

УДК 550.34

Электромагнитные исследования на территории Алтае–Саянской горной области

© 2021 г. С.М. Бабушкин¹, Н.Н. Неведрова^{1,2}, В.С. Селезнев¹, А.В. Лисейкин¹

¹СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

Аннотация. Разработан новый программно-измерительный комплекс для регистрации нестационарных электромагнитных зондирований на основе мобильных модулей, созданных на базе 24-разрядных АЦП, со встроенными GPS-приёмниками, с расположением регистраторов непосредственно у датчиков поля, арифметическим шагом дискретизации и записью всех реализаций сигнала. Изучено глубинное строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным зондирований становлением поля. Исследования актуальны в связи с высокой сейсмической опасностью территории, а также востребованы для поисков и разведки прогнозируемых здесь полезных ископаемых. Для построения геоэлектрических моделей привлечены данные за несколько лет измерений, в течение которых выполнено более 60 зондирований. На данном этапе интерпретация выполнена с использованием компьютерных систем в рамках горизонтально-слоистой модели. Результаты интерпретации представлены в виде разрезов и трёхмерных визуализаций, наглядно отражающих строение депрессии. Далее планируются трёхмерное моделирование и дополнительные измерения для верификации и уточнения полученных результатов.

Ключевые слова: электроразведочная станция «Байкал-512», Уймонская впадина Горного Алтая, нестационарное электромагнитное зондирование, геоэлектрические модели, сейсмоопасный район.

Для цитирования: Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Электромагнитные исследования на территории Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.01>

Введение

Разработан аппаратно-программный комплекс серии «Байкал (модульная система)» для исследования и мониторинга геоэлектрических параметров среды, нацеленный на решение современных актуальных задач геофизических методов поиска, разведки и доразведки различных месторождений, экологических, инженерных задач, мониторинга геологической среды в сейсмоактивных районах в режимах 3D и 4D. Архитектура комплекса состоит из семейства цифровых модульных регистраторов и комплекса компьютерного обеспечения для обработки, редактирования и просмотра данных.

Назначение комплекса: проведение высокопроизводительных профильно-площадных глубинных зондирований становлением поля (ЗС) с контролируемым источником ЭМ-поля. Отличительные особенности: беспроводная простран-

ственно асинхронная система сбора профильной и площадной информации. Количество многоканальных модулей сбора комплексной информации неограниченно. С помощью комплекса можно легко создавать любые системы наблюдений.

Регистраторы предусматривают режимы работ как с традиционными датчиками электромагнитных нестационарных полей (приёмные линии и петли, магнитные датчики), так и с современными системами многокомпонентной регистрации этих полей и их производных, выполненных на основе тонких магнитных плёнок. Синхронизация и позиционирование регистраторов осуществляется с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS).

За четыре года измерений на территории Уймонской впадины получена относительно равномерная сеть наблюдений методом ЗС,

что позволяет построить её глубинную модель. В местах неглубокого залегания фундамента, в зонах перехода от горного обрамления к осадкам, заполняющим котловину, был привлечён метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), а также электротомография, обработка этих данных продолжается. Из крупных впадин Горного Алтая Уймонская котловина является наименее изученной, до выполнения электроразведочных работ не было достоверных сведений о мощности, возрасте, вещественном составе кайнозойских отложений, её выполняющих. В 2013 г. на основе анализа первых геоэлектрических разрезов практически в центре котловины была пробурена первая глубокая скважина, вскрывшая разрез неоген-четвертичных отложений до 400 м [Русанов и др., 2017]. Эти данные привлечены в ходе интерпретации и анализа всего объёма данных ЗС. Вначале проведена компьютерная интерпретация с использованием горизонтально-слоистой модели, а далее для уточнения результатов и их верификации будут привлечены трёхмерные программы, разработанные в ИНГГ СО РАН. Первый этап обработки полевого материала показал, что получены данные высокого качества, а геоэлектрические модели отражают неоднородное блоковое строение кайнозойских отложений. Мощность осадков в разных отдельных блоках изменяется от 200 до 1000 м и более. Актуальность и важность исследований в Уймонской впадине не вызывает сомнений, так как они имеют теоретическую и практическую значимость, необходимы для целого ряда геологических дисциплин, геодинамических построений, сейсморайонирования, сейсмобезопасности, востребованы для поиска полезных ископаемых. В частности, в Уймонской впадине прогнозируется погребённая, значительная по объёму, золотоносная россыпь. Имеются предпосылки для разведки других рудных и нерудных месторождений.

1. Аппаратурная разработка «Байкал-512»

Объект разработки

Электроразведочная система регистрации переходных процессов в составе программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований.

Разработка, изготовление и полевые испытания регистрирующей аппаратуры выполнены силами Сейсмологического филиала (СЕФ) ФИЦ ЕГС РАН и Сибирского филиала (СИФ) ФИЦ ЕГС РАН в период 2018–2020 гг.

Актуальность разработки

Нестационарные электромагнитные зондирования показали свою высокую эффективность и заняли достойное место в комплексе работ по изучению литосферы Земли до глубин в несколько километров. Осложнения, с которыми приходится иметь дело, можно разделить на две группы. К первой следует отнести геологические факторы, затрудняющие исследование осадочных отложений, — трапповый магматизм, разрывные нарушения, соляную тектонику, сложную морфологию терригенных и карбонатных коллекторов. Вторая группа — это сложные условия рельефа и климата, наличие интенсивных промышленных электромагнитных помех. Также важную роль играет возрастание стоимости электроразведочных работ в сложных условиях и при повышении пространственной плотности наблюдений.

Таким образом, требовалась разработка современной многоканальной регистрирующей аппаратуры, создание измерительных систем с высокой мобильностью, точностью измерения, с возможностью эффективной организации наблюдений с повышенной пространственно-временной плотностью в условиях густой залёсённости и сложного рельефа местности. Актуальной являлась разработка технологий сбора и математической компьютеризированной обработки информации для условий высокого уровня электромагнитных помех вблизи промышленных объектов.

Задачи разработки

Разработка измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе мобильных регистрирующих систем с высокой пространственной плотностью наблюдений, арифметическим шагом дискретизации и записью всех накоплений в цифровом виде; разработка программного обеспечения для регистрации, обработки сигналов, подавления помех, интерпретации.

Цель разработки

Повышение достоверности и качества геофизических данных, увеличение информативности нестационарных электромагнитных зондирований путём создания измерительного комплекса на основе современной элементной базы.

1.1. Электроразведочная станция для проведения работ методом ЗС «Байкал-512»

Основные особенности системы регистрации для нестационарных электромагнитных зондирований:

— одновременная регистрация сигналов становления электромагнитного поля от нескольких

приёмников поля (возможно использование приёмников любых типов – петля, линия, компактные датчики и др.), пространственно отдалённых друг от друга;

– расположение усилительных трактов и аналого-цифрового преобразователя непосредственно у приёмной петли, что позволяет избавиться от проблемы передачи аналоговых сигналов и тем самым повысить качество записываемого материала и помехозащищённость измерителя;

– высокоточная настраиваемая система синхронизации источника тока и измерительной системы на основе GPS;

– небольшие габариты и масса полевых модулей обеспечивают мобильность измерительного комплекса, позволяют располагать приёмные петли в стороне от дорог и организовывать наблюдения в широкой пространственной полосе в условиях пересечённого рельефа. Регистрирующая система, состоящая из неограниченного набора модулей, позволяет выполнять сложные площадные и профильные наблюдения с высокой пространственно-временной плотностью;

– программный комплекс, созданный с учётом эксплуатации прежней версии программного обеспечения для аппаратуры «Байкал МЭРС-Т», обеспечивает получение, обработку и представление данных на всех этапах работы. Входящие в него программы обладают удобным унифицированным графическим интерфейсом.

Содержание разработки

Центральным узлом электроразведочной станции является одноканальный цифровой модуль 24-битной геофизической электромагнитной измерительной системы «Байкал-512 (модульная)». Разработан вариант прибора для различных частотных диапазонов (диапазоны ЗС), собранный в одном корпусе. Частотный диапазон ЗС составляет 0.01–512000 Гц.

К модулю подключаются датчики электрического и/или магнитного поля как традиционные – линии, одновитковая или многовитковая рамки, так и датчики, собранные по технологии тонких магнитных плёнок.

Модуль «Байкал-512» эксплуатируется в качестве автономной системы или как часть массива модулей, в котором каждый блок синхронизируется при помощи встроенных приёмных устройств спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS.

Основные технические преимущества

Высокое качество данных благодаря 24-битной технологии аналого-цифрового преобразования.

Ультранизкие характеристики шума – менее 0.2 мкВ.

Малый температурный дрейф входного напряжения смещения и входного тока смещения.

Возможность автономной эксплуатации или эксплуатации в многоканальной сетевой системе.

Высокая точность синхронизации нескольких автономных систем с помощью спутниковых навигационных систем.

Совместимость как с семейством датчиков, традиционно используемых в методах ЗС, так и с новыми разработками на основе технологии тонких магнитных плёнок.

Компактная, лёгкая, водонепроницаемая конструкция повышенной прочности.

Широкий рабочий диапазон температур: от –30 до +60°C.

Изготовлено пять опытных образцов одноканального электроразведочного модуля (ЭМ) «Байкал-512». Внешний вид аппаратуры «Байкал-512» приведён на рис. 1.



Рис. 1. Электроразведочный модуль «Байкал-512»

1.2. Результаты

Проведены натурные испытания опытного образца ЭМ «Байкал-512».

Оценена эффективность многоканальной электромагнитной системы для задач выделения сложно построенных геологических объектов.

Разработана оригинальная технология многокомпонентной электроразведки на основе комплекса электромагнитных зондирований Земли с использованием контролируемых и естественных источников.

Создано программное обеспечение для обработки и интерпретации данных нестационарных электромагнитных зондирований.

Проведены тестовые измерения электромагнитных полей.

Электроразведочные измерения методом ЗС в Чуйской впадине Горного Алтая

В полевой период 2020 г. был проведён эксперимент по регистрации процесса становления поля на ПК 134 двумя комплектами измерительной аппаратуры. В данной точке был проведён эксперимент с регистрацией переходного процесса становления поля аппаратурой «Байкал-512» с частотой оцифровки 512 кГц и «Байкал МЭРС-Т» с частотой оцифровки 100 кГц.

Параметры установки излучения и регистрации сигнала становления поля в эксперименте были следующими: генераторная петля (ГП) размером 500×500 м, измерительная петля (ИП) – 200×200 м. Измерения осуществлялись на двух уровнях токового импульса в генераторной петле: большой ток в интервале 18.0÷25.0 А и малый – 2.5÷3.1 А. Регистрация проводилась на двух коэффициентах усиления на приёмной петле (1; 16).

Результаты сопоставления зарегистрированных процессов становления поля двумя комплектами измерительной аппаратуры с разными значениями частот оцифровки приведены на рис. 2.

Анализ сравнения процессов регистрации позволяет сделать следующие выводы:

- начальное время регистрации аппаратурой «Байкал-512» составляет 1.95 мкс, что даёт возможность улучшить детализацию верхней части геологического разреза при построении геоэлектрической модели;

- в интервале времён регистрации до 200 мкс аппаратурой с частотой оцифровки 100 кГц наблюдается колебательный процесс, что связано с параметрами работы АЦП. На зарегистрированном процессе становления поля аппаратурой с частотой оцифровки 512 кГц данных осцилляций нет;

- в поздней стадии становления поля на временах в интервале 200–300 мс данные с использованием аппаратуры с частотой оцифровки 512 кГц более точно отражают глубинную часть геологического разреза.

На рис. 3 показано рассчитанное по данным регистрации переходного процесса распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) осадочного чехла до глубин залегания фундамента. Измерения проводились аппаратурой с частотой оцифровки 100 и 512 кГц. Как можно видеть из сопоставления геоэлектрических моделей (1D инверсия), построенных по данным с разной аппаратурой, более детальное расчленение разреза получено с аппаратурой «Байкал-512». Также более достоверно рассчитываются параметры опорного горизонта.

Выводы

Частота оцифровки 512 кГц позволила более достоверно зарегистрировать процесс становления ЭДС переходного процесса в интервале времён 0.002–0.2 мс.

В интервале времён 0.2–100 мс погрешность регистрации процессов становления ЭДС переходного процесса находится в интервале меньше 1%.

В поздней стадии регистрации на времени более 100 мс уровень регистрации с частотой оцифровки 512 кГц составляет $+1 \cdot 10^{-5}$ мВ, что значительно лучше уровня регистрации с частотой 100 кГц ($5 \cdot 10^{-5}$ мВ). Уровни сигналов нормированы на силу тока и приведены к значениям 1 А.

2. Строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным нестационарного электромагнитного зондирования

Геолого-геофизические данные

Уймонская котловина приурочена к долине р. Катунь и протягивается вдоль реки более чем на 35 км при небольшой ширине в 10–12 км. Впадину ограничивают горные хребты: Теректинский с севера и Катунский с юга. Высотные отметки северного борта впадины составляют 1100–1150 м, в то время как южный борт находится на отметках в 800–900 м, поэтому в целом днище котловины погружается в южном направлении.

По данным неглубоких скважин (до 80–90 м), у пос. Маргала под метаморфическими сланцами вскрыты неогеновые глины. Характер этих отложений свидетельствует о наличии крутопадающего взброса вдоль подножия Теректинского хребта, отделённого от котловины активным ступенчатым Южно-Теректинским разломом. Блоковая структура южного ограничения впадины также создаётся разнонаправленными разломами Катунского хребта с высотами от 2800 до 4500 м [Деев и др., 2012].

Исследуемая территория имеет длительную историю геологического развития. В разрезе присутствуют отложения протерозоя, синия, нижнего и среднего палеозоя, кайнозоя. Основание Уймонской впадины представлено теректинской свитой (метаморфические сланцы, песчаники), перекрытой баратальской свитой (вулканогенные метаморфизованные отложения) предположительно синийского возраста. В западной и центральной части впадины обрывки анти- и синклиналей баратальской свиты ($S_{n,br}$) выходят на дневную поверхность. Развитие района в мезозое и кайнозое в континентальных условиях привело к нивелированию складчатой страны, к сводово-глыбовым поднятиям.

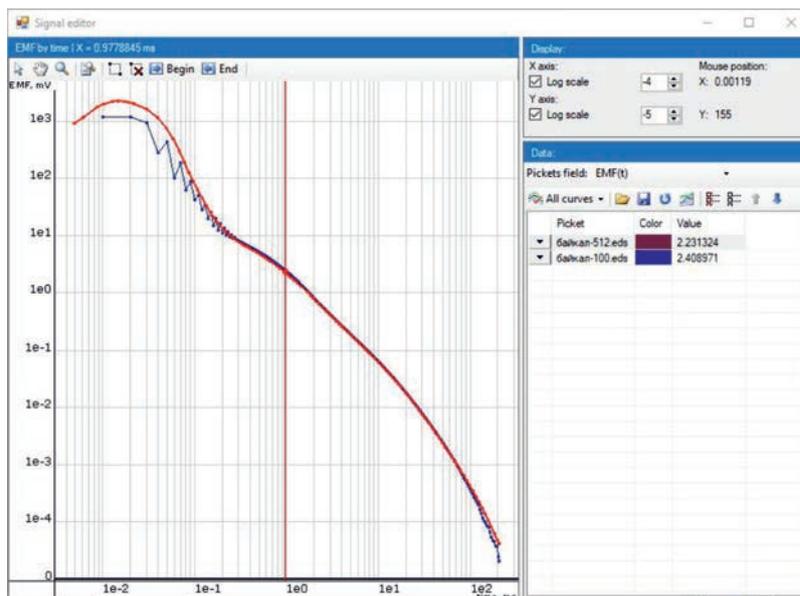
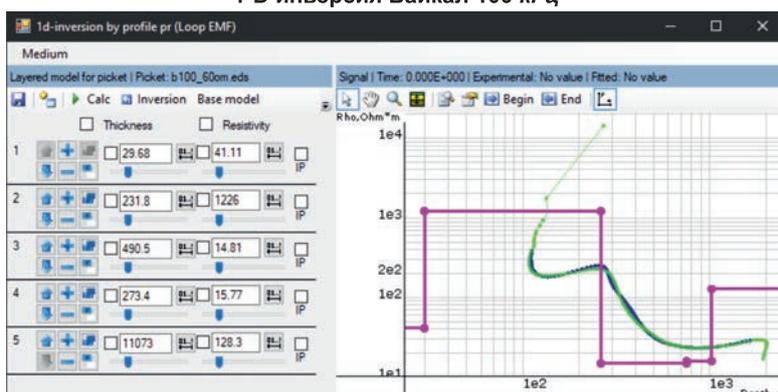


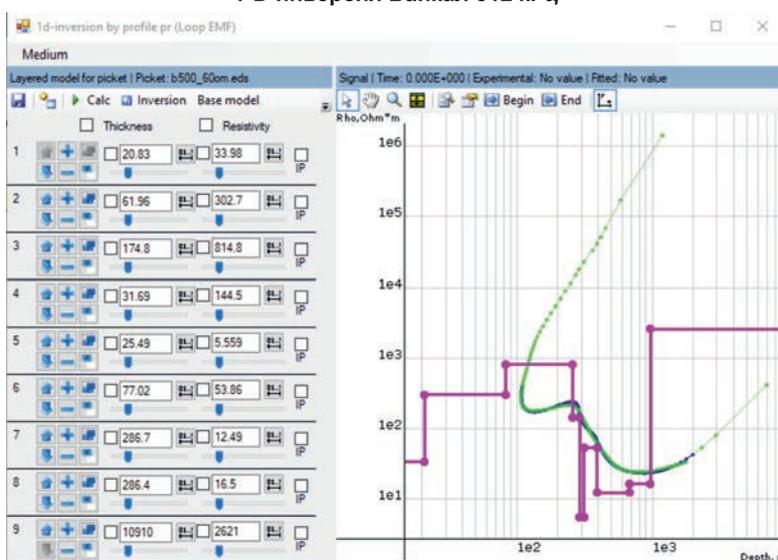
Рис. 2. Измеряемые процессы ЭДС с аппаратурой «Байкал МЭРС-Т» (синяя кривая) и «Байкал-512» (красная кривая).

Генераторная петля 500×500 м, измерительная петля 200×200 м

1-D инверсия Байкал 100 кГц



1-D инверсия Байкал 512 кГц



Условные обозначения

-  — геозлектрическая модель, уровни значений УЭС, Ом·м
-  — подбор модельной, кривой $R_0(H)$, Ом·м
-  — экспериментальная кривая $R_0(H)$, Ом·м

Рис. 3. Геозлектрические модели осадочного чехла

Образование ледниковых озёр связано с двумя эпохами оледенения. В прибортовых частях котловины обнаружены отложения ледниково-подпрудного озера и гигантского гляциального паводка во время спуска последнего из ледниковых озёр [Федак и др., 2011; Зольников и др., 2015].

Район относится к территориям с высокой степенью сейсмической опасности, что обусловлено присутствием сейсмогенерирующих разломов. Современная активность в зоне Южно-Теректинского разлома проявляется, например, наличием цепочек низкодебитных источников, образующих заболоченные западины на склоне Теректинского хребта. В Уймонской впадине существует потенциальная угроза не только разрушительных землетрясений, но также велика

вероятность перегораживания рек с образованием подпрудных озёр с неустойчивыми плотинами [Зольников и др., 2015].

Этапы исследования и характеристика полевых данных ЗС

Инициативные полевые исследования комплексом электромагнитных методов в Уймонской впадине Горного Алтая выполнялись в несколько этапов: в 2011–2012 гг. и далее в 2017–2018 гг. Пункты и профили электромагнитных наблюдений за разные годы показаны на геологической карте района исследований с описанием стратиграфии и литологии горных пород в условных обозначениях [Левицкий и др., 1964; Федак и др., 2011], рис. 4.

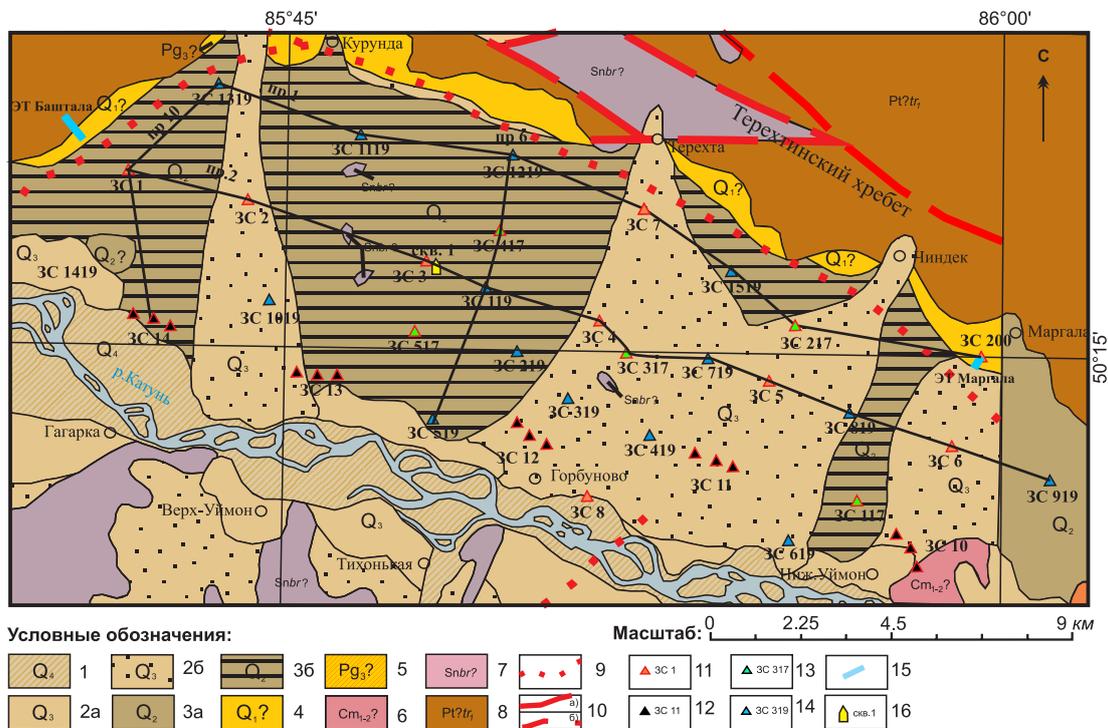


Рис. 4. Карта фактического материала на территории Уймонской впадины Горного Алтая.

1–4 – Четвертичная система: 1 – Современный отдел. Аллювиальные галечники и пески; 2 – Верхний отдел. Ледниковые валунники и суглинки, водно-ледниковые галечники, аллювиальные галечники и пески, пролювиальные галечники, озёрные галечники и гравийные суглинки: а – речные, б – делювиально-пролювиальные; 3 – Средний отдел. Ледниковые валунники, водно-ледниковые галечники и глины, аллювиальные галечники, пески и глины, озёрные галечники, суглинки, пески: а – речные, б – озёрно-болотные; 4 – Нижний отдел (?). Делювиально-пролювиальные суглинки, глины, пески; 5 – Палеогеновая система. Олигоцен (?). Глины; 6 – Кембрийская система. Нижний-средний отделы (?). Метаморфизованные порфиры, диабазовые порфиры, вариолиты и их туфы, филлиты, алевролиты, песчаники, кремнисто-глинистые сланцы; 7 – Синийский комплекс. Баратальская (?) свита. Метаморфизованные диабазы, порфиры и их туфы, кварц-полевошпатовые породы, метаморфизованные песчаники, метаморфизованные сланцы, мраморы, кварциты; 8 – Протерозойская группа (?). Теректинская свита, нижняя подсвита. Метаморфизованные сланцы, сильно метаморфизованные песчаники, мраморы; 9 – линии тектонического контакта, предполагаемые под кайнозойскими отложениями; 10 – тектонические контакты: а – достоверные, б – предполагаемые; 11–14 – пункты измерений ЗС: 11 – 2011 г., 12 – 2012 г., 13 – 2017 г., 14 – 2019 г.; 15 – профили электротомографии; 16 – скважина

Этап 2011 г. был связан с разработкой проекта буровых работ на территории Уймонской впадины. Первые электроразведочные работы комплексом методов ЗС, ВЭЗ, электротомографии были выполнены по двум проектируемым буровым профилям, широтному и меридиональному, которые пересекались примерно в центре впадины. В результате интерпретации этих полевых данных ЗС были получены сведения о строении осадочного чехла. На основании данных геоэлектрики был предложен участок, подходящий для бурения глубокой скважины в районе пункта ЗС 3, расположенного в западной части впадины.

В 2013 г. специалистами ОАО «Горно-Алтайская Экспедиция» была пробурена скважина № 1 на участке Усть-Коксинской площади на основе анализа материалов электроразведки [Деев и др., 2012]. Устье скважины разместили на 200 м

восточнее пикета ЗС 3. Забой скважины достиг 400 м. Впервые был вскрыт разрез неоген-четвертичных отложений впадины. Возраст отложений подтверждён палеонтологическими данными (фауна остракод, споры и пыльца). Обобщённая стратиграфическая колонка скважины представлена в таблице. Опираясь на полученные данные, можно предполагать, что геологическое развитие и осадконакопление в крупных впадинах Горного Алтая – Чуйской, Курайской и Уймонской – происходило практически одновременно [Русанов и др., 2017; Неведрова и др., 2013].

На рис. 5 показана кривая ЗС 3 (2011 г.) и геоэлектрическая модель в результате инверсии полевых данных. Сопоставление скважинных и электромагнитных данных, полученных на небольшом расстоянии от скважины, свидетельствует об их хорошем согласовании.

Таблица. Геологический разрез скважины № 1

Описание пород	Индекс	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м
Озёрно-ледниковые (?) отложения: переслаивание глин, галечников, песков	lgQ _{III}	23	23
Ледниковые, флювиогляциальные и аллювиальные (?) отложения нерасчленённые: переслаивание валунного галечника, гравия, валунника, песка,	g, f, aQ _{II}	207	184
Аллювиальные и пролювиальные (?) отложения башкаусской свиты: переслаивание гравия, валунника, валунного галечника, песка, галечника	a, pQ _{II} bs	297	90
Озёрно-аллювиальные (?) отложения бекенской свиты: переслаивание глины, галечника, песка галечно-гравийного	laQ _I bk	339	42
Озёрные отложения туерыкской свиты: алевроит, глина	N ₁₋₂ tr	400	61

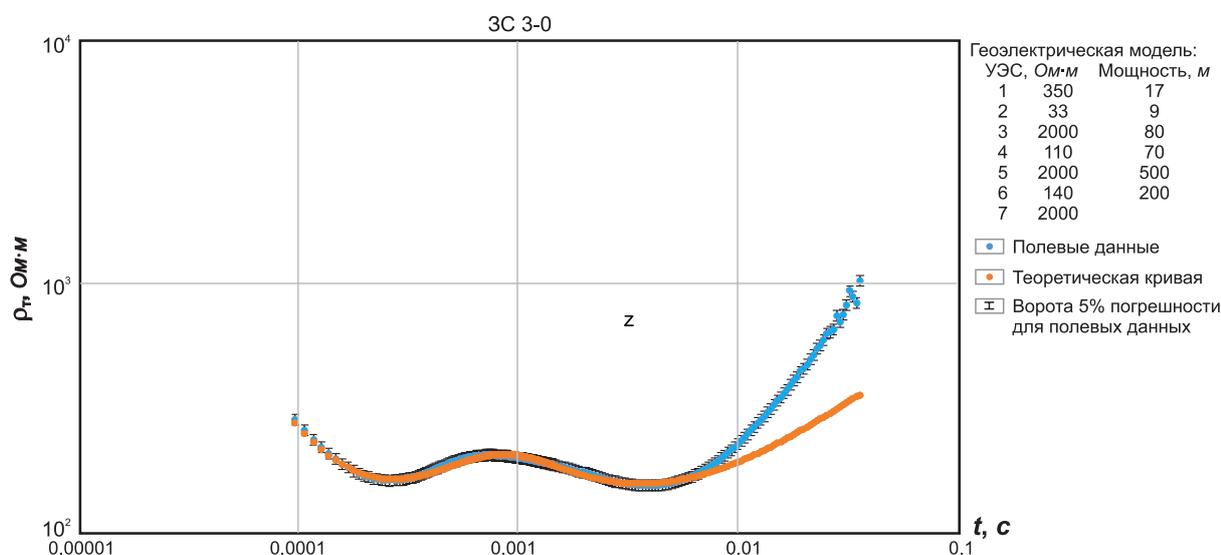


Рис. 5. Полевые данные, теоретическая кривая ЗС 3 и геоэлектрическая модель

В разрезе по скважине выделяется маломощный 23-метровый приповерхностный горизонт. В модели по данным ЗС присутствуют два тонких слоя общей мощностью в 40 м. Далее в разрезе скважины присутствуют три слоя по литологическому составу с преобладающим содержанием валунно-галечно-гравийного материала общей мощностью в 316 м, что соответствует третьему горизонту геоэлектрической модели с высокими значениями УЭС в 2000 Ом·м и толщиной в 305 м. Таким образом, глубина до кровли алеврито-глинистых отложений озёрной туеркской свиты по данным геоэлектрики составляет 345 м, а УЭС – 28 Ом·м. Скважиной эти отложения вскрыты на отметке немногим более 339 м, и далее она была остановлена в них через 60 м. Погрешность определения границы с туеркской свитой методом ЗС не превышает нескольких процентов.

Электроразведочные работы 2012, 2017 и, особенно, 2019 гг. позволили создать доста-

точно плотную сеть наблюдений методом ЗС (рис. 4). В настоящее время весь объём полученных полевых данных был обработан и проинтерпретирован с помощью интерактивных компьютерных систем интерпретации и математического моделирования нестационарных электромагнитных полей в рамках горизонтально-слоистой среды («Эра» и EMS) [Энов и др., 1990; Хабинов и др., 2010]. Предшествующий анализ сопоставления кривых для соосной и разнесённой установок (данные ЗС за 2011–2012 гг.) показал возможность использования горизонтально-слоистой модели для интерпретации. Получено несколько типов кривых ЗС, интерпретация которых отражает крайне сложное строение Уймонской депрессии. Рассмотрим характерные кривые 2019 г., модели практически соответствуют горизонтально-слоистой среде (рис. 6а, б). Полевые данные позволяют определить все геоэлектрические параметры разреза [Санчаа и др., 2020].

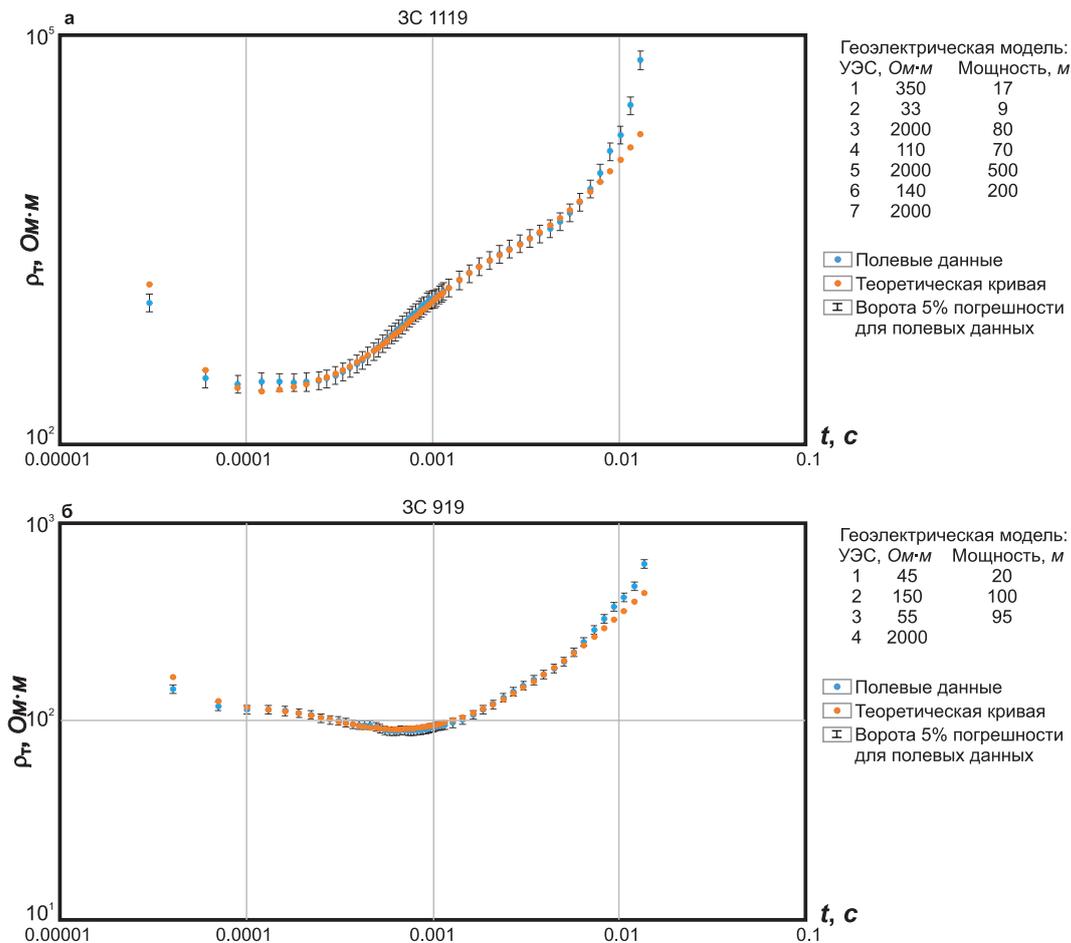


Рис. 6. Полевые данные, теоретические кривые и модели по данным ЗС за 2019 г. в Уймонской впадине: а – ЗС 1119; б – ЗС 919.

Отмечены ворота пятипроцентной погрешности для полевых данных

Модель ЗС 1119 характеризует строение одного из погружённых блоков со значительной мощностью осадочной толщи в 900 м, пункт зондирования расположен на северо-западе впадины в 2.5 км от Южно-Теректинской разломной зоны. По данным ЗС 919, мощность осадков составляет всего около 200 м, так как этот пункт находится в восточном замыкании впадины, примерно в километре от выходов коренных пород в приподнятом блоке фундамента.

Обсуждение результатов интерпретации данных ЗС

Цель работы заключалась в построении глубинных геоэлектрических моделей Уймонской впадины. Геоэлектрические разрезы по данным ЗС построены по разным направлениям на территории впадины в результате геолого-геофизической интерпретации. Полученный четырёхслойный разрез с высокоомным основанием (фундаментом) содержит три осадочных горизонта. Верхний крайне неоднородный по литологическому составу горизонт, содержащий один-два тонких слоя, включает верхнечетвер-

тичные отложения. Во второй мощный горизонт входят горные породы четвертичной системы, башкауской и бекенской свит с преобладанием гравийно-галечного материала. Толщина этого высокоомного горизонта существенно изменяется по простиранию профиля. Третий горизонт в целом имеет меньшую мощность по сравнению со вторым и представлен песчано-глинистыми палеоген-неогеновыми отложениями с наиболее низким удельным сопротивлением.

Сложную структуру впадины наглядно отражают разрезы по субширотным профилям. Профиль 1 проходит вдоль северного борта впадины на расстоянии примерно в 2 км от Теректинского хребта (рис. 7). На разрезе по профилю 1 наблюдается чередование погружённых и приподнятых блоков, показаны предполагаемые разломы.

Профиль 2 пересекает центральную часть впадины с северо-запада на юго-восток и проходит через глубокую скважину № 1. Разрез отражает наиболее сложные структурные элементы (рис. 8). Между пунктами ЗС 2 и 3 на дневной поверхности наблюдается выход эффузивных

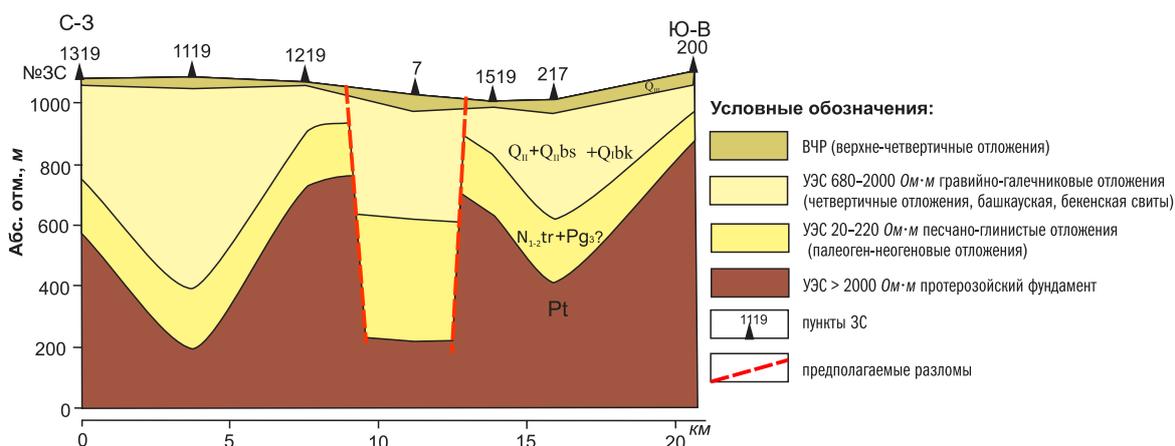


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по субширотному профилю 1 вдоль северного борта Уймонской впадины

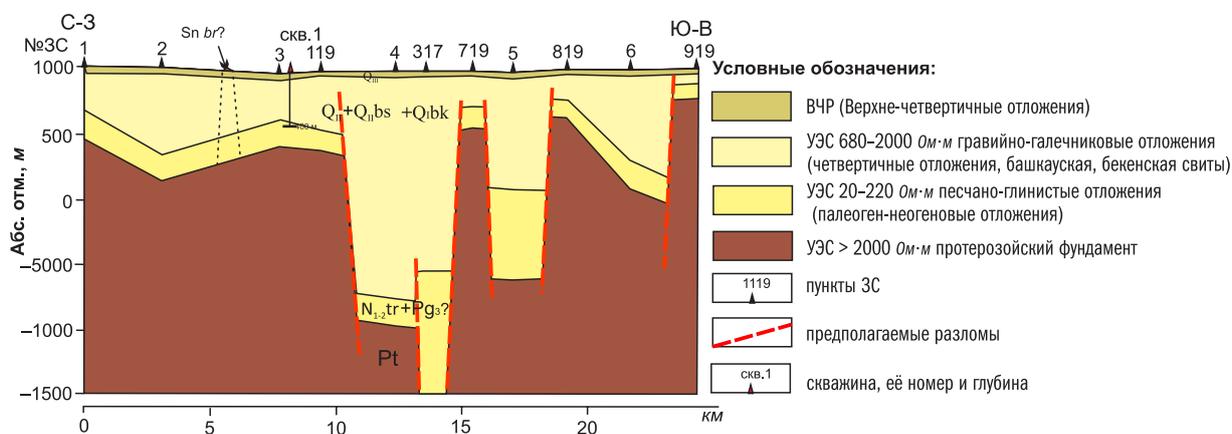


Рис. 8. Субширотный разрез по профилю 2 через центральную часть Уймонской впадины

пород предположительно синийского комплекса баратальской свиты. На данном этапе исследования, учитывая достаточно большое расстояние между пунктами, невозможно определить углы падения этой свиты и достоверно отрисовать её конфигурацию.

Для того чтобы отобразить общую структуру Уймонской котловины, выполнены две трёхмерные визуализации (рис. 9а, б). Построена блоковая модель поверхности фундамента с использованием всех полученных данных ЗС с соосными

установками (рис. 9а). На рисунке хорошо выделяются приподнятые блоки фундамента (коричневые цвета) и погружённые блоки (синие оттенки). Скорее всего, крупная разломная зона разделяет впадину на две части – западную и восточную. Эта разломная зона прослежена специалистами-геологами в Теректинском хребте [Деев, 2019], а по данным ЗС её можно проследить в фундаменте впадины в области максимального погружения фундамента, которая выделена на рис. 9а белым контуром.

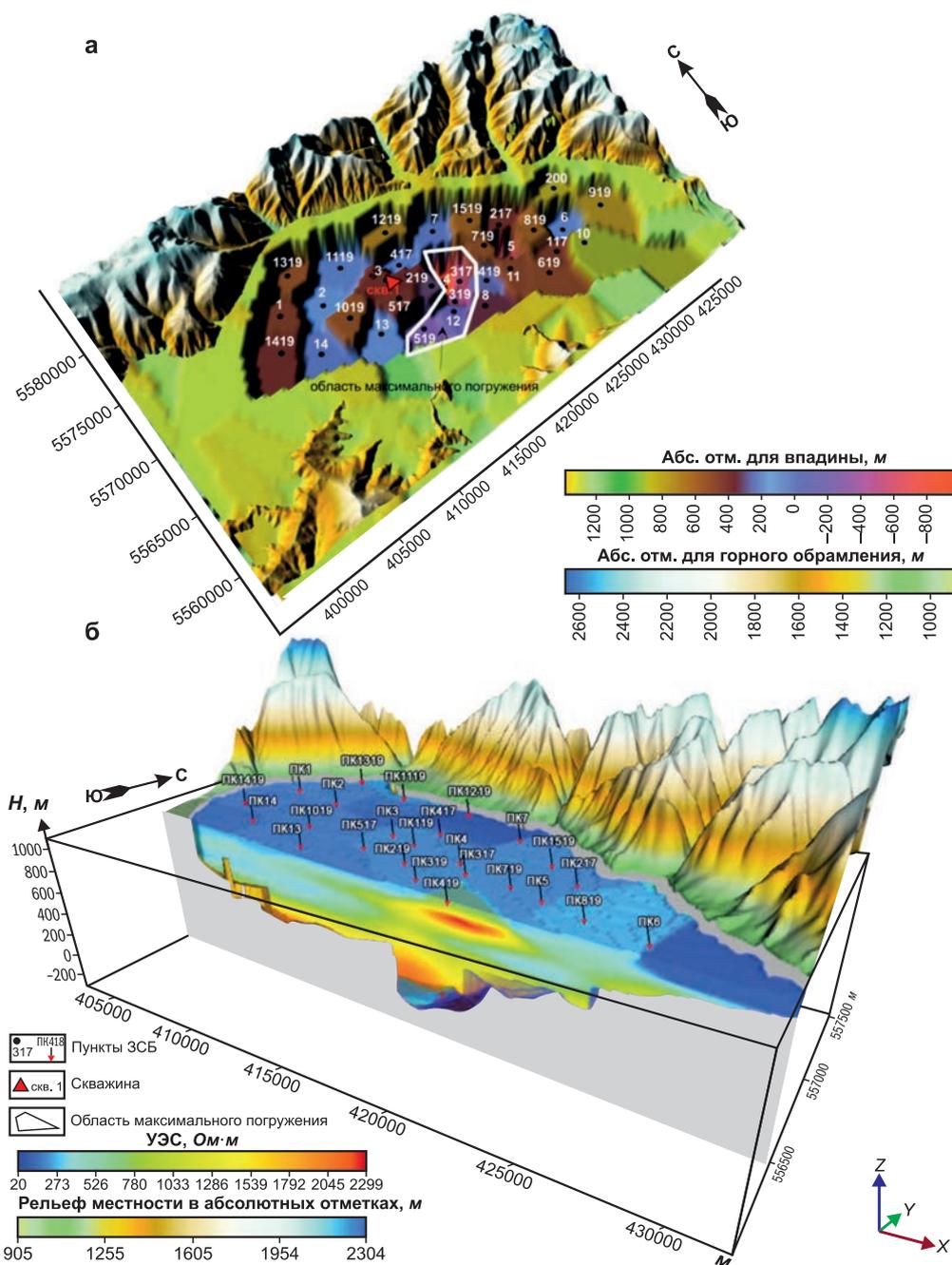


Рис. 9. Трёхмерные модели Уймонской впадины: а – блоковая модель поверхности фундамента; б – вертикальный срез осадочного заполнения впадины в широтном направлении

На рис. 9б показан вертикальный срез, выполненный по простиранию впадины. На нём хорошо видна зона максимальной мощности осадков в районе пунктов ЗС 4, 317, а также по нему можно судить о распределении удельного электрического сопротивления горных пород. Отложения, которые по геологическим данным отнесены к туерыкской и возможно к кош-агачской свитам, имеют наиболее низкие значения УЭС, но можно отметить, что у них УЭС изменяется в более широком интервале — от 20 до 220 Ом·м по сравнению, например, с Чуйской впадиной. Литологический состав и возраст более глубоких проводящих отложений пока достоверно неизвестен.

Заключение

По итогам выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ получены следующие основные результаты.

Изготовлено пять опытных образцов модульных регистраторов «Байкал-512».

Разработан программный комплекс сбора и обработки полевых измерений.

Проведены натурные испытания опытного образца «Байкал-512» на полигоне в Чуйской впадине в зоне многолетних мониторинговых измерений (пикет ПК 134), показавшие его высокую эффективность.

Выполненные электроразведочные исследования в Уймонской впадине Горного Алтая позволили впервые представить её глубинное строение. В настоящее время проведена количественная интерпретация полевых данных метода ЗС с использованием программных средств одномерной интерпретации. В результате удалось не только получить мощности и интервалы удельных электрических сопротивлений отдельных литологических комплексов, но с привлечением геологических данных выполнить стратиграфическую привязку части выделенных геоэлектрических горизонтов.

Рассмотрение данных о палеоземлетрясениях с магнитудами более 7 в периоды около 16 тыс. лет и 6000 лет назад [Деев, 2019] позволяет предложить гипотезу образования зоны наиболее погружённых блоков фундамента Уймонской котловины. Можно предполагать, что она связана с этими катастрофическими сейсмическими событиями, приведшими к усилению тектонических подвижек отдельных блоков, их опусканию и спуску ледникового подпрудного озера.

Авторы статьи выражают благодарность за консультации по геологическим материалам и аппаратурным разработкам: д.г.-м.н. Е.В. Дееву и И.Д. Зольникову; за помощь в интерпрета-

ции данных ЗС — к.г.-м.н. А.М. Санчаа; за участие в разработке регистратора «Байкал-512» — к.ф.-м.н. В.М. Семибаламуту.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

Деев Е.В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // Физика Земли. — 2019. — № 3. — С. 71–96. doi: 10.31857/S0002-33372019371-96

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 межгорной впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2012. — № 1 (9). — С. 15–23.

Зольников И.Д., Деев Е.В., Назаров Д.В., Котлер С.А. Сравнительный анализ суперпаводковых отложений и аллювия долин рек Чуя и Катунь (Горный Алтай) // Геология и геофизика. — 2015. — Т. 56, № 8. — С. 1483–1495. doi: 10.15372/GiG20150807

Левицкий Е.С., Баженова С.Н., Борцова А.В. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-XIV. Горно-Алтайск. Объяснительная записка. — М.: Недра, 1964.

Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В., Бабушкин С.М. Неотектоническое строение межгорных впадин Горного Алтая по электромагнитным и геологическим данным // Геодинамика и тектонофизика (Geodynamics & Tectonophysics): Сетевое издание. — 2013. — Т. 4, № 3. — С. 301–312. doi: 10.5800/GT-2013-4-3-0102

Русанов Г.Г., Деев Е.В., Зольников И.Д., Хазин Л.Б., Хазина И.В., Кузьмина О.Б. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. — 2017. — Т. 58, № 8. — С. 1220–1233. doi: 10.15372/GiG20170809

Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2020. — № 3. — С. 66–76. doi: 10.20403/2078-0575-2020-3-66-76

Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И., Шокальский С.П., Русанов Г.Г., Борисов Б.А., Беляев Г.М., Леонтьева Е.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000

(третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45. Горно-Алтайск: Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011.
Хабин О.Г., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных площадных электромагнит-

ных зондирований // ГЕО-Сибирь. – 2010. – Т. 2, № 1. – С. 164–168.

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. – Новосибирск: ИГиГ, 1990. – 29 с.

Сведения об авторах

Бабушкин Сергей Михайлович, зам. директора Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: babushkin.50@mail.ru

Неведрова Нина Николаевна, д-р геол.-мин. наук, вед. инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: sel@gs.sbras.ru

Лисейкин Алексей Владимирович, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: lexik1979@mail.ru

Electromagnetic research in the Altai–Sayan mountain region

© 2021 S.M. Babushkin¹, N.N. Nevedrova^{1,2}, V.S. Seleznev¹, A.V. Liseikin¹

¹SED GS RAS, Novosibirsk, Russia; ²IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia

Received February 16, 2021

Abstract A new software-measuring complex has been developed for recording non-stationary electromagnetic soundings based on mobile modules created on the basis of 24-bit ADCs, with built-in GPS receivers, with recorders located directly at the field sensors, arithmetic sampling step and recording of all signal realizations. The deep structure of the Uimon depression in Gorny Altai has been studied based on the time-domain electromagnetic sounding. Research is relevant due to the high seismic hazard of the area, and is also in demand for prospecting and exploration of predicted minerals here. To construct geoelectric models, data from several years of measurements were used, during which more than 60 soundings were performed. At this stage, the interpretation was performed using computer systems within the framework of a horizontally layered model. The interpretation results are presented in the form of sections and three-dimensional visualizations, which clearly reflect the structure of the depression. Further, three-dimensional modeling and additional measurements are planned to verify and refine the results obtained.

Keywords electrical exploration station “Baikal-512”, Uimonskaya depression of Gorny Altai, non-stationary electromagnetic sounding, geoelectric models, earthquake hazardous area.

For citation Babushkin, S.M., Nevedrova, N.N., Seleznev, V.S., & Liseikin, A.V. (2021). [Electromagnetic research in the Altai–Sayan mountain region]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(2), 7–19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.01>

References

- Deev, E.V. (2019). Localization zones of ancient and historical earthquakes in Gorny Altai. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 55(3), 451-470. doi: 10.1134/S1069351319030030
- Deev, E.V., Nevedrova, N.N., Rusanov, G.G., Sanchaa, A.M., Babushkin, S.M., Krechetov, D.V., Eltsov, I.N., & Zolnikov, I.D. [New data on structure of Uimon intermountain basin (Gorny Altai)]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 1(9), 15-23. (In Russ.).
- Епов, М.И., Дашевский, Ю.А., & Eltsov, I.N. (1990). *Avtomatizirovannaya interpretatsiya elektromagnitnykh zondirovaniy* [Automated interpretation of electromagnetic soundings]. Novosibirsk, Russia: IPGG Publ., 29 p. (In Russ.).
- Fedak, S.I., Turkin, Yu.A., Gusev, A.I., Shokalsky, S.P., Rusanov, G.G., Borisov, B.A., Belyaev, G.M., & Leontyeva, E.M. (2011). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Saianskaya. List M-45. Gorno-Altaysk: Ob'iasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation, scale 1: 1,000,000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet M-45. Gorno-Altaysk: Explanatory note]. St. Petersburg, Russia: "Cartographic factory VSEGEI" Publ. (In Russ.).
- Khabinov, O.G., Vlasov, A.A., & Antonov, E.Yu. (2010). [System for interpreting data of areal electromagnetic sounding]. *GEO-Sibir'* [GEO-Siberia], 2(1), 164-168. (In Russ.).
- Levitskiy, E.S., Bazhenova, S.N., & Bortsova, A.V. (1964). *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Seriya Gorno-Altayskaya. List M-45-XIV. Gorno-Altaysk: Ob'iasnitel'naya zapiska* [Geological map of the USSR on a scale of 1: 200,000. Gorno-Altai series. Sheet M-45-XIV. Gorno-Altaysk. Explanatory note]. Moscow, Russia: Nedra Publ. (In Russ.).
- 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. (In Russ.). doi: 10.5800/GT-2013-4-3-0102
- Rusanov, G.G., Deev, E.V., Khazin, L.B., Khazina, I.V., Kuz'mina, O.B., & Zolnikov, I.D. (2017). Reference section of Neogene-Quaternary deposits in the Uimon Basin (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 58(8), 973-983. doi: 10.1016/j.rgg.2017.07.008
- Sanchaa, A.M., Nevedrova, N.N., & Babushkin, S.M. (2020). [The Structure of the Uimon Depression of Gorny Altai According to the Data of Non-stationary Electromagnetic Sounding]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 3, 66-76. (In Russ.). doi: 10.20403/2078-0575-2020-3-66-76
- Zolnikov, I.D., Kotler, S.A., Deev, E.V., & Nazarov, D.V. (2015). Comparative analysis of megaflood deposits and alluvium of the Chuya and Katun' river valleys (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 56(8), 1162-1172. doi: 10.1016/j.rgg.2015.07.007

Information about authors

Babushkin Sergei Mikhailovich, Deputy Director of the Seismological Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SED GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: babushkin.50@mail.ru

Nevedrova Nina Nikolaevna, Dr., Lead Engineer of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia; Senior Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: NevedrovaNN@mail.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Director of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sel@gs.sbras.ru

Liseikin Aleksei Vladimirovich, PhD, Leading Researcher of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: lexik1979@mail.ru