

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.  
ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск  
СГУГиТ  
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,  
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии  
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск  
*А. Э. Конторович*

Доктор технических наук, академик РАН,  
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии  
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск  
*М. И. Энов*

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии  
и геофизики СО РАН, Новосибирск  
*И. Н. Ельцов*

Кандидат технических наук, директор Института горного дела  
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск  
*А. С. Кондратенко*

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор  
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики  
и минерального сырья, г. Новосибирск  
*М. Ю. Смирнов*

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу  
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск  
*А. И. Неволько*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля  
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное  
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-  
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов  
в 6 т. Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 335 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса  
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции  
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-  
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (секция «Гео-  
логическое, геофизическое и геохимическое обеспечение поиска и разведки полезных  
ископаемых. Геотехнологии. Геоэкология»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

## **ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОДОЗЕРНОГО ТАЛИКА**

### *Алексей Николаевич Фаге*

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

### *Владимир Владимирович Оленченко*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией геоэлектрики, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.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, профессор, директор, тел. (383)333-29-00, e-mail: yeltsovin@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, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Электротомография хорошо зарекомендовала себя при изучении многолетнемерзлых пород (ММП): высокие значения УЭС среды позволяют получать качественные геоэлектрические разрезы. Однако измерения в криолитозоне осложняются наличием локальных областей с низкими значениями УЭС: термокарстовыми озерами, зонами деградации ММП. В таких условиях возникают существенные аномалии в измеряемых значениях, которые затем дают артефакты при инверсии данных. Для лучшего понимания этих эффектов используется трехмерное численное моделирование на графических процессорах.

**Ключевые слова:** электротомография, трехмерное численное моделирование, графический ускоритель, многолетнемерзлые породы, талик, термокарстовое озеро.

## **VERIFICATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY DATA BY MEANS OF 3D COMPUTER MODELING IN THE COURSE OF LAKE TALIK STUDIES**

### *Alexey N. Fague*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, Laboratory of Electromagnetic Fields, phone: (905)951-23-66, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru

### *Vladimir V. Olenchenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Head of Laboratory of Geoelectric, phone: (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

**Igor N. Yeltsov**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Director, phone: (383)333-29-00, e-mail: yeltsovin @ipgg.sbras.ru

**Irina V. Surodina**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Borehole Geophysics, e-mail: sur@ommfao1.sgcc.ru

Electrical resistivity tomography has shown itself as a robust method in permafrost studies: high resistivity values of the frozen rock allow for high-quality electrical cross-sections. However electrical measurements in permafrost environments are complicated by local areas of low resistivity: thermokarst lakes, permafrost degradation zones. These give significant anomalies in measured values and lead to artifacts in data inversion. For the better understanding of these effects a 3D numerical modeling approach with calculations on GPU is used.

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

Определение геометрии подозерных таликов является актуальной проблемой при изучении процессов деградации многолетнемерзлых пород (ММП) и их влияния на эмиссию парниковых газов [1]. Для изучения строения ММП широко применяется метод электротомографии [2]. При этом часто забывается особенность работы любого геофизического метода (и, в частности, электротомографии): трехмерность изучаемой среды и измеряемых физических полей. Особенно ярко выражена эта тенденция по причине широкого использования программ двумерной инверсии. Двумерная инверсия, несомненно, отличается высокой скоростью расчета и наглядностью получаемого результата. Однако эти факторы могут сыграть с исследователями злую шутку: измеренные аппаратурой «трехмерные» сигналы затем переносятся в программы двумерной инверсии. Таким образом, особенности изучаемой среды, зафиксированные приборами по третьей оси, вынужденно помещаются в двумерную модель, формируя в ней ложные аномалии. Этот эффект особенно ярко выражен при наличии высококонтрастных сред, которые широко распространены в Арктических районах. Здесь экстремально высокие значения УЭС, характерные для ММП, соседствуют с локальными зонами низких сопротивлений, коими являются термокарстовые озера, влажные полигональные структуры, талики.

В связи с этим возникает задача верификации получаемых в результате инверсии геоэлектрических разрезов путем прямого моделирования. Развитие современной вычислительной техники, в частности появление графических процессоров, позволяет вести обработку данных на ноутбуке в полевых условиях. Поэтому важной задачей является создание и последующее использование инструментария для быстрого решения прямых и обратных задач с максимальным использованием возможностей графических процессоров. Об опыте применения такой программы пойдет речь в данной статье.

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

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

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  $U^a|_{x \rightarrow \pm X} = 0, U^a|_{y \rightarrow \pm Y} = 0, U^a|_{z \rightarrow \pm Z} = 0$ .

Дискретизация уравнения конечно-разностным методом [1] 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 получим аномальный потенциал. Затем с помощью уравнения находим полный потенциал. Для нахождения разности потенциалов в приемных электродах и кажущегося сопротивления необходимо решить несколько таких задач для различного положения токовых электродов. Для решения систем линейных уравнений 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 преобуславливающей матрицы на основе аппроксимации обратной матрицы, предложенный в [4], и библиотека функций CUBLAS CUDA NVIDIA. В результате мы получили полностью параллельный алгоритм метода PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), максимально использующий возможности графических процессоров [5]. Разработанная программа в настоящий момент активно используется для верификации полевых данных.

Полевые данные электротомографии были получены при исследовании строения талика под одним из озер на острове Самойловский в дельте р. Лена в 2017 г. Озеро имеет размеры 350 метров в длину и 80 м в ширину. Глубина озера 1,5–4,5 м. Небольшая ширина озера позволила пересечь его одним кабе-



лем длиной 115 метров в поперечном направлении. Таким образом, полная электроразведочная линия (235 метров для 48 электродов с шагом 5 метров) с одним нагоняющим профилем позволяла соблюсти условие выхода в нормальное поле [6]. Электрические зондирования были выполнены на девяти профилях по 355 метров каждый (рис. 1), расположенных на расстоянии 50 м друг от друга.

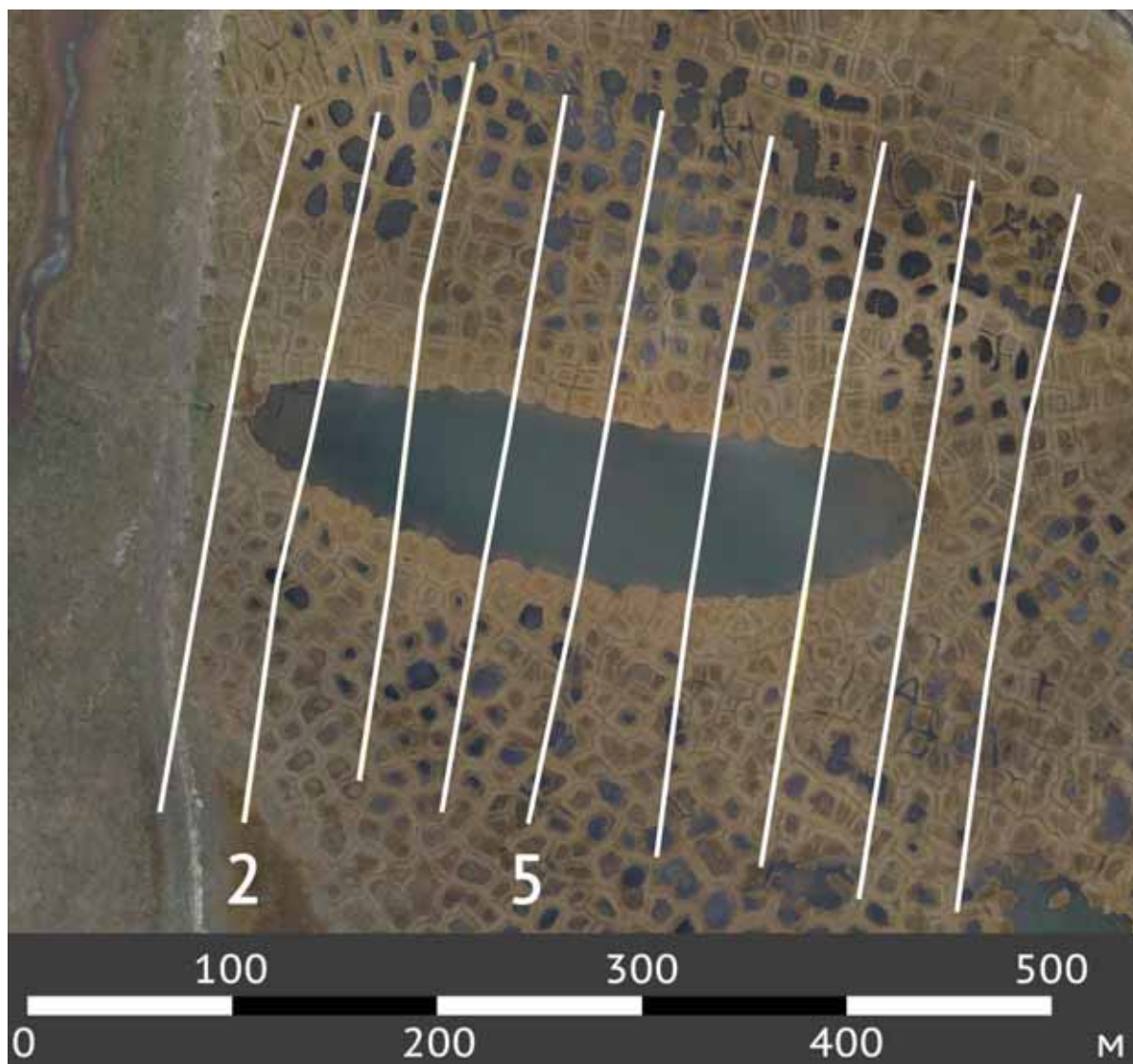


Рис. 1. Аэрофотоснимок термокарстового озера на о. Самойловский (линиями обозначены профили исследования; номера 2 и 5 соответствуют второму и пятому профилю соответственно)

В результате двумерной инверсии данных ЭТ были построены геоэлектрические разрезы. Примеры разрезов по профилям 2 и 5 показаны на рис. 2. В тех местах, где профиль пересекает озеро, отмечаются аномалии низкого УЭС разной интенсивности в зависимости от ширины озера.

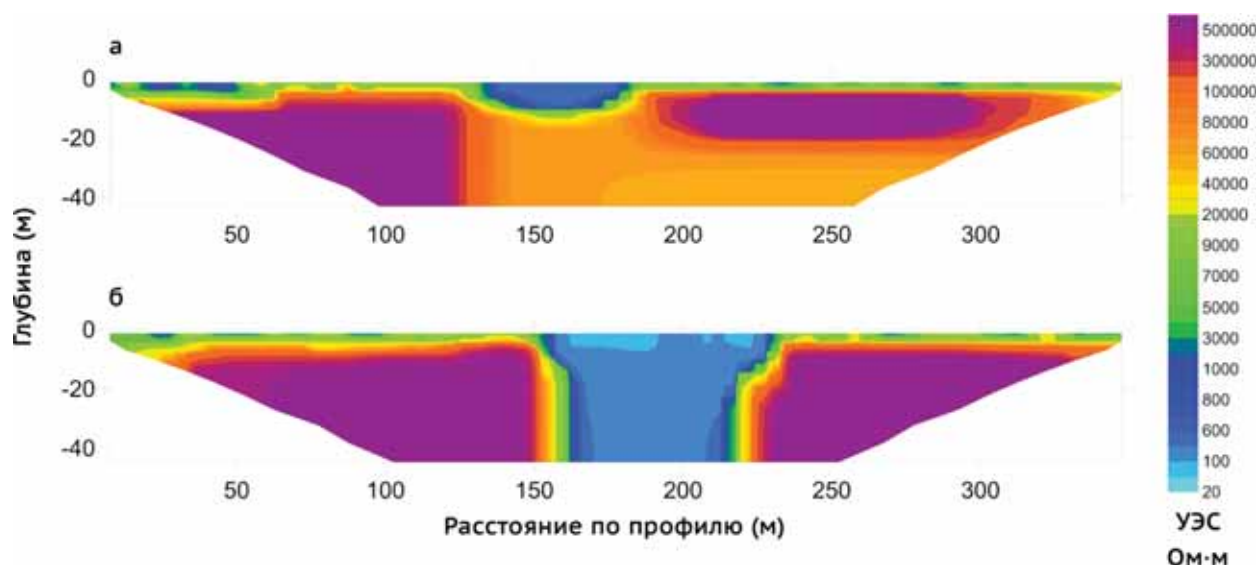


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы по профилям 2 (а) и 5 (б) по результатам 2-D инверсии полевых данных. Установка Шлюмберже

Эти аномалии были интерпретированы как приуроченные к возможному подозерному талику. С другой стороны, аномалии низкого УЭС на геоэлектрических разрезах могут быть вызваны объемом воды, находящимся по обе стороны от профиля.

Проводящая аномалия УЭС (50–400 Ом·м) в интервале 130–180 метров по профилю № 2 и 150–230 метров по профилю № 5 интерпретировалась как водное тело и возможный подозерный талик. Причем для профиля 2 логично было предположить отсутствие талика, поскольку проводящая аномалия ограничена по мощности, а данные батиметрии в этом месте (максимальная глубина озера здесь не превышает 2 метров) говорят о том, что зимой озеро промерзает до дна. В соответствии с современными представлениями о динамике термокарстовых озер [7], промерзание означает отсутствие талика в данном месте.

На геоэлектрическом разрезе по профилю № 5 наблюдается обширная «сквозная» аномалия низких значений УЭС. Эта аномалия была проинтерпретирована как возможный подозерный талик. Однако из предыдущих работ [8] известно, что протяженный водный объект дает подобные аномалии низких сопротивлений, которые могут вводить в заблуждение при интерпретации данных.

Для повышения однозначности интерпретации было решено верифицировать результаты при помощи трехмерного численного моделирования. Проверка гипотезы о наличии талика и его выделении по данным электротомографии была выполнена при помощи программы численного моделирования, разработанной в ИНГГ СО РАН [9]. Исходя из данных о глубине озера, типичных режимов становления льда для данного района и сезонного оттаивания, была построена модель среды (рис. 3).

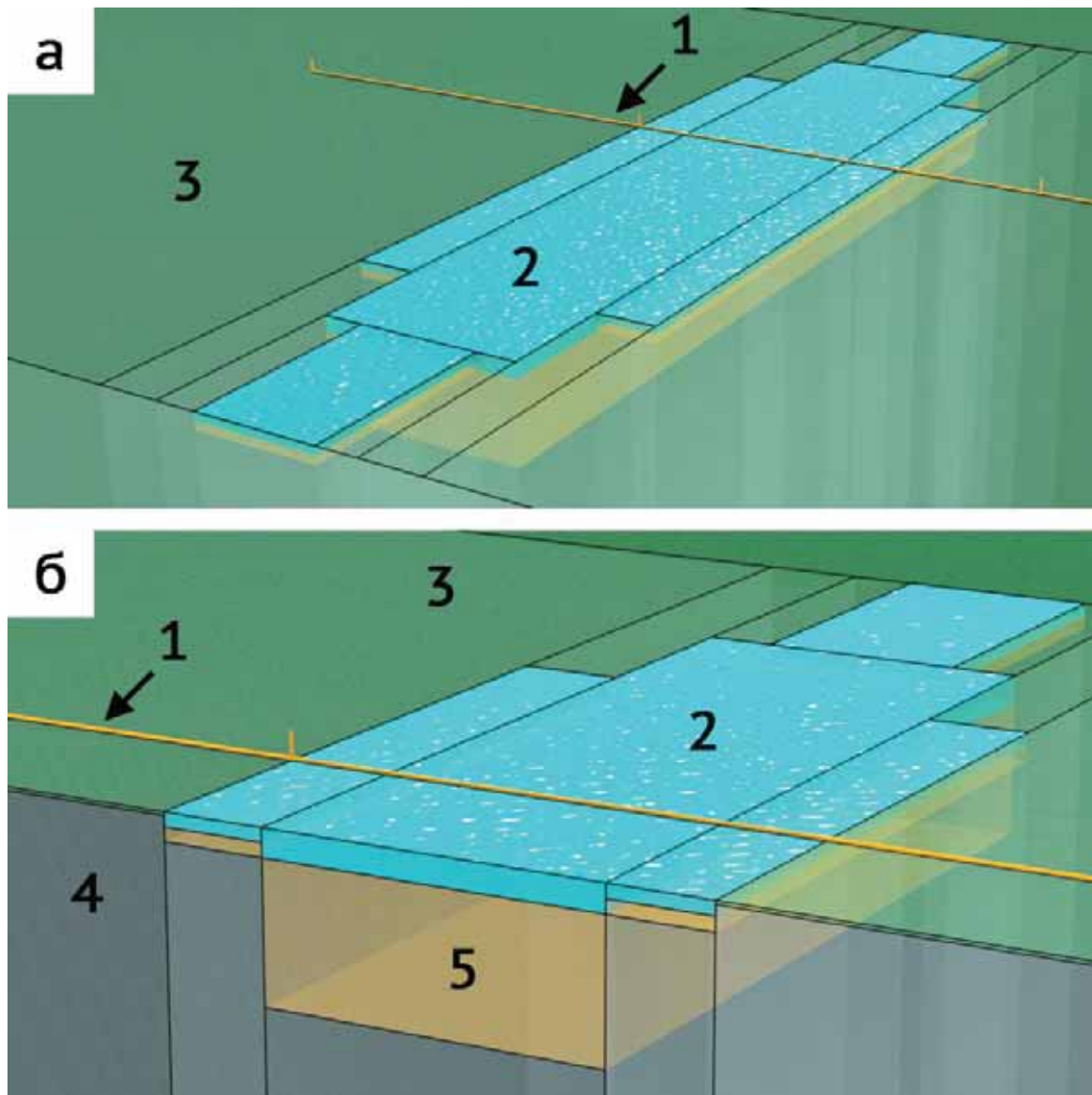


Рис. 3. Модель среды в плане (а) и разрезе (б):  
 1 – профиль ЭТ; 2 – вода; 3 – сезонноталый слой; 4 – ММП; 5 – талик

В модели выделялось четыре типа среды с различными значениями УЭС: вода – 100 Ом·м, сезонноталый (деятельный) слой – 200 Ом·м, многолетнемерзлые породы – 50 000 Ом·м, талик – 300 Ом·м.

Озеро было поделено на две зоны: прибрежную (мелководная) и центральную (глубоководная). Значение глубины водной толщи в прибрежных зонах – 2 метра, в центральной – 4 метра. Под центральной частью расположен талик глубиной 20 метров. Толщина деятельного слоя – 0,5 метров. Мощность ММП – бесконечная. Результаты численного трехмерного моделирования приведены на рис. 4.

Результаты инверсии модельных данных позволяют говорить о значительном влиянии подозерного талика на результаты измерений. В модели без тали-



ка (рис. 4, б), инверсия показывает существенную разницу по сравнению с моделью, в которой присутствует талик (рис. 4, а). В первом случае аномальная зона имеет локальный характер, а во втором – «сквозной». Таким образом, можно сделать вывод, что модель с таликом корректно описывает реальный объект, поскольку наблюдается соответствие в результатах инверсии модельных и полевых данных. Что касается более точного определения параметров этого талика, здесь возникает сложность. Для сравнения была рассчитана модель, в которой талик имеет в два раза меньшую мощность. Полученный результат инверсии также дает «сквозную» аномалию.

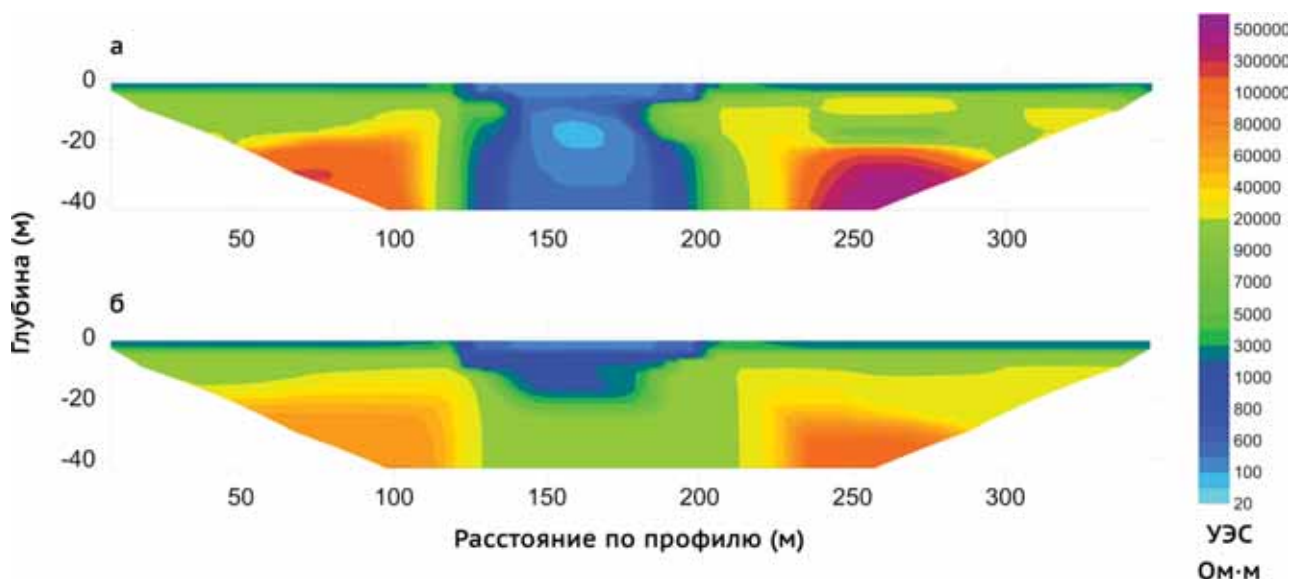


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по инверсии данных численного трехмерного моделирования:

а) для модели среды с таликом глубиной 20 м; б) для модели среды без талика

Таким образом, при помощи трехмерного численного моделирования было установлено, что с большой вероятностью сквозная аномалия в инверсии полевых данных соответствует подозрному талику. При этом достоверно определить его мощность по одним лишь данным электротомографии не представляется возможным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Heslop J. K., Anthony W., Katey M., Sepulveda-Jauregui A., Martinez-Cruz K., Bondurant A., Grosse G., Jones M. C. Thermokarst lake methanogenesis along a complete talik profile // Biogeosciences. – 2015. – № 12. – pp. 4317–4331. doi: 10.5194/bg-12-4317-2015.
2. Оленченко В. В. и др. Распространение толщи мерзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15. – № 1. – С. 15–22.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М. : Наука, 1979. – 655 с.

4. 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](http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18).
5. Суролина 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.
6. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка) // ПНИИИС. – М. : Стройиздат, 1984. – 104 с.
7. 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 – № F1. doi:10.1029/2006JF000696.
8. Фаге А. Н., Суролина И. В., Ельцов И. Н. Изучение таликовых зон под термокарстовыми озерами при помощи метода электротомографии (по полевым измерениям и трехмерному численному моделированию) // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 250–254.
9. Суролина И. В., Фаге А. Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017660273&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017660273&TypeFile=html) (дата обращения: 20.03.2018).

## REFERENCES

1. Heslop J. K., Anthony W., Katey M., Sepulveda-Jauregui A., Martinez-Cruz K., Bondurant A., Grosse G., Jones M. C. Thermokarst lake methanogenesis along a complete talik profile // *Biogeosciences*. – 2015. – № 12. – pp. 4317–4331. doi: 10.5194/bg-12-4317-2015.
2. Olenchenko V. V. i dr. Rasprostranenie tolshchi merzlyh porod v Chujskoj vpadine (Gornyj Altaj) po dannym elektromagnitnyh zondirovanij // *Kriosfera Zemli*. – 2011. – Т. 15. – № 1. – С. 15–22.
3. Samarskij A. A. *Teoriya raznostnyh skhem*. – М. : Nauka, 1979. – 655 s.
4. 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](http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18).
5. Surodina I. V., Nesterova G. V. Modelirovanie pokazanij zondov VIKIZ i BKZ na graficheskikh processorah // *Petrofizika slozhnyh kollektorov: problemy i perspektivy 2015: Sbornik statej EAGE*. – 2015. – С. 79–88.
6. Rekomendacii po geofizicheskim rabotam pri inzhenernyh izyskaniyah dlya stroitel'stva (elektrozvedka) // ПНИИИС. – М. : Стройиздат, 1984. – 104 с.
7. 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 – № F1. doi:10.1029/2006JF000696.
8. Фаге А. Н., Суролина И. В., Ельцов И. Н. Изучение таликовых зон под термокарстовыми озерами при помощи метода электротомографии (по полевым измерениям и трехмерному численному моделированию) // *Интерэкспо Geo-Sibir'*. – 2016. – Т. 2. – С. 250–254.
9. Суролина И. В., Фаге А. Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017660273&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017660273&TypeFile=html) (дата обращения: 20.03.2018).

© А. Н. Фаге, В. В. Оленченко, И. Н. Ельцов, И. В. Суролина, 2018