

# РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ИЗМЕНЕНИЯМИ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ В ЗОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Мариненко А.В.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3, +79930227702, arkadiy@geqip.net

В работе предложена электродная система наблюдений, основанная на методе электротомографии на постоянном токе. Основным предназначением такой системы является своевременное обнаружение зон таяния мерзлоты в подповерхностном слое земли. Образование подобных зон происходит из-за нетипично высоких температур в северных широтах и приводит к неравномерной просадке грунта. 29 мая 2020 года это послужило одной из причин утечки дизельного топлива в городе Норильск. В ходе исследований было проведено моделирование ситуации образования зоны таяния мерзлоты под резервуаром с топливом.

Для решения прямой задачи на постоянном токе использовался узловой метод конечных элементов на тетраэдральных сетках [1]. Краевая задача в данном случае выглядит следующим образом:

$$-\operatorname{div} \sigma \operatorname{grad} \varphi = 0, \quad \sigma \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_S} = j_S, \quad \varphi|_{\Gamma_0} = 0, \quad [\varphi]_{\Gamma_{ij}} = 0, \quad \left[ \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right]_{\Gamma_{ij}} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность (См/м),  $\varphi$  — скалярный электрический потенциал (В),  $j_S$  — ток на электродах (А),  $\Gamma_0$  — внешняя граница области моделирования,  $\Gamma_S$  — поверхность электродов,  $\Gamma_{ij}$  — границы между подобластями с разными электрофизическими свойствами,  $n$  — нормаль.

Для решения обратной задачи использовалась схема Гаусса-Ньютона для минимизации функционала  $\Phi$  [2]:

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\Phi_d$  — функционал данных,  $\Phi_m$  — модельный функционал,  $\lambda$  — параметр регуляризации.

На финальном этапе рассчитывалось аномальное поле, которое получалось путем вычета результатов инверсии с зоной таяния вечной мерзлоты и без нее. Все расчеты выполнялись на персональном компьютере с использованием авторского программного комплекса DiInSo (Web-сайт программы: <https://diinso.sourceforge.io>), предназначенного для решения прямых и обратных задач электротомографии в различных постановках.

## Литература

1. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. — М.: Мир, 1986. — 318 с.
2. *Rucker C.* Advanced electrical resistivity modelling and inversion using unstructured discretization // *Dissertation*, Leipzig, 2011. — 121 p.