

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ НА УЧАСТКЕ МУХОР-ТАРХАТА ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАННЫМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. М. Санчаа¹, Н. Н. Неведрова¹, Н. В. Штабель^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН; ²Новосибирский государственный технический университет; Новосибирск, Россия

Представлены результаты трехмерного моделирования разломной структуры в центральной части Чуйской впадины (Горный Алтай) на участке Мухор-Тархата. Здесь с 2004 г. по настоящее время сотрудниками ИНГГ СО РАН проводятся регулярные ежегодные наблюдения методом электромагнитного зондирования становлением поля для наблюдения за процессом восстановления геологической среды после катастрофического Чуйского землетрясения с магнитудой 7,3 в 2003 г. Одним из последствий разрушительного землетрясения являются зоны трещиноватости, выраженные на поверхности. В районе пос. Мухор-Тархата отмечены многочисленные деформации поверхности и хозяйственных объектов. Выделенная на участке по геологическим и электромагнитным данным разломная зона с субвертикальной трещиноватостью была активизирована после землетрясения. Для интерпретации и анализа данных мониторинга необходимы детальные данные о геоэлектрическом строении. На основе интерпретации данных ЗСБ получено глубинное строение разломной зоны. Для верификации и уточнения структурных особенностей геоэлектрической модели выполнено трехмерное моделирование.

Ключевые слова: Чуйская впадина, Горный Алтай, Мухор-Тархата, нестационарное электромагнитное зондирование, геоэлектрические модели, сейсмоопасный район, трехмерное математическое моделирование.

DEEP STRUCTURE OF THE FAULT ZONE IN THE MUKHOR-TARKATA SITE OF THE CHUYA DEPRESSION ACCORDING TO NON-STATIONARY ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA USING THREE-DIMENSIONAL MODELING

A. M. Sanchaa¹, N. N. Nevedrova¹, N. V. Shtabel^{1,2}

¹A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; ²Novosibirsk State Technical University; Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of three-dimensional modeling of the fault structure in the central part of the Chuya depression in Gornyi Altai within the Mukhor-Tarkhata plot. On this site, from 2004 to the present, researchers of the IPGG SB RAS have been conducting regular annual observations by the method of near-field time-domain electromagnetic sounding (TSB) to observe the process of restoration of the geological environment after the catastrophic Chuya earthquake with a magnitude of 7.3 in 2003. One of the aftereffects of the destructive earthquake is fracture zones expressed on the surface. Numerous deformations of the surface and industrial objects are observed in the area of the Mukhor-Tarkhata village. The fault zone with sub-vertical fracturing, identified at the site by geological and electromagnetic data, was activated after the earthquake. Detailed data on the geoelectric structure are required for the interpretation and analysis of monitoring data. Based on the interpretation of the near-field time-domain electromagnetic sounding data, the deep structure of the fault zone was obtained. To verify and clarify structural features of the geoelectric model, three-dimensional modeling was performed.

Keywords: Chuya depression of Gornyi Altai, Mukhor-Tarkhata, non-stationary electromagnetic sounding, geoelectric models, earthquake-prone region, three-dimensional mathematical modeling.

DOI 10.20403/2078-0575-2021-2-67-73

На территории Горного Алтая проводятся регулярные наблюдения электромагнитными методами на нескольких участках эпицентральной зоны катастрофического Чуйского землетрясения 2003 г. ($M = 7,3$) [13]. Работы были начаты в 2004 г. и продолжаются в настоящее время. Для интерпретации и анализа данных мониторинга необходимы детальные сведения о геоэлектрическом строении, поэтому для его уточнения каждый полевой сезон выполняются новые измерения методами электроразведки.

Участок данного исследования – Мухор-Тархата, расположенный в эпицентральной зоне, на-

ходится в центральной части Чуйской впадины в районе одноименного поселка (рис. 1). Здесь развернуты экспериментальные регулярные наблюдения комплексом методов нестационарного электромагнитного зондирования с гальваническим и индуктивным источниками, а также выполняются площадные измерения, направленные на определение глубинного строения.

Для Чуйской впадины в целом характерна сложная система разломов, заложенных еще в палеозое и активизирующихся в результате воздействия сейсмических событий [2, 13]. Одним из по-



Рис. 1. Обзорная карта Чуйской впадины

следствий разрушительного Чуйского землетрясения являются зоны трещиноватости, выраженные на поверхности. В районе пос. Мухор-Тархата также наблюдаются многочисленные деформации земной поверхности и хозяйственных объектов [3]. Выделенная на участке по геологическим и электромагнитным данным разломная зона с субвертикальной трещиноватостью была активизирована после землетрясения, что подтверждается данными электромагнитного мониторинга [11].

Цель представленной работы заключалась в уточнении геоэлектрической модели разломной зоны на участке Мухор-Тархата с помощью численного трехмерного моделирования. Изначально присутствие разлома было обосновано комплексом уникальных данных. На основе анализа цифровой модели рельефа по данным радарной съемки (SRTM) и космоснимков LANDSAT известный геолог д. г.-м. н. И. Д. Зольников разделил территорию Чуйской впадины на несколько крупных геоморфологических сегментов и установил: граница между двумя из них простиранием с юга на север проходит непосредственно через участок Мухор-Тархата примерно по течению р. Мухор, что свидетельствует о наличии разломной структуры [4].

Система измерений и интерпретация электромагнитных данных

Для построения геоэлектрической модели разломной структуры на участке Мухор-Тархата были привлечены все имеющиеся полевые данные. Система наблюдений начала формироваться с 2007 г. Вначале были поставлены пункты электромагнитного мониторинга, измерения в которых регулярно повторяются. Эти измерения выполняются тремя модификациями электромагнитных зондирований становлением поля (ЗСБ) с установками Q , q (соосные петли) со стороны генераторного контура (Q) 200 м, приемного (q) 100 м; установкой АВ– q с приемным одновитковым контуром квадратной формы со стороной 200 м; установкой АВ–MN с заземленной приемной линией MN 200 м, длиной линии АВ 910 м. Использование трех модификаций ЗСБ позволяет получить более

полную информацию об электрофизических параметрах разреза.

В последующие годы к имеющимся регулярным пунктам последовательно были добавлены четырнадцать зондирований соосными петлями для получения относительно равномерной сети. Все дополнительные измерения реализованы с установкой Q , q . Размеры установки такие же, как для регулярных наблюдений [6, 11]. На рис. 2 показана система электромагнитных измерений на участке исследования.

Первый этап интерпретации полевых данных ЗСБ с индуктивными и комбинированными установками (Q , q и АВ– q) выполняется с использованием интерактивных комплексов ЭРА, EMS [9]. Данные с заземленными установками АВ–MN обработаны с помощью программных средств Rubai [5]. Во всех трех комплексах используется горизонтально-слоистая модель среды и несколько способов визуализации. В результате интерпретации всего объема электромагнитных данных с помощью этих программных средств были построены разрезы, карты распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) и трехмерные модели участка [6]. В полученных объемных моделях разломная зона хорошо выделяется в подошве осадочных слоев, а также в рельефе фундамента цепочкой погруженных блоков практически в центральной части участка простиранием с юга на север [11, 13].

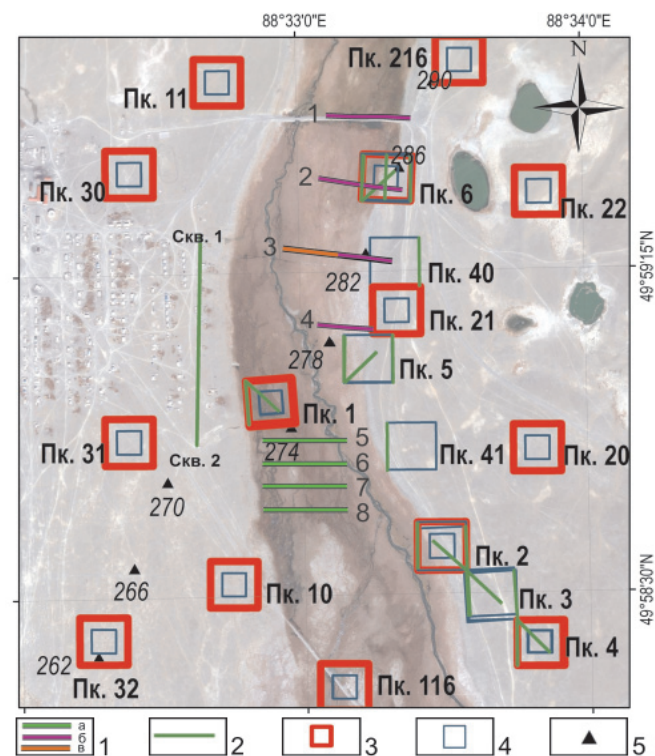


Рис. 2. Система измерений электромагнитными методами на участке Мухор-Тархата в Чуйской впадине (на подложке Google Earths)

1 – профили ЭТ (а – 2016 г., б – 2015 г., в – 2014 г.); 2 – линия АВ и приемные линии MN; 3 – генераторные контуры ЗСБ; 4 – приемные петли ЗСБ; 5 – архивные пункты ЗСБ

Внутренняя структура разломной зоны сложная, так как в нее входят блоки разных размеров, которые перемещались относительно друг друга по локальным сейсмодислокациям с разным сдвигом по сместителям. Границы разломной структуры можно выделить по самым значительным амплитудам вертикальных перемещений отдельных блоков.

На втором этапе интерпретации для верификации и уточнении результатов, полученных с горизонтально-слоистой моделью было решено выполнить численное трехмерное моделирование. Для начала была выбрана южная часть участка. В базовую стартовую несколько упрощенную геоэлектрическую модель было включено восемь блоков. Поверхность опорного горизонта стартовой модели наглядно иллюстрирует особенности строения и существенно разные перепады высот между разломными блоками (рис. 3).

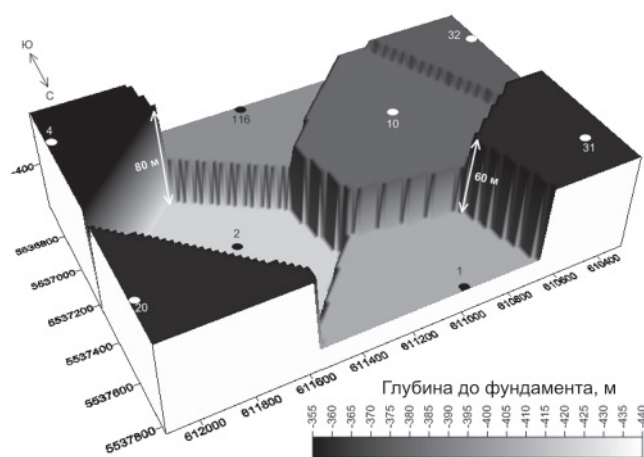


Рис. 3. Поверхность опорного горизонта стартовой модели, построенная по результатам инверсии с использованием горизонтально-слоистой среды

Моделирование сигналов ЭДС в приемных петлях ЗСБ выполнено Н. В. Штабель (ИНГГ СО РАН) с использованием программы ImpSound3D.

Математическая постановка трехмерного моделирования

В программе реализована следующая вычислительная схема. Электрическое поле, возбуждаемое в среде, описывается волновым уравнением второго порядка

$$\text{rot} \mu^{-1} \text{rot} E + \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial t}$$

с начальными и граничными условиями

$$E|_{t=t_0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{t=t_1} = E_1, \quad E \times n|_{\partial \Omega} = 0,$$

где E – напряженность электрического поля (В/м); J – плотность электрического тока (А/м); σ – электропроводность (См/м); μ – магнитная проницаемость (Гн/м); ε – электрическая проницаемость (Ф/м).

Для численного моделирования электрического поля использован векторный метод конечных элементов. Вариационная формулировка в форме Галеркина для волнового уравнения имеет следующий вид.

Для заданного $J \in C^1(0, T; L^2(\text{rot}, \Omega))$ найти $E \in C^2(0, T; H_0(\text{rot}, \Omega))$ такое, что для $\forall W \in H_0(\text{rot}, \Omega)$ выполняется для всех t :

$$(\text{rot} \mu^{-1} \text{rot} E, W) + \left(\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, W \right) + \left(\sigma \frac{\partial E}{\partial t}, W \right) = - \left(\frac{\partial J}{\partial t}, W \right).$$

Дискретизация вариационной постановки в пространстве роторно свободных функций $H_0(\text{rot}, \Omega)$ проводилась на ребрах тетраэдральной сетки с помощью функций Неделека первого порядка $N_i = \lambda_i \nabla \lambda_j - \nabla \lambda_i \lambda_j$ [9, 10]. Для аппроксимации по времени использовалась трехслойная неявная схема [7, 8]. С учетом представления решения в виде разложения по базису и временной схемы постановка может быть представлена в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left(A + \frac{C^\sigma}{\Delta t} + \frac{C^\varepsilon}{\Delta t^2} \right) e^{n+1} = \frac{C^\sigma}{\Delta t} e^n + 2 \frac{C^\varepsilon}{\Delta t^2} e^n - \frac{C^\varepsilon}{\Delta t^2} e^{n-1} - \frac{1}{\Delta t} (J^{n+1} - J^n),$$

где $[A]_{i,j} = \int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot} N_i \cdot \text{rot} N_j \partial \Omega$;

$$[C^\sigma]_{i,j} = \int_{\Omega} \sigma N_i \cdot N_j \partial \Omega;$$

$$[C^\varepsilon]_{i,j} = \int_{\Omega} \varepsilon N_i \cdot N_j \partial \Omega;$$

$i, j = 1, N_e$.

Поскольку кривые ЭДС, измеренные в процессе становления поля, имеют достаточную протяженность во времени, то при моделировании возникает необходимость в модификации временной схемы для увеличения размера шага по времени в процессе решения задачи. Схемы с геометриче-

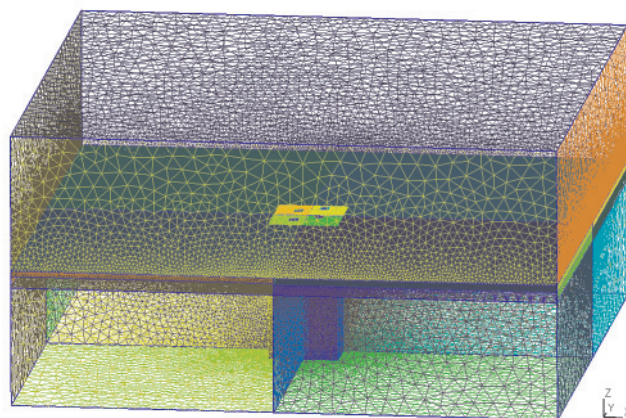


Рис. 4. Тетраэдральное разбиение области трехмерного моделирования при расчетах моделей участка Мухор-Тархата (Горный Алтай)

ски увеличивающимся шагом по времени приводят к накоплению погрешности на поздних временах. В работе использована схема постепенного равномерного увеличения размера шага по времени через фиксированное число итераций. Такой подход позволяет сократить число выполняемых итераций по времени, сохранить точность решения на всем диапазоне времен моделирования [14, 15]. Тетраэдральное разбиение области трехмерного моделирования при расчетах одной из моделей впадин Горного Алтая показано на рис. 4.

Обсуждение результатов трехмерного моделирования

Конкретными задачами 3D моделирования были заверка блокового строения участка с оценкой вертикальных сдвигов отдельных блоков и верификация границ разломной зоны.

В ходе расчетов опробованы несколько вариантов трехмерных моделей, построенных с использова-

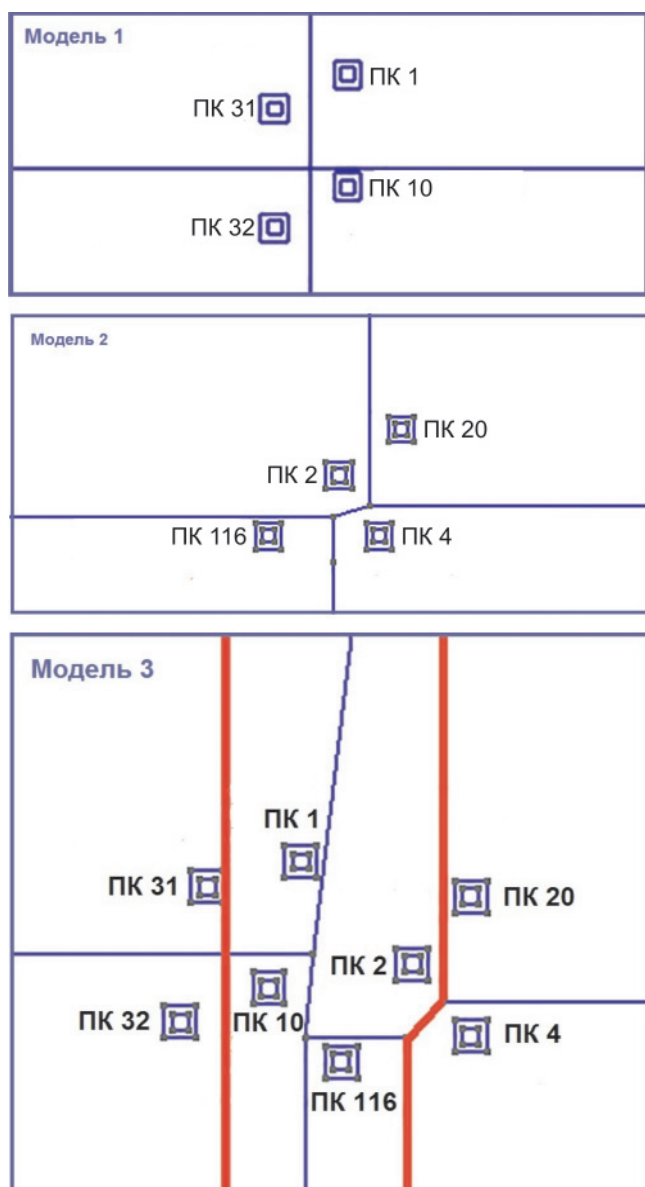


Рис. 5. Разбиение области трехмерного моделирования на блоки для трех моделей

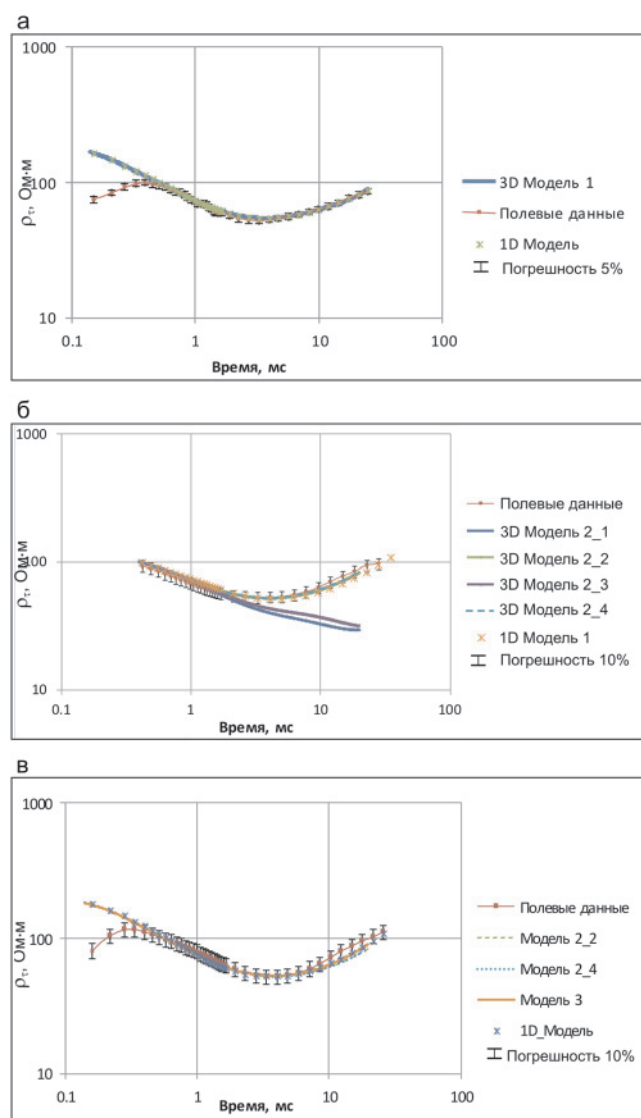


Рис. 6. Сопоставление полевых данных с теоретическими кривыми: а – для ЗСБ 31 (модель 1); б – для четырех вариантов модели 2, на примере ЗСБ 2; в – ЗСБ 4 по результатам моделирования (модель 3)

нием результатов интерпретации в рамках горизонтально-слоистой среды. Все они фактически являются фрагментами, сформированными на основе стартовой блоковой модели, представленной на рис. 3.

Моделирование выполнено с последовательным усложнением расчетной модели. Первые две более простые модели были составлены из четырех блоков, а третья модель содержала восемь. Конфигурация всех трех моделей в плане в области моделирования показаны на рис. 5.

Рассмотрим ситуацию подробнее. Для первого расчета была выбрана модель 1, включающая блоки с пунктами ЗСБ 1, 10, 31, 32, расположенными в западной части разломной зоны (см. рис. 5). В этом случае проверялся сдвиг блока (ЗСБ 31) относительно блока (ЗСБ 1) по сместителю размером 60 м (см. рис. 3). В результате выполненных расчетов для модели 1 были сопоставлены теоретические и полевые кривые. В качестве примера на рис. 6, а представлены теоретические (1D и 3D) и полевая кривые

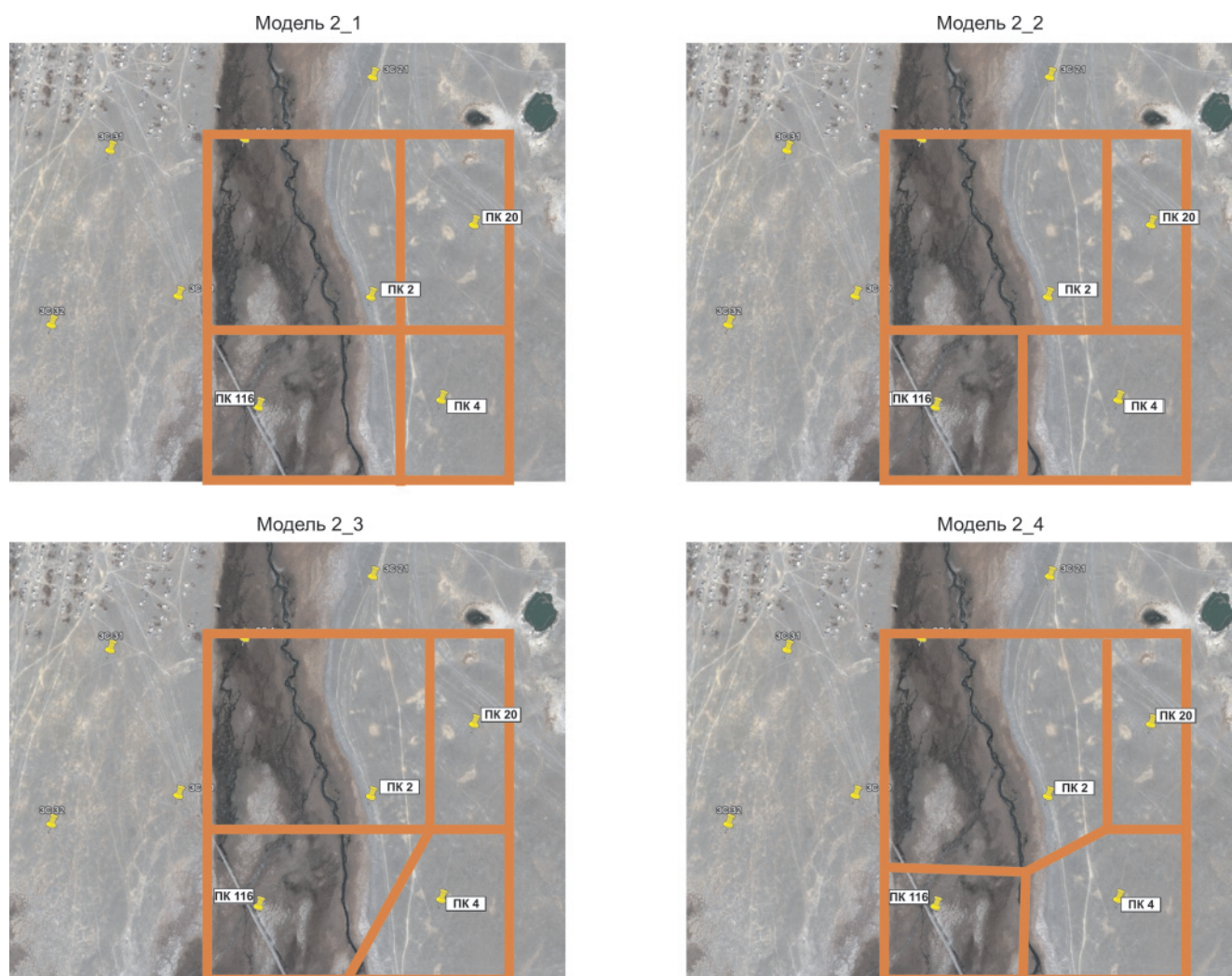


Рис. 7. Варианты разбиения на блоки модели 2 для трехмерных расчетов (на подложке Google Earth)

ЗСБ для пункта 31. Расхождение между полевой и теоретической кривыми получено в пределах 5 %, без учета самых ранних времен, где наблюдается искажение полевых данных, типичное для этого интервала времен, что связано с аппаратными помехами. Можно сделать вывод: для западной части разлома строение соответствует результатам интерпретации с использованием горизонтально-слоистой модели.

Для следующего расчета была взята модель участка из четырех блоков с пунктами ЗСБ 2, 4, 20, 116, где сдвиг по сместителю между блоками ЗСБ 4 и ЗСБ 2 достигает 80 м (модель 2 на рис. 5). Модель 2 отражает строение восточного борта разломной зоны. С востока разлом оконтуривают приподнятые относительно его западного ограничения блоки горных пород, выделенные по данным ЗСБ 20 и ЗСБ 4. Для этой модели выполнены четыре расчета, с изменением конфигурации блоков с пунктами ЗСБ 2 и ЗСБ 4. Таким образом, фактически изменялись геометрические размеры этих двух блоков и уточнялось положение восточной границы разлома. На рис. 7 приведены варианты разбиения на блоки модели 2, для которых выполнено моделирование. Сопоставление полученных расчетов представлено на рис. 6, б: показаны полевые данные и результаты

3D моделирования для четырех вариантов модели 2 на примере ЗСБ 2. Анализ показал, что наиболее приемлемые результаты получены при рассмотрении вариантов трехмерных моделей 2_2 и 2_4; расхождение теоретических и полевых кривых для них составляет менее 10 %.

На третьем этапе моделирования модель 1 и лучший вариант модели 2 были объединены в одну (модель 3). Для нее окончательно верифицировалось положение восточной границы разломной зоны (см. рис. 6, в).

Оптимальная модель была выбрана по результатам сопоставления и анализа полевых и модельных данных. Расчеты для наиболее сложной модели 3 согласуются с полевыми данными, расхождение между кривыми не превышает 12 %. Считаем, что для сложной разломной структуры участка Мухор-Тархата это неплохой результат.

Выводы

Современное развитие способов интерпретации электромагнитных методов заключается в повышении достоверности и информативности результатов. Основные трудности интерпретации полевых данных, полученных в сейсмоактивных районах,

связаны с особенностями строения участков исследования. Все межгорные впадины Горного Алтая выполнены мощной толщей осадочных отложений, образовавшихся в озерных, а затем континентальных условиях [2]. Последующие тектонические движения сформировали блоковое строение осадочной толщи и фундамента. В настоящее время во впадинах присутствуют участки как с горизонтально-слоистым залеганием горных пород, так и пересеченные разломами, для которых строение значительно усложняется. В связи с этим в ходе интерпретации данных для обоснования глубинных геоэлектрических моделей с присутствием разломов и получения реалистичных результатов необходимо привлекать двумерные и трехмерные программные средства.

Для участка Мухор-Тархата в Чуйской впадине по данным ЗСБ вначале была построена его глубинная блоковая модель на основе 1D интерпретации полевых данных. Далее с помощью численного трехмерного моделирования было уточнено строение этой очень сложной активной разломной структуры, перекрытой сверху современными осадками. Наличие разлома было обосновано ранее по комплексу геологических и электромагнитных данных. По итогам 3D моделирования подтверждено блоковое строение и уточнена конфигурация восточной границы разломной зоны, а также верифицированы размеры сдвигов по межблоковым сместителям.

Полученные результаты необходимы для интерпретации и анализа данных электромагнитного мониторинга за изменением геоэлектрических параметров под воздействием геодинамических процессов в районе Горного Алтая. Они важны для разработки прогнозных критериев сейсмических активизаций для разных сейсмоактивных регионов [1] и, кроме того, могут быть интересны для специалистов по структурной геологии, геотектонике, геодинамике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН № 0331-2019-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баталева Е. А., Баталев В. Ю., Рыбин А. К. Взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального Тянь-Шаня // Литосфера. – 2015. – № 5. – С. 81–89.
2. Девяткин Е. В. Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология, корреляция). – М.: Наука, 1981. – 196 с.
3. Достовалова М. С. Развитие сейсмодислокаций в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения 2003 г. // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Матер. науч.-практ. конф. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2004. – 182 с.
4. Зольников И. Д. Роль оледенений и гляциальных суперпаводков в геологическом строении осадочных комплексов верхней половины неоплейстоцена Горного Алтая и Приалтайской равнины: автореф. дис. ... д. г.-м. н. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. – 32 с.

5. Неvedрова Н. Н., Дашевский О. Ю. Программно-алгоритмические средства интерпретации данных гальванических и индукционных электромагнитных зондирований в анизотропных моделях сред // Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре верхней мантии Земли. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – С. 271–277.

6. Неvedрова Н. Н., Шалагинов А. Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31–40.

7. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

8. Санчаа А. М., Неvedрова Н. Н., Штабель Н. В. Трехмерное моделирование разломных структур в Чуйской впадине по данным метода становления электромагнитного поля // Марчукские научные чтения – 2018: тез. Междунар. конф. «Вычислительная математика и математическая геофизика», посвящ. 90-летию со дня рождения акад. А. С. Алексеева. – Новосибирск, 2018. – С. 106–107.

9. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS / О. Г. Хабинов, И. А. Чалов, А. А. Власов, Е. Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009. – Новосибирск, 2009. – С. 108–113.

10. Трехмерное моделирование импульсных зондирований с использованием быстрого преобразования Фурье / М. И. Эпов, Э. П. Шурина, Е. П. Штабель, Н. В. Штабель // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 2. – С. 411–420.

11. Шалагинов А. Е., Неvedрова Н. Н., Шапаренко И. О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Geodynamics and Tectonophysics – Геодинамика и тектонофизика: электронный журнал. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 93–107.

12. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan belts in Central Asia / D. Delvaux, S. Cloetingh, F. Beekman, et al. // Tectonophysics. – 2013. – Vol. 602. – P. 194–222.

13. Electromagnetic monitoring in the region of seismic activation (on the Gorny Altai (Russia) example) / N. N. Nevedrova, A. M. Sanchaa, A. E. Shalaginov, S. M. Babushkin // Geodesy and Geodynamics. – 2019. – Vol. 10, no. 6. – P. 460–470.

14. Nedelec J. C. A New Family of Mixed Finite Elements in R3 // Numerische Mathematik. – 1986. – Vol. 50. – P. 57–81.

15. Nedelec J. C. Mixed Finite Elements in R3 // Numerische Mathematik. – 1980. – Vol. 35, no. 3. – P. 315–341.

REFERENCES

1. Bataleva E.A., Batalev V.Yu., Rybin A.K. [Interpretation of conductivity, seismic velocities and



the seismicity for Central Tien Shan lithosphere]. *Litosfera – Lithosphere*, 2015, no. 5, pp. 81–89. (In Russ.).

2. Devyatkin E.V. *Kainozoy vnutrenney Azii (stratigrafiya, geokhronologiya, korrelyatsiya)* [Cenozoic of Inner Asia (stratigraphy, geochronology, correlation)]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 196 p. (In Russ.).

3. Dostovalova M.S. [Development of seismodislocation in the epicentral zone of the 2003 Altai earthquake]. *Altaiskoe (Chuyskoe) zemletryasenie: prognozy, kharakteristiki, posledstviya: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Altai (Chuya) Earthquake: forecasts, characteristics, consequences: Proc. of scientific and pract. conf.]. Gorno-Altai, RIO GAGU Publ., 2004, pp. 92–101. (In Russ.).

4. Zolnikov I.D. *Rol oledeneniya i glyatsialnykh superpavodkov v geologicheskoy stroenii osadochnykh kompleksov verkhney poloviny neopleystotsena Gornogo Altaia i Prialtayskoy ravniny. Avtoref. dokt. dis.* [Role of glaciations and torrential superfloods in geological structure of sedimentary complexes of the Upper half of the Neopleistocene of Gorny Altai and Near-Altai Plain. Author's abstract of DSc thesis]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2010. 32 p. (In Russ.).

5. Nevedrova N.N., Dashevskiy O.Yu. [Software tool for interpreting data of galvanic and induction electromagnetic soundings in anisotropic models of media] *Metody resheniya pryamykh i obratnykh zadach seismologii, elektromagnetizma i eksperimentalnyye issledovaniya v problemakh izucheniya geodinamicheskikh protsessov v kore verkhnei mantii Zemli* [Methods for direct and inverse problems of seismology, electromagnetism, and experimental investigations in problems of studying geodynamic processes in the Earth's crust and upper mantle]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010, pp. 271–277. (In Russ.).

6. Nevedrova N.N., Shalaginov A.E. [Monitoring of electromagnetic parameters in the seismic activity zone of Gorny Altai]. *Geofizika – Russian Geophysics*, 2015, no. 1, pp. 31–40. (In Russ.).

7. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 656 p. (In Russ.).

8. Sanchaa A.M. [Three-dimensional modeling of fault structures in the Chuya depression using the data of transient electromagnetic method]. *Marchukovskiy nauchnyye chteniya-2018: Tezisy Mezhdunarodnoy konferentsii "Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya geofizika"* [Marchuk Scientific Readings-2018: "Computational mathematics and mathematical geophysics in honor of academician A.Alekseev's 90th birthday]. Novosibirsk, 2018, pp. 106–107. (In Russ.).

9. Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. [EMS transient sounding data interpretation system]. *GEO-Sibir-2009* [GEO-Sibir-2009]. Novosibirsk, 2009, pp. 108–113. (In Russ.).

10. Epov M.I., Shurina E.P., Shtabel E.P., Shtabel N.V. [Three-dimensional modeling of pulsed soundings using a fast Fourier transform]. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 329–336.

11. Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O. [Variations in electrophysical parameters estimated from electromagnetic monitoring data as an indicator of fault activity] *Geodinamika i tektonofizika – Geodynamics and Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 93–107. (In Russ.).

12. Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., et al. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan belts in Central Asia. *Tectonophysics*, 2013, vol. 602, pp. 194–222.

13. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shalaginov A.E., Babushkin S.M. Electromagnetic monitoring in the region of seismic activation (on the Gorny Altai (Russia) example). *Geodesy and Geodynamics*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 460–470.

14. Nedelec J.C. A New Family of Mixed Finite Elements in R3. *Numerische Mathematik*, 1986, vol. 50, pp. 57–81.

15. Nedelec J.C. Mixed Finite Elements in R3. *Numerische Mathematik*, 1980, vol. 35, no. 3, pp. 315–341.

© А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, Н. В. Штабель, 2021