

*В. А. Носков<sup>1</sup>, Н. Н. Неведрова<sup>2</sup>*

## **Геоэлектрическое строение долины реки Чаган (Чуйская впадина, Горный Алтай) по данным одномерной инверсии и трехмерного моделирования зондирований становлением поля**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация!

e-mail: v.noskov@g.nsu.ru

**Аннотация.** Начиная с 2004 сотрудниками ИНГГ СО РАН ежегодно проводятся мониторинговые измерения в долине р. Чаган. Основной объём данных получен методами постоянного тока (ВЭЗ и ЭТ). При этом не все данные ВЭЗ позволяют получить глубины до опорного горизонта. Поэтому за последние 3 года были выполнены дополнительные измерения с целью уточнения глубинного строения данной области с использованием метода зондирований становлением поля (ЗСБ). В статье представлены результаты одномерной инверсии и трехмерного моделирования данных ЗСБ. По полученным данным построена карта глубин до фундамента и уточнены параметры разломной зоны в юго-западной части долины.

**Ключевые слова:** геоэлектрическое строение, нестационарное электромагнитное зондирование, трехмерное математическое моделирование

*V. A. Noskov<sup>1</sup>, N. N. Nevedrova<sup>2</sup>*

## **Goelectric structure of the Chagan River valley (Chui Depression, Gorny Altai) according to one-dimensional inversion and three-dimensional modeling of TEM soundings**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation!

e-mail: v.noskov@g.nsu.ru

**Abstract.** Since 2004, annual monitoring measurements have been conducted by employees of the Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (INGG SB RAS) in the Chagan River valley. The primary dataset is obtained using direct current methods (Vertical electrical soundings and electrical resistivity tomography). However, not all VES curves allow for depth determination to the reference horizon. Therefore, additional measurements have been carried out over the past three years to refine the deep structure of this area using the transient electromagnetic sounding (TEM) method. This article presents the results of one-dimensional inversion and three-dimensional modeling of TEM data. Based on the obtained data, a map of depths to the basement has been constructed, and parameters of the fault zone in the southwest part of the valley have been refined/!

**Keywords:** goelectric structure, nonstationary electromagnetic soundings, three-dimensional mathematical modeling

## ***Введение***

Ежегодно на территории Горного Алтая проводятся измерения с использованием методов электроразведки. Основная часть участков исследований приурочена к эпицентральной зоне катастрофического Чуйского землетрясения 2003 года (магнитуда 7,3). Одним из таких участков является долина реки Чаган, расположенная в юго-западной части Чуйской впадины [5]. Именно здесь наблюдались наиболее интенсивные колебания земной поверхности во время землетрясения. Характер разломов на поверхности, а также анализ поля тектонических напряжений на основе данных о механизмах афтершоков, указывает на сложное разломно-блоковое строение этой области. С 2004 года на данной территории была развернута система наблюдений методом ВЭЗ, построены геоэлектрические разрезы, выделены разломные структуры, а также проводится мониторинг геоэлектрических параметров, включая коэффициент анизотропии при помощи круговых и крестовых ВЭЗ [2, 5]. Для учета приповерхностных неоднородностей в данной области были проведены измерения методом ЭТ. Однако значительная часть кривых ВЭЗ не позволяет определить глубину до кровли фундамента из-за большой погрешности измерений в области больших разносов. Поэтому, начиная с 2020 года, для уточнения глубинного строения данной территории были дополнительно проведены измерения методом ЗСБ.

### ***Методика измерений и обработки данных***

В ходе полевых работ измерения методом ЗСБ выполнялись индукционной установкой (Q-q) со стороны генераторного контура в 200 м и измерительного в 100 м. Только в северо-западной части долины в связи с размещением пункта 239 близко к западному борту впадины использованы петли меньшего размера, стороны генераторной петли были уменьшены до 100 м, а приемной – до 50 м. На рис. 1 представлена схема наблюдений методом ЗСБ. Пункты измерений расположены вдоль трех профилей, пересекающих долину с юго-запада на северо-восток. В южной части долины плотность сети измерений выше, из-за наиболее сложного строения этой области. В центральной части, на правом берегу реки Чаган, из-за активного таяния многолетней мерзлоты образовался сложный заболоченный участок. Поэтому провести здесь измерения за указанный период не представлялось возможным.

На первом этапе интерпретации привлечена программа ZondTEM1D с использованием горизонтально-слоистой модели. В результате были построены геоэлектрические разрезы, отражающие строение долины (рис. 2). По всем данным ЗСБ получены глубины до кровли фундамента с погружением его кровли с юго-запада на северо-восток. Были выделены основные геоэлектрические горизонты. На разрезах по значениям УЭС четко прослеживается разломная зона в юго-западной части участка (пикеты 223 и 224).

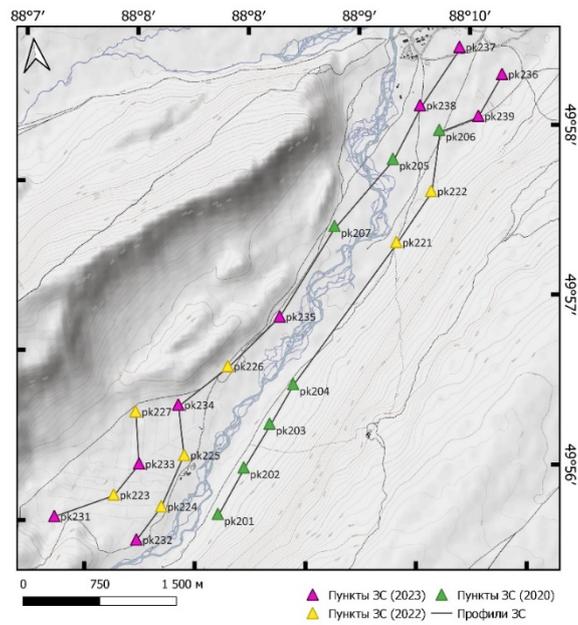


Рис. 1. Схема наблюдений методом ЗСБ в долине р. Чаган

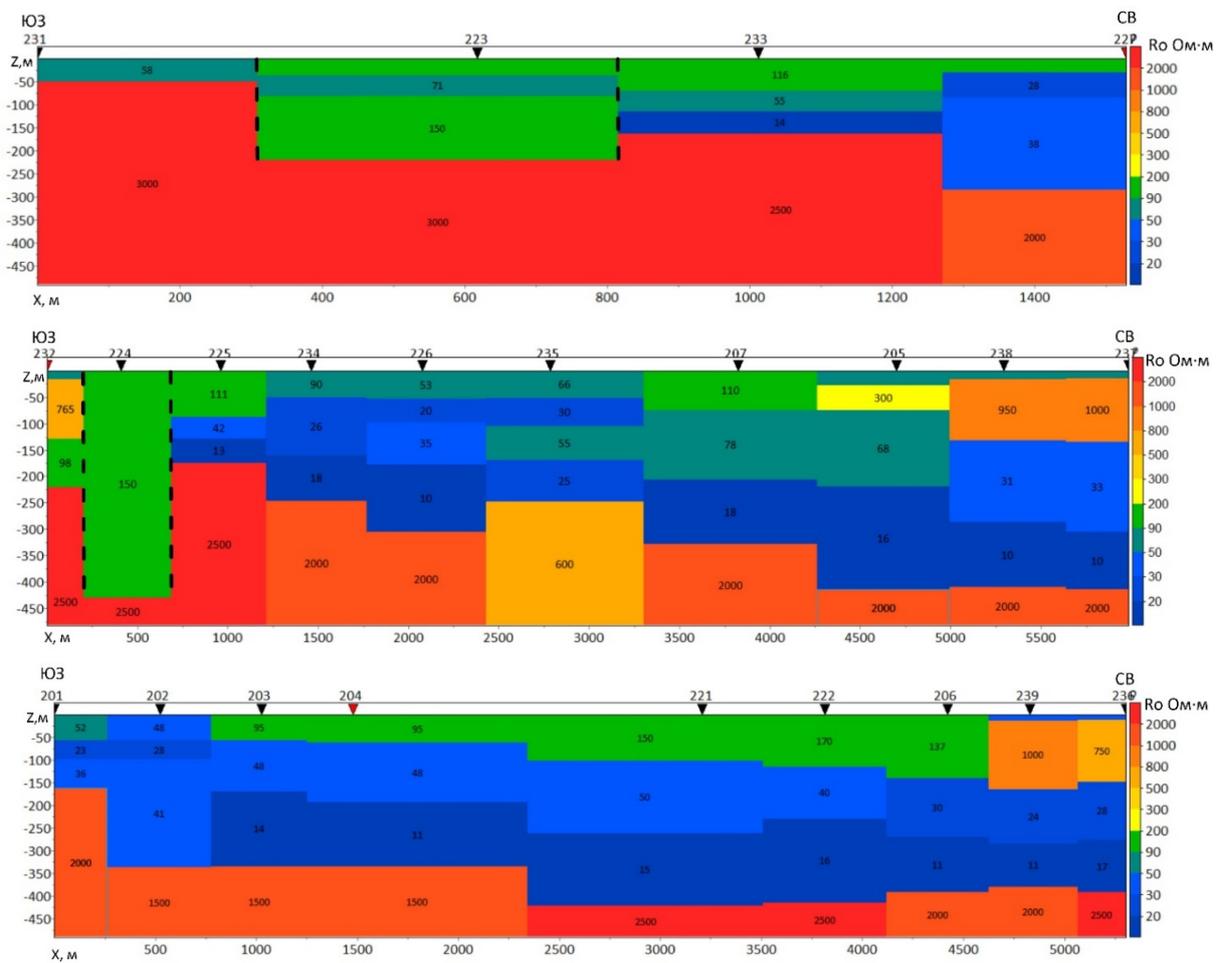


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы по профилям наблюдений. Пунктиром выделена предполагаемая разломная зона

В основном, по данным метода ЗСБ получена четырехслойная модель. Первый верхний неоднородный слой с УЭС в интервале 48 – 180 Ом×м представлен аллювиальными и флювиогляциальными отложениями. Ниже выделяются два более однородных низкоомных слоя. Значения УЭС первого из них варьируются в интервале 26-78 Ом×м, второго – от 10 до 44 Ом×м. Эти слои соотносятся с неогеновыми песчано-глинистыми отложениями озерного происхождения. Различия в их сопротивлениях обусловлены разными этапами и условиями их осадконакопления. Ниже на глубинах от 50 м в юго-западной части и до 430 м в северо-восточной, расположена кровля опорного горизонта (палеозойский фундамент). В северо-восточной части долины (пикеты 239, 236, 238 и 237), в верхней части разреза выявлена область с повышенными УЭС до 1400 Ом×м, которую можно отнести к многолетней мерзлоте.

На следующем этапе интерпретации, для заверки глубинного строения и более точного позиционирования выделенных на первом этапе блоков, было проведено трехмерное моделирование с использованием программы Impsound fast [1]. В статье в качестве примера представлен результат по юго-западной части долины. Для первой итерации были выбраны самые южные пикеты – 231, 232, 223, 224, 233. В области каждого пикета задавалась модель, полученная в результате одномерной интерпретации. Разбиение на блоки проводилось с учетом геоэлектрического строения и априорной геологической информации. На рис. 3 представлен пример стартовой модели и заданная тетраэдральная сетка. Разуплотнение сети в нижней части модели обусловлено более однородным строением. В верхней части разрезов мощности пластов меньше, чем в нижней, поэтому задается более мелкое разбиение на тетраэдры. Построение блоковой модели, а также генерация сетки выполнялись при помощи программы GMSH.

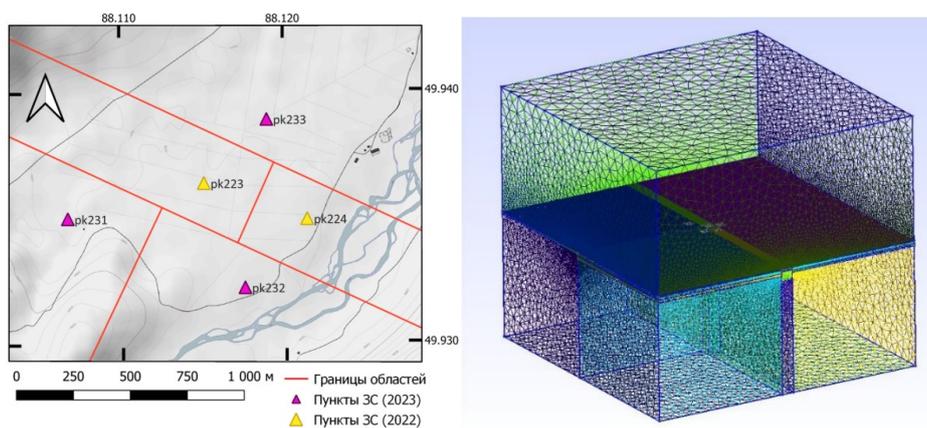


Рис. 3. Стартовая модель юго-западной части долины Чаган и тетраэдральное разбиение

Далее моделирование выполнялось последовательным усложнением модели. На второй итерации были откорректированы границы между блоками и добавлены дополнительные данные пикетов 225 и 201. В непосредственной близости

сти от пикетов 231 и 232 наблюдаются выходы коренных пород на дневную поверхность, что может существенно исказить сигнал ЗСБ, что учитывалось в следующей модели.

В третьей модели были добавлены данные пикетов 234 и 202, и вновь откорректированы границы блоков. На рис. 4 представлено разбиение на блоки для моделей 2 и 3.

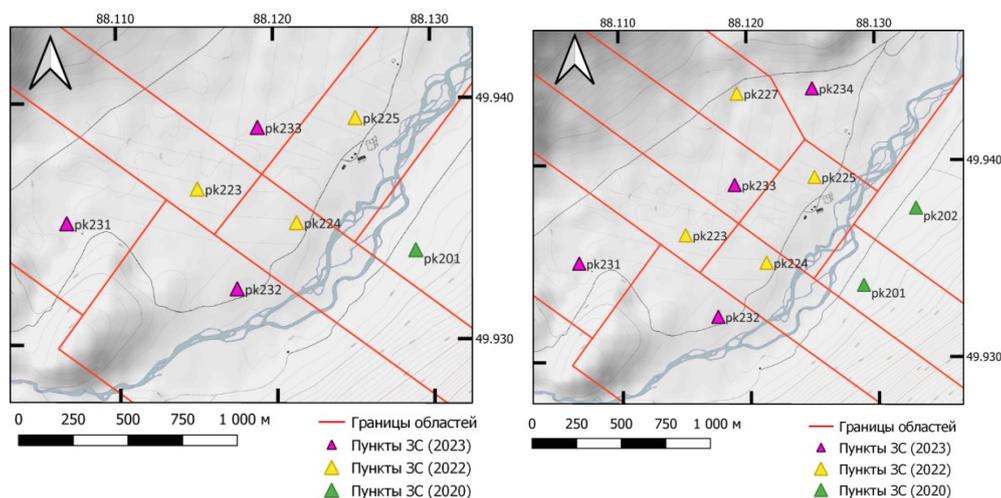
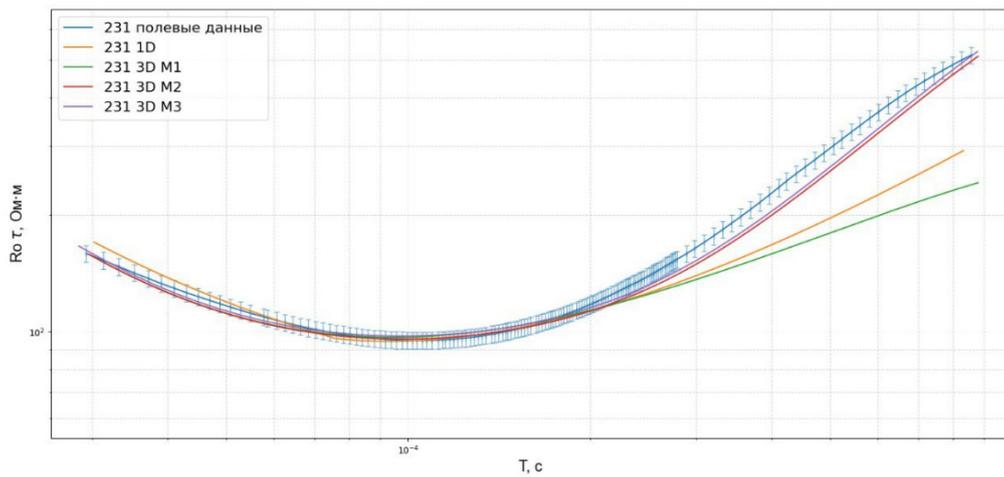
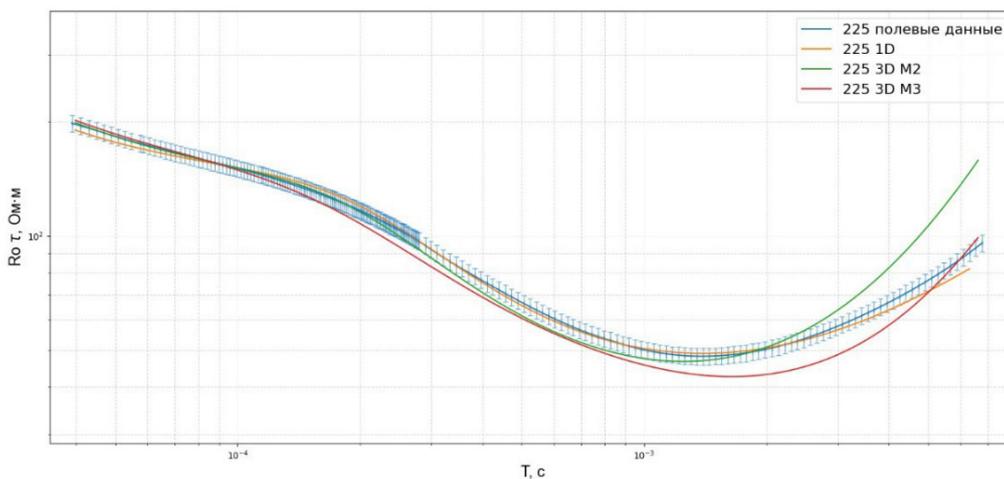


Рис. 4. Разбиение на блоки для 2 и 3 модели

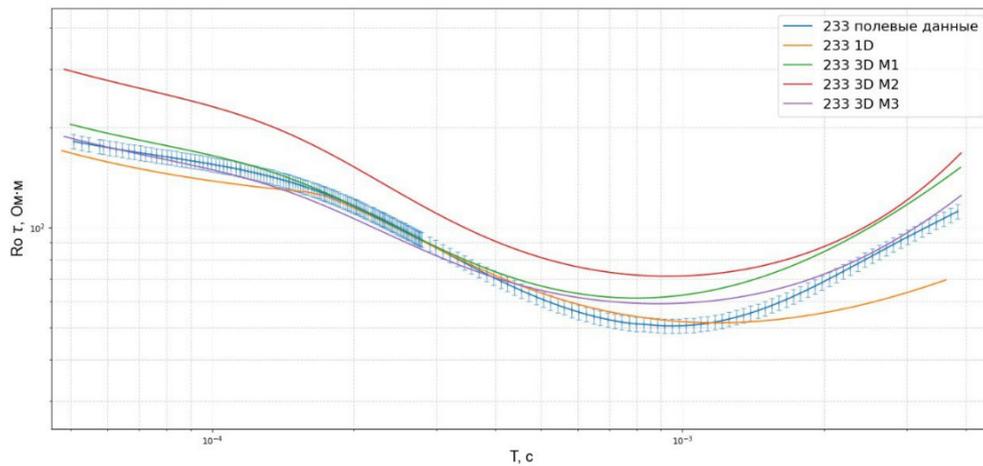
На каждом этапе моделирования сопоставлялись полевые кривые с кривыми 1D и 3D моделирования. На рис. 5 представлен пример такого сопоставления. Для пункта 231 получен самый лучший результат – значение невязки менее 6%, что обусловлено оптимальной конфигурацией блоков. Как видно из рис. 5а, кривая на поздних временах подобрана с большей погрешностью. На 2 и 3 итерации моделирования в соответствии с данными о рельефе были добавлены блоки выходов фундамента на поверхность и изменялись конфигурации границ блоков, что явным образом повлияло на позднюю стадию становления. Границы отодвигались не более чем на 50 м от первоначального положения, но даже такие незначительные изменения сильно влияют на синтетические сигналы становления. Усложнение модели достигалось также за счет добавления дополнительных пунктов. На первой итерации после их добавления результат за частую оказывался неудовлетворительным – с большими значениями невязок, но при добавлении новых блоков, невязки уменьшались. Этот пример хорошо иллюстрируется по данным пикетов 233 и 225. Во второй модели значение невязки для пункта 233 является наибольшим, но при добавлении новых блоков (227, 234 и 202) и ограничении блока с пикетом 225, результат становится удовлетворительным. Для всех кривых в третьей модели получены значения невязок не более 15%, что для данной территории считается удовлетворительным. По результаты моделирования получено более сложное блоковое строение юго-западной части долины.



а



б



в

Рис. 5. Пример сопоставления модельных и полевых данных: а – пикет 231; б – пикет 225; в – пикет 233

В итоге с учетом 3D моделирования построена карта глубин до фундамента (рис. 6).

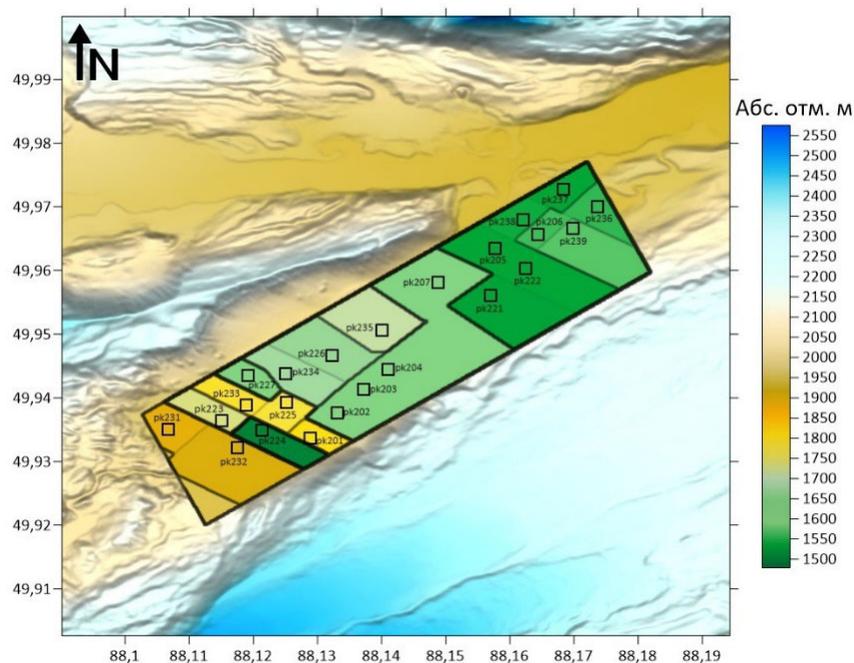


Рис. 6. Карта глубин до фундамента на основе моделирования

### *Заключение*

На основе анализа результатов трехмерного моделирования было уточнено разломно-блоковое геоэлектрическое строение долины реки Чаган. В юго-западной части по глубинам до кровли фундамента и значениям УЭС выявлена разломная зона в районе пунктов 224-223. Кроме того, достаточно резкий скачок в глубинах до кровли фундамента между пунктами 201-202, 225-234 и 233-227 может свидетельствовать о наличии здесь разрывных нарушений. Эти результаты необходимы для построения более точных моделей по данным ВЭЗ, особенно для пунктов, в которых проводятся регулярные наблюдения. Используя их далее можно построить трехмерную геоэлектрическую модель по комплексу данных электроразведки постоянным и переменным током.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0025 Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Штабель Н. В. Трехмерное моделирование разломных структур в Чуйской впадине по данным метода становления электромагнитного поля // Марчуковские научные чтения – 2018: тезисы междунар. конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика». – Новосибирск, 2018. – С. 106-107.
2. Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Штабель Н. В. Глубинное строение разломной зоны на участке Мухор-Тархата Чуйской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований с использованием трехмерного моделирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 2. – С. 67-73.

3. Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.
4. Неведрова Н. Н., Деев Е. В., Пономарев П. В. Блочное строение южной части Курайской впадины Горного Алтая по данным геоэлектрики в сопоставлении с распределением эпицентров землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – Т. 10. – № 1. – С. 167-180.
5. Неведрова Н. Н., Деев Е. В., Пономарев П. В. Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 1. – С. 146-156.

© В. А. Носков, Н. Н. Неведрова, 2024