

ИЗУЧЕНИЕ ТАЛИКОВЫХ ЗОН ПОД ТЕРМОКАРСТОВЫМИ ОЗЕРАМИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ (ПО ПОЛЕВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ТРЕХМЕРНОМУ ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ)

Алексей Николаевич Фаге

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (905)951-23-66, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, заместитель директора, тел. (383)363-80-39, e-mail: yeltsovin @ipgg.sbras.ru

Мобильность и оперативность исследования методом электротомографии [1] важны при изучении труднодоступных районов, в том числе Крайнего Севера. При этом часто необходимо верифицировать полученную в результате инверсии геологическую модель, используя лишь доступные в полевых условиях ресурсы. Современные графические процессоры обладают высокой производительностью и существенно ускоряют обработку данных даже на полевом ноутбуке, поэтому растет востребованность программ решения прямых и обратных задач, использующих ресурсы графических процессоров – GPU.

Ключевые слова: электротомография, трехмерное численное моделирование, графический ускоритель, таликовая зона, термокарстовое озеро.

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY INVESTIGATION OF TALIK ZONES BENEATH THERMOKARST LAKES (BASED ON FIELD MEASUREMENTS AND 3D COMPUTER MODELING)

Alexey N. Fague

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Junior research associate at the laboratory of electromagnetic fields, tel. (905)951-23-66, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Senior Researcher at borehole geophysics laboratory, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Igor N. Yeltsov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of science, deputy director, tel. (383)363-80-39, e-mail: yeltsovin @ipgg.sbras.ru

Electrical resistivity tomography mobility and speed [1] are important during investigations of remote regions, including Far North. It is a common situation when inversion results need to be ve-

rified on spot using only resources currently at hand. The power of modern graphics processors allows for significant increase in data processing speed even on notebooks. Therefore there is an increasing demand for programs that solve direct and inverse problems utilizing GPUs.

Key words: electrical resistivity tomography, 3D computational modeling, graphics processing unit, talik zone, thermokarst lake.

Высокая разрешающая способность электротомографии позволяет выявлять особенности геологического строения, недоступные другим методам электроразведки, но, как и для других методов геоэлектрики, современное развитие электротомографии определяется новыми аппаратными разработками и программно-алгоритмическими средствами для прямого моделирования и интерпретации полевых данных. Верификация получаемых в результате инверсии геоэлектрических разрезов (прямое моделирование) особенно актуальна для Северных районов, где температурные параметры геологической среды варьируются в широких пределах и, как следствие, сильно меняются ее электрические свойства. Развитие современной вычислительной техники, в частности появление графических процессоров, позволяет вести обработку данных на ноутбуке в полевых условиях. Поэтому важной задачей является создание инструментария для быстрого решения прямых и обратных задач с максимальным использованием возможностей графических процессоров.

В ходе работ в дельте р. Лена в 2014, 2015 г. наличие большого числа водоемов на профилях исследования приводило к появлению зон низкого удельного электрического сопротивления (УЭС) на геоэлектрическом разрезе. При этом ввиду разницы значений УЭС до трех порядков эти зоны на геоэлектрическом разрезе представляются как обширные пятна, выходящие далеко за пределы ожидаемых границ. Чтобы определить, насколько сильно высокий контраст изучаемой среды, создаваемый массивными проводящими объектами, влияет на способность построить правдоподобную геологическую модель по результатам инверсии, было применено трехмерное численное моделирование.

Трехмерное моделирование для задач вертикального электрического зондирования и электротомографии сводится к моделированию распределения электрического потенциала точечного источника в сложно построенной среде. Представим потенциал электрического поля U в виде суммы аномального потенциала U^a и первичного потенциала U^0 , связанного с источником поля, расположенным в однородной среде с проводимостью σ^0 :

$$U = U^0 + U^a, \quad (1)$$

Для аномального потенциала U^a справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{div}(\sigma \nabla U^a) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma_0) \nabla U^0), \quad (2)$$

где $\sigma(x, y, z)$ – проводимость в среде. При удалении от источника потенциал затухает как $1/R$, где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, поэтому для функции U^a вдали от источников $U^a|_{x \rightarrow \pm\infty} = 0$, $U^a|_{y \rightarrow \pm\infty} = 0$, $U^a|_{z \rightarrow \pm\infty} = 0$.

Дискретизация уравнения конечно-разностным методом [2] и последующая его симметризация приводит к системе линейных алгебраических уравнений

$$AU^a = b, \quad (3)$$

где A – действительная, симметричная, сильно разреженная, положительно определенная матрица. После решения системы (3) получим аномальный потенциал. Затем с помощью уравнения (1) находим полный потенциал. Для нахождения разности потенциалов в приёмных электродах и кажущегося сопротивления необходимо решить несколько таких задач для различного положения токовых электродов. Для решения систем линейных уравнений (3) был выбран итерационный метод сопряженных градиентов (CG), поскольку в данном случае мы имеем разреженные, симметричные матрицы больших размеров (от 1,5 до 2,5 млн. сеточных узлов). Для повышения скорости сходимости был использован оригинальный подход построения предобуславливающей матрицы на основе аппроксимации обратной матрицы, предложенный в [3] и библиотека функций CUBLAS CUDA NVIDIA. В результате мы получили полностью параллельный алгоритм метода PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), максимально использующий возможности графических процессоров [4]

Разработанная программа в настоящий момент активно используется для верификации полевых данных 2014-2015 гг., в том числе результатов исследования многолетнемерзлых пород в дельте р. Лена, Булунский улус, Республика Саха (Якутия). Работы производились в августе 2014 г. вблизи Научно-исследовательской станции НИС о. Самойловский и стали первым опытом использования аппаратуры СКАЛА-48 в дельте р. Лена. Объект исследования был выбран совместно с коллегами из Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI) – озеро Рыба на острове Самойловский, оно имеет относительно большую для тундровой зоны глубину (7 метров) и не промерзает до дна в зимний период. Данная особенность предполагает наличие таликовой зоны непосредственно под самим озером. Совместно с коллегами из AWI была поставлена научная задача: оценить возможности метода электротомографии для определения наличия талика под озером. Сложность исследования заключалась в том, что таликовая зона, согласно имеющимся данным бурения, а также результатам моделирования [5], ограничена линией уреза воды. Таким образом, единственно возможный вариант исследования – провести электро-разведочную линию через водоем. В общей сложности (с учетом топких берегов) в воде находились 10 из 48 электродов электроразведочной косы, с шагом между ними 5 м (45 м профиля в воде из общих 235 м). Остальные электроды были заземлены в проводящий деятельный слой.

На результатах инверсии (0) хорошо видна проводящая аномалия в интервале 140-200 м по профилю, значения УЭС 70-400 Ом·м. Ее конфигурация полностью соответствует данным моделирования таликовых зон под незамерзающими озерами (мощность более 20 м, субвертикальные границы, находящиеся под урезом воды), выполненными немецкими коллегами [5]. Однако

результаты инверсии требуют проверки, поскольку очевидно, что масса воды, образующая мощный проводник, влияет на геоэлектрический разрез. Для верификации данных исследования была построена модель среды (на 0 приведена зона непосредственно под электроразведочной линией).

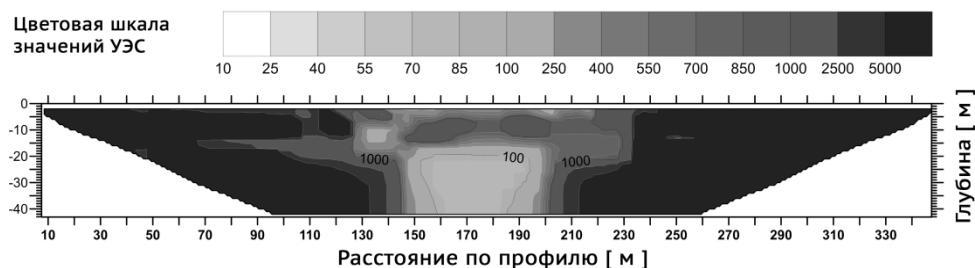


Рис. 1. Результаты инверсии полевых данных, полученных в ходе исследования оз. Рыба, о. Самойловский, республика Саха (Якутия)

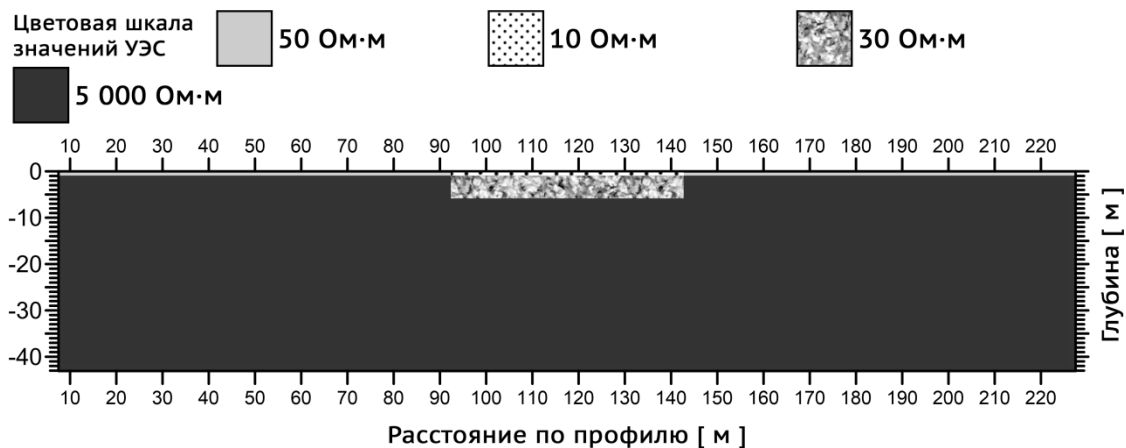


Рис. 2. Модель изучаемой среды: деятельный слой мощностью 1 м (50 Ом·м), озеро глубиной 1 м (10 Ом·м), талик мощностью 5 м (30 Ом·м), вечная мерзлота (5000 Ом·м)

Кроме того, для сравнения была рассчитана модель среды без таликовой зоны. Результаты инверсии расчетных данных приведены на 0.

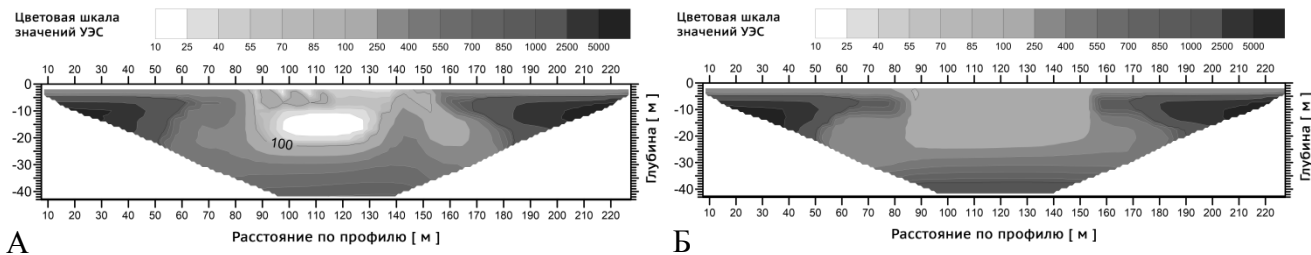


Рис. 3. Инверсия модельных данных, разрез А – талик присутствует, разрез Б – талик отсутствует

Разность данных инверсии позволила оценить влияние таликовой зоны на результаты измерений (0).

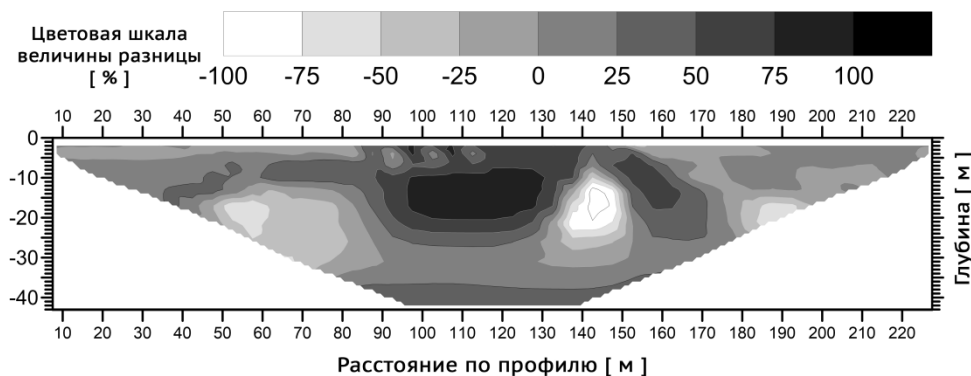


Рис. 4. Относительная разность данных инверсии модели с таликовой зоной и без нее, %

Моделирование показало, что таликовая зона оказывает существенное влияние на результаты измерений (относительная разность между значениями УЭС в аномальной зоне в интервале 90-140 м по профилю составляет не менее 75 %). Однако идентификация таликовой зоны и тем более определение ее параметров лишь по результатам геофизических измерений методом электротомографии требует наличия обширных статистических данных по объектам исследования, а также базы рассчитанных моделей среды.

В работе показано, ответ на вопрос о наличии/отсутствии талика можно дать при сравнительном анализе данных натурного и численного эксперимента. Поскольку разработан высокопроизводительный инструментальный трехмерного моделирования на GPU полевого ноутбука, задача может быть решена непосредственно в поле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Loke M.H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, a Practical Guide to 2D and 3D Surveys by Loke // <http://www.geoelectrical.com>, 1999.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1979. - 655 с.
3. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) Journal http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.
4. Суродина И.В, Нестерова Г.В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015. Сборник статей EAGE. - 2015. - С. 79-88.
5. West J.J., Plug L.J. Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice // Journal of Geophysical Research. - 2008. - Vol. 113. - P. F01009. - doi:10.1029/2006JF000696.

© А. Н. Фаге, И. В. Суродина, И. Н. Ельцов, 2016