nauka, Moscow. Issue 126, 244 p. (in Russian) [Девяткин Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. Труды ГИН. М.: Наука, 1965. Вып. 126. 244 с.].
- Епов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н., 1990. Automated Interpretation of Electromagnetic Sounding Data. IGG, SB of the USSR Acad. Sci., Novosibirsk. Preprint № 3, 28 p. (in Russian) [Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск: ИГТ СО АН СССР, 1990. Препринт № 3. 28 с.].
- Hmelevskiy V.K., Shevnin V.A., 1992. Electric sounding of the geological environment. Part 2: Interpretation and practical application. Moscow State University, Moscow, 200 p. (in Russian) [Хмелевский В.К., Шевнин В.А. Электрическое зондирование геологической среды. Ч. 2: Интерпретация и практическое применение. М.: МГУ, 1992. 200 с.].
- Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu., 2009. The system for interpretation of data from sounding by the transient EMS processes method. In: GEO-Siberia-2009. Subsoil Use. Mining. New Trends and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits: Proceedings of the 5th International Scientific Congress (20–24 April 2009, Novosibirsk). SGGA, Novosibirsk, V. 2. 125–128 p. (in Russian) [Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: Сборник материалов V Международного научного конгресса (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 2. С. 125–128].
- Legend of Altai Series of the State Geological Map of the Russian Federation, Scale of 1:200 000 (Edition 2), 1999. Explanatory Note. Novokuznetsk, 136 p. (in Russian) [Легенда Алтайской серии Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200000 (издание второе). Объяснительная записка. Новокузнецк, 1999. 136 с.].
- Levitsky E.S., Bazhenova S.N., Bortsova A.V., 1964. Geological Map of the USSR, Scale 1:200 000. Gorny Altai Series. Sheet M-45-XIV. Explanatory Note. Nedra, Moscow, 87 p. (in Russian) [Левитский Е.С., Баженова С.Н., Борцова А.В. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-XIV. Объяснительная записка. М.: Недра, 1964. 87 с.].
- Luzgin B.N., Rusanov G.G., 1992. Specific features of formation of the Neogene sediments in the south-east part of the Altai Mountains. *Geologiya i Geofizika* 4, 23–29 (in Russian) [Лузгин Б.Н., Русанов Г.Г. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая // Геология и геофизика. 1992. № 4. С. 23–29].
- Nevedrova N.N., Eпов M.I., Antonov E.Yu., Dashevsky Yu.A., Duchkov A.D., 2001. Reconstruction of the deep structure of the Chuya basin (Gorny Altai) according to electromagnetic sounding data. *Geologiya i Geofizika* 42 (9), 1399–1416 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А., Дучков А.Д. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. 2001. Т.42. № 9. С. 1399–1416].
- Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V., 2011. The tectonic structure of the Kurai depression according to electromagnetic sounding data. *Geofizika* 6, 56–64 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Тектоническое строение Курайской впадины по данным электромагнитных зондирований // Геофизика. 2011. № 6. С. 56–64].
- Sizikova T.V., Nikiforov T.K., Gunova A.M., 1973. Underground Waters of the USSR. Review of Underground Waters of the Altai Area. Gorny Altai Autonomous Region (additions). Drilling of water wells. Moscow, V. 2, 145 p. (in Russian) [Сизикова Т.В., Никифорова Т.К., Гунова А.М. Подземные воды СССР. Обзор подземных вод Алтайского края. Горно-Алтайская автономная область (дополнения). Буровые на воду скважины. М., 1973. Т. 2. 145 с.].

Turkin Yu.A., Fedak S.I., 2008. Geology and Structural-Material Complexes of the Altai Mountains. STT, Tomsk, 460 p. (in Russian) [Туркин Ю.А., Федак С.И. Геология и структурно-вещественные комплексы Горного Алтая. Томск: STT, 2008. 460 с.].

Zykin V.S., Lebedeva N.K., Shurygin B.N., Marinov V.A., Smirnova T.N., 2008. Paleontological evidence for the presence of the marine Upper Cretaceous at the Altai Mountains. In: The Cretaceous system of Russia and neighboring countries: Problems of stratigraphy and paleogeography: Proceedings of the Fourth All-Russia conference. Publishing House of SB RAS, GEO Branch, Novosibirsk, p. 90–92 (in Russian) [Зыкин В.С., Лебедева Н.К., Шурыгин Б.Н., Маринов В.А., Смирнова Т.Н. Палеонтологические свидетельства присутствия морского верхнего мела на Горном Алтае // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы Четвертого Всерос. совещания. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «ГЕО», 2008. С. 90–92].



Неведрова Нина Николаевна, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия
✉ e-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

Nevedrova, Nina N., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
3 Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk 630090, Russia
✉ e-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru



Санчаа Айдиса Михайловна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия

Sanchaa, Aydisa M., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
3 Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk 630090, Russia



Деев Евгений Викторович, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия
e-mail: deev@ngs.ru

Deev, Evgeny V., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
3 Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: deev@ngs.ru



Бабушкин Сергей Михайлович, директор
Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН
630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3, Россия

Babushkin, Sergei M., Director
Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS
3 Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk 630090, Russia