

*А. Е. Шалагинов, Н. Н. Неведрова, И. О. Шапаренко, А. В. Мариненко*

## **Вариации удельного электрического сопротивления как результат проявления природно-техногенных геодинамических процессов в Горловской впадине Алтае-Саянской складчатой области по данным электротомографии**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: shalaginovae@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В последнее десятилетие существенно выросла интенсивность разработки Горловского угольного месторождения в Новосибирской области, что, скорее всего, и является одной из причин усиления сейсмической активности в Горловской впадине как ответ на техногенное воздействие. Начиная с 2019 года, в районе месторождения фиксируются землетрясения с магнитудой более 4, ощутимые в г. Новосибирске и его пригородах. В статье представлены первые результаты регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке сейсмической активизации в Горловском прогибе. Интерпретация полученных полевых данных выполнена с помощью модернизированного программного комплекса DiInSo. Выявлены вариации геоэлектрических параметров, которые отражают реакцию геологической среды не только на происходящие за период наблюдений землетрясения, но и на техногенные воздействия - взрывы в угольном карьере. Кроме того, показано, что величина вариаций зависит от магнитуды землетрясения.

**Ключевые слова:** электротомография, вариации геоэлектрических параметров, методика измерений, программные средства, инверсия

*A. E. Shalaginov, N. N. Nevedrova, I. O. Shaparenko, A. V. Marinenko*

## **Electrical resistivity variations as a result of natural-technogenic geodynamic processes in the Gorlovka depression of the Altai-Sayan folded region according to ERT data**

The Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\*e-mail: shalaginovae@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** In the last decade, the intensity of development of the Gorlovka coal deposit in Novosibirsk region has significantly increased, which leads to the formation of seismic activation of the subsoil of the Gorlovka depression in response to technogenic impact. Since 2019, earthquakes with a magnitude of more than 4 have been recorded in the field area, felt in Novosibirsk and its suburbs. The article presents the first results of regular observations using the electrical tomography method along a profile crossing the fault zone at the study site in the Gorlovka Trough, obtained by inverting field data using the modernized DiInSo software package. Variations in geoelectric parameters have been identified that reflect the response of the geological environment not only to earthquakes occurring during the observation period, but also to man-made impacts (explosions). In addition, it is shown that the magnitude of the variations depends on the magnitude of the earthquake.

**Keywords:** electrical tomography, geoelectrical parameters variation, measurement technique, software tools, inversion

### *Введение*

Горловский прогиб расположен на правом берегу р. Обь в юго-восточной части Новосибирской области Искитимском районе, в 100 км к югу от г. Новосибирска. Эта узкая впадина шириной всего от 2 до 15 км и длиной около 120 километров разделяет северо-западную часть Салаирского антиклинория и Колывань-Томскую складчатую зону. На территории впадины разведаны уникальные месторождения антрацита. Их промышленное освоение начато еще в 1930 г., вначале открытым способом и далее в 1980—1990 г. продолжается как в шахтах (Листвянское), так и на разрезах (Горловское, Ургунское). В настоящее время интенсивно разрабатываются Колыванское (Северный, Крутихинский, Восточный участки), Ургунское и Горловское месторождения [1, 2]. Уровень добычи постоянно растет.

Сейсмологами Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН в последние годы зафиксирован целый ряд землетрясений с магнитудами, достигающими 4 и более непосредственно на территории Горловской впадины. Значительное число эпицентров этих событий приурочены к районам интенсивной добычи угля открытым способом. По мнению сейсмологов, в последнее время повысилась наведенная сейсмичность данного региона, т.е. усиление сейсмической активности связано не только с природными, но и техногенными воздействиями. Большая часть гипоцентров происходящих землетрясений находится на глубинах менее 8 км с характерным механизмом (всброс) [3]. Учитывая возросший уровень сейсмичности и увеличивающиеся масштабы добычи угля в этом районе, нельзя исключить развитие сейсмического процесса до более существенных магнитуд. Нагрузки на вмещающую среду, обусловленные техногенным воздействием, не успевают перераспределяться в массиве горных пород, что способно существенно повысить сейсмичность этой территории [4].

Целью данной статьи является анализ результатов регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке сейсмической активизации в Горловском прогибе. В ходе исследований разрабатывается методика измерений и автоматизированные программные средства с использованием модернизированного программного комплекса моделирования и инверсии Direct-Inverse-Solver (DiInSo). Этот комплекс, предназначенный ранее для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач электротомографии, был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе теоретического анализа разных схем регуляризации [5].

Выбор участка исследования основывался на предшествующих результатах многолетних регулярных наблюдений в сейсмоактивной зоне Горного Алтая. Из анализа этих результатов следует, что именно в зонах влияния разломов по величине вариаций геоэлектрических параметров можно выделить активные и потенциально сейсмогенерирующие разломы, в области влияния которых может

произошло крупное землетрясение [6]. В Горловском прогибе по данным методов электроразведки был выбран участок с присутствием разломной структуры, обоснованной геологическими данными. Участок находится в районе п. Легостаево Искитимского района Новосибирской области в сейсмоактивной зоне Горловского прогиба, где в последние годы происходят сейсмические события с магнитудой 3-4 и более [7].

### *Геолого-геофизические данные*

Геологические данные и сведения о гидрогеологии используются в качестве априорных как на этапе полевых работ, так и в ходе интерпретации данных электроразведки, а также для верификации результатов. Горловский прогиб расположен между северо-западной окраиной Салаирского кряжа и Колывань-Томской складчатой зоной, длительное развитие которых оказало огромное влияние на его строение. По современным геологическим представлениям Горловский прогиб - узкая грабен-синклиналь, протянутая с северо-востока на юго-запад. Локальные складки вдоль простирающейся впадины часто являются запрокинутыми. В целом чередуются антиклинальные и синклинальные складки, осложненные складчатостью более мелких порядков с локальными разломами. Из-за расположенного здесь в раннем палеозое мелководного бассейна, на территории прогиба возникло большое количество органогенных осадочных пород, таких как известняки, каменный уголь [2].

В геологическом строении района принимают участие отложения верхнего девона, карбона и перми, перекрытые мощной корой выветривания мел-палеогенового возраста, а также рыхлыми неогеновыми и четвертичными отложениями. Средняя и нижняя части разреза представлены континентальными и морскими отложениями соответственно. Метаморфизм пермских углей достигает антрацитовой стадии. Горловский угольный бассейн характеризуется крупнейшими в России запасами антрацита. Максимальная угленосность в Горловском прогибе приурочена к отложениям ранней перми, которые специалистами-геологами сопоставляются с аналогичными породами Кузбасса [8].

Сопряжение Горловского прогиба с соседними региональными геологическими структурами происходит по крупным разломам. Он ограничен от Салаирского кряжа серией разломных нарушений (на разных его участках – Чемской, Доронинский и Томский разломы). От Колывань-Томской зоны он также отделен Подъяковский и Митрофановский разломами. По геологическим и геофизическим данным разрывные нарушения являются надвигами юго-восточной vergentности. Для горных пород Горловского прогиба характерно развитие напряженной линейной складчатости и интенсивного расщепления.

По гидрогеологическим характеристикам Горловская впадины относится к зоне сочленения Алтае-Саянской складчатой гидрогеологической области с Западно-Сибирским артезианским бассейном. На её территории выделяются два водоносных комплекса – зон трещиноватости домезозойских образований и мезозойско-кайнозойских отложений. В водоносных горизонтах трещиноватых зон метаморфизованных и дислоцированных домезозойских отложений разного со-

става и возраста наблюдаются напорные и слабонапорные воды. Они питаются как за счет вертикальной фильтрации, так и за счет подтока с юго-восточных соседних областей Салаирского кряжа. Второй комплекс связан в основном с покровным кайнозойским чехлом, мощность которого колеблется, достигая на отдельных участках 50 и 150 м, и объединяет грунтовые и слабонапорные воды преимущественно четвертичных отложений.

### *Геофизические данные, программные средства*

В результате анализа геоэлектрического строения Горловской впадины, полученного ранее комплексом методов наземной электроразведки в 2022 г. в начале полевого сезона 2023 г. выбран участок в районе п. Легостаево Искитимского района. На участке вначале были выполнены опытно-методические измерения методом электротомографии, целью которых являлся выбор установки, шага между электродами и места размещения профиля наблюдений для осуществления мониторинговых наблюдений.

Участок расположен в зоне перехода от отложений впадины через её юго-восточное разломное ограничение к отложениям Салаирского кряжа. Конкретное место прохождения профиля ЭТ было выбрано экспериментально, руководствуясь геологическими данными, путем измерений по профилям, пересекающих разломную структуры в нескольких местах. Окончательное местонахождение мониторингового профиля зафиксировано там, где разлом хорошо выделяется в геоэлектрическом разрезе в виде низкоомной зоны, т.е. является активным [6].

На выбранном участке профиль измерений пересекает оперяющий разлом Чемского разломного нарушения в 4 км западнее п. Легостаево и находится в 5-7 км от области концентрации сейсмических событий в Горловской впадине (рис. 1).

Измерения методом электротомография выполнены с использованием многоэлектродной электроразведочной аппаратуры «Скала 48». Применялась установка «Шлюмберже» с расстоянием между электродами 5 м, обеспечивающим необходимую детальность и максимальным разносом АВ=235 м. Регулярные наблюдения проведены с интервалом ~ в 3 недели между измерениями, по заранее размеченному профилю с неизменным положением электродов.

Интерпретация полевых данных выполнена с использованием модернизированного программного комплекса моделирования и инверсии данных электротомографии Direct-Inverse-Solver (DiInSo). Этот комплекс, предназначенный ранее для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач электротомографии, был дополнен графом обработки данных мониторинга на основе теоретического анализа разных схем регуляризации.

В программе были реализованы 2 подхода для интерпретации данных мониторинга ( $\mathbf{d}$  — вектор данных,  $\mathbf{m}$  — искомый вектор,  $\rho$  — величины сопротивлений (символ  $\alpha$  означает кажущиеся сопротивления),  $\mathbf{f}(\mathbf{m})$  — отклик модели,  $t$  — временной шаг) [5]:

1. Инверсия с исходной моделью  $\mathbf{m}^0$  заданной как  $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^0$  (или, альтернативный вариант,  $\mathbf{m}^n - \mathbf{m}^{n-1}$ );

2. Так называемая «разностная инверсия после» («difference inversion after») которая дополнительно исправляет несоответствие в  $t_0$ :  $\mathbf{d}^n = \{\rho_\alpha^n / \rho_\alpha^0\} \mathbf{f}(\mathbf{m}^0)$  (или  $n-1$  вместо 0).



Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии в Горловской впадине

### *Результаты интерпретации*

В ходе интерпретации полевых данных электроразведки в Горловском прогибе использовались априорные сведения об электрофизических характеристиках горных пород, полученные лабораторными и скважинными методами. Для низкоомных угольных отложений УЭС изменяется от единиц до 20 Ом·м (по каротажу скважин), у перекрывающей кузнецкой свиты – УЭС до 100 Ом·м. Все стратиграфические подразделения, подстилающие угленосную толщу, имеют высокое УЭС (сотни и тысячи Ом·м). Максимально высокие УЭС у карбонатных пород, грубозернистых песчаников, несколько ниже у глинисто-сланцевых пород (верхний девон и нижний карбон), у рыхлых отложений УЭС составляет 20-40 Ом·м, для отложений коры выветривания УЭС изменяется от 9 до 200 Ом·м. На основе на решении обратной задачи в программном комплексе DiInSo получено распределение удельного электрического сопротивления по профилю измерения.

За время полевых работ осуществлено 11 мониторинговых наблюдений по профилю ЭТ с примерно равными временными интервалами между измерениями. За этот же период на расстоянии около 25 км от участка исследования про-



изошло 5 землетрясений с магнитудами от 2.1 до 3.7, а также ~ 20 техногенных взрывов с магнитудами от 2.1 до 3.2. Таким образом, измерения выполнены в период происходящих сейсмических событий и выявленные вариации УЭС разреза могут быть сопоставлены с воздействием этих сейсмических процессов на геологическую среду. Для анализа данных мониторинга в первую очередь выбраны интервалы, во время которых зарегистрированы наиболее сильные сейсмические события. По результатам анализа вариаций УЭС выявлена разная реакция геологической среды на землетрясения различной магнитуды.

Например, в первый интервал измерения были выполнены 26.05.23 г и 02.06.23 г., землетрясение с магнитудой 3,7 на расстоянии 7 км на запад от начала профиля произошло 28.05.23 г. В этот временной интервал (26.05.23-02.06.23) реакция геологической среды на сейсмическое событие выражается в значительных изменениях УЭС после него всего полученного геоэлектрического разреза (рис. 2).

Наблюдается уменьшение значений УЭС до 40% непосредственно в низкоомной разломной зоне, и увеличение значений УЭС до 55% в ограничивающих её высокоомных областях, которые соответствуют коренным породам. Такие значимые вариации УЭС можно объяснить существенным изменением гидрогеологического режима - перераспределением подземных вод под воздействием происходящих сейсмических событий, которые влияют на напряженное состояние среды.

Для других временных интервалов наблюдений, в которые происходили землетрясения меньших магнитуд, также выявлены вариации УЭС, но уровень вариаций не превышает 15-17%, т.е наблюдается зависимость вариаций УЭС от величины магнитуды.

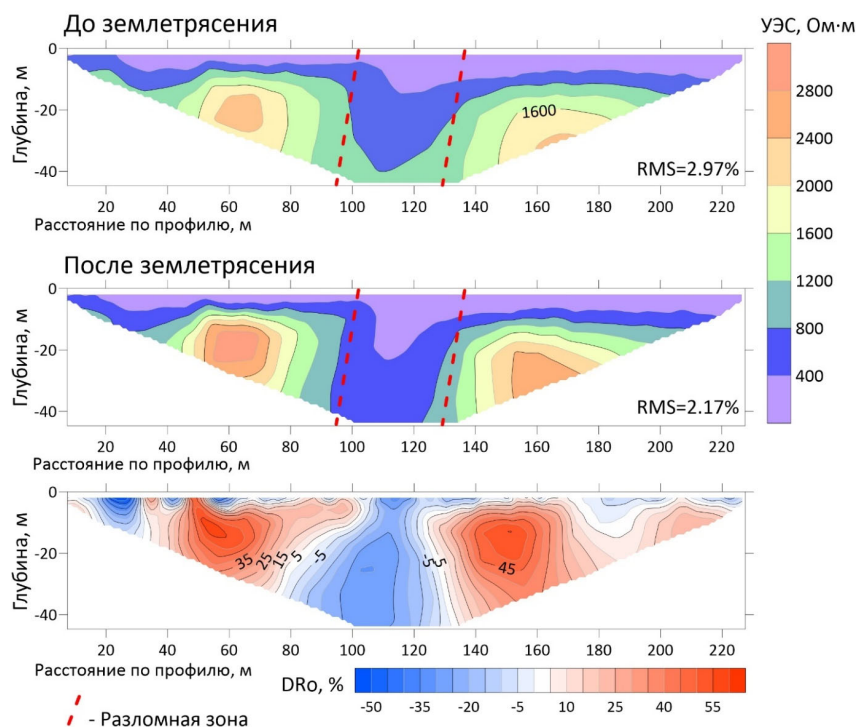


Рис.2. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга (26.05.23 г. и 02.06.23 г.) и относительные изменения УЭС по разрезу в процентах

В течении временного интервала (30.08.23-21.09.23) была зарегистрирована серия техногенных сейсмических событий с магнитудами от 2,8 до 3,2, обусловленных взрывами в добывающем карьере. За этот период наблюдений были выявлены существенно меньшие изменения УЭС среды, не превышающие 6%, причем более всего изменились значения УЭС самой верхней части разреза до глубины примерно 5-6 м (рис. 3).

Такие различия в вариациях могут быть связаны, например, с небольшими глубинами до гипоцентра, разными механизмами событий и направлениями на эпицентры по отношению к профилю измерений. Таким образом, предварительно сделан вывод, что по уровню вариаций УЭС можно отличить происходящие землетрясения от техногенных взрывов.

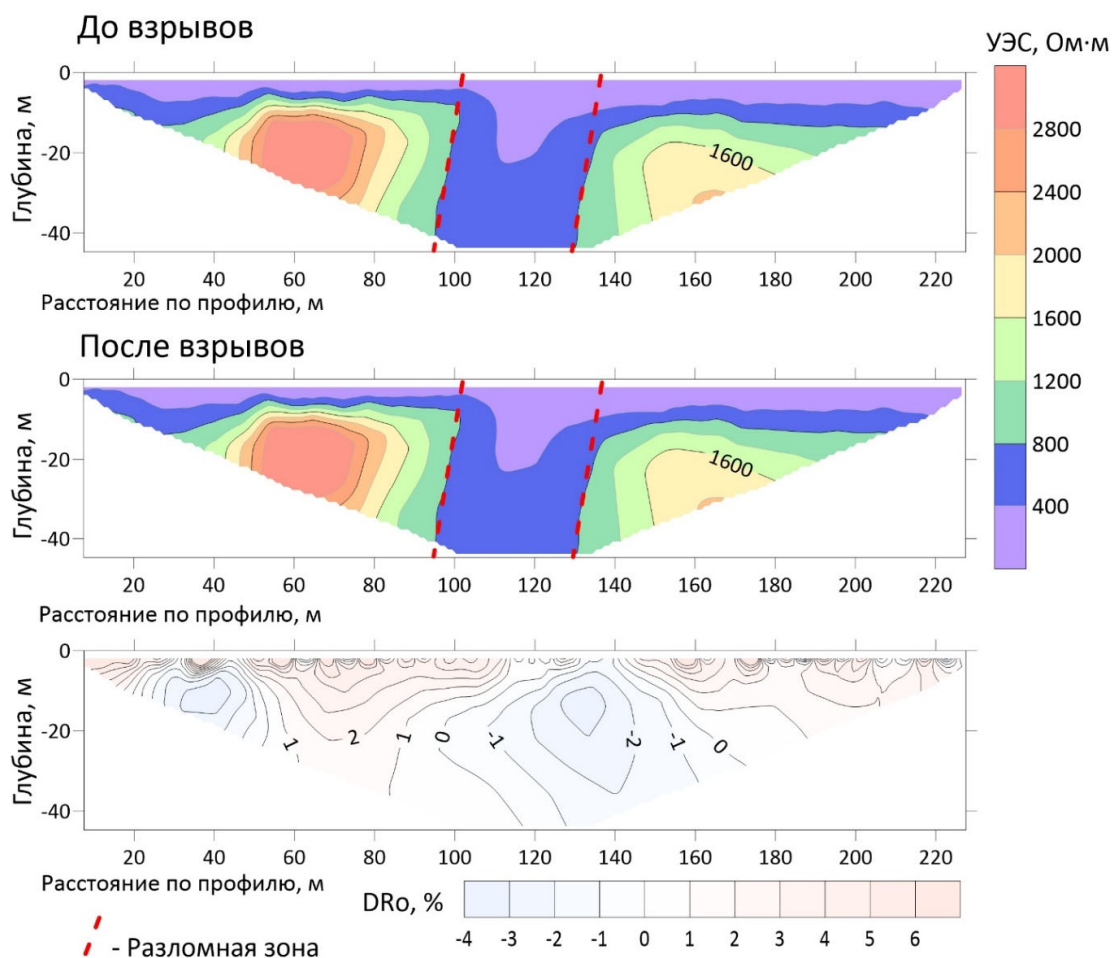


Рис.3. Геоэлектрические разрезы по профилю мониторинга (30.08.23 г. и 21.09.23 г.) и относительные изменения УЭС по разрезу в процентах

### Выводы

В статье представлены первые результаты регулярных наблюдений методом электротомографии по профилю, пересекающему разломную зону, на участке исследования в Горловском прогибе, полученные при интерпретации полевых данных с помощью модернизированного программного комплекса DiInSo.

За весь период наблюдений произошло несколько крупных землетрясений, реакция на которые проявилась в значимых изменениях УЭС геоэлектрического разреза, вариации УЭС достигают 40-50 %. Необходимо отметить, что после событий по-разному изменяются значения УЭС как в выявленной разломной зоне, так и во вмещающих эту зону отложениях. Выявленные корреляции основаны на совместном анализе результатов интерпретации всего объема регулярных наблюдений с интервалом между измерениями в среднем 2 недели, выполненных с мая по ноябрь 2023 года, с параметрами текущей сейсмичности.

Кроме того, получено, что на величину вариаций влияет магнитуда землетрясения: чем больше магнитуда землетрясения, тем больше величина вариаций УЭС. Предварительно можно отметить, что выявленные вариации геоэлектрических параметров отражают реакцию геологической среды не только на происходящие за период наблюдений землетрясения, но и на техногенные воздействия в виде взрывов в карьере, причем по уровню вариаций можно отличить взрывы от землетрясений.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10050, <https://rscf.ru/project/23-27-10050/>

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кунгурцев Л.В., Федосеев Г.С., Широких В.А., Оболенский А.А., Сотников В.И., Борисенко А.С., Гимон В.О. Геодинамические комплексы и этапы развития КолываньТомской складчатой зоны (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 1. – С. 26-37.
2. Иванов О.П., Сотников В.И., Федосеев Г.С., Кунгурцев Л.В., Борисенко А.С., Оболенский А.А., Васильев И.П., Гимон В.О. Геодинамика, магматизм, и металлогения КолываньТомской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1999. – 227 с.
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Павленко О.В., Фатеев А.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г. Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. с  $M_L = 4.3$  и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2019. – Т. 4. – № 46. – С. 29-45. <https://doi.org/10.21455/VIS2019.4-2>
4. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 207-210. DOI: 10.15372/FPVGN2021080132
5. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е., Мариненко А.В., Шапаренко И.О. Развитие программно-алгоритмических средств для обработки и интерпретации данных мониторинга методом электротомографии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2023. – Т. 21. – №3. – С. 32-45. DOI: 10.25205/1818-7900-2023-21-3-32-45
6. Применение метода электротомографии для исследования разломных структур (на примере Горного Алтая) / Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. // Геосочи-2022. Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики: Материалы международной научно-практической конференции. – Сочи, 27-29 апреля 2022. – Сочи. – 2022. – С. 14-17.
7. Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., Podkorytova V.G. Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with  $M_L=4/3$  and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin // Seismic Instruments. – 2020. – V.56. – №3. – pp. 254–268. <https://doi.org/10.3103/S0747923920030020>.



8. Геологическая карта: N-44-XVIII (Черепаново). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Кузбасская серия, масштаб: 1:200000, серия: Кузбасская / под ред. Ратанов Л.С. – ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2014. – 200 с.

© А. Е. Шалагинов Н. Н. Неведрова, И. О. Шапаренко, А. В. Мариненко, 2024