

**А.Н. Фаге, Д.И. Фадеев, И.Н. Ельцов**

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЯРНОЙ СТАНЦИИ «НИС О. САМОЙЛОВСКИЙ»**

Проведен трехлетний мониторинг на площадке, непосредственно примыкающей к дизель-генератору Научно-исследовательской станции «НИС о. Самойловский» (Булунский улус, республика Саха (Якутия). В ходе мониторинга применялись два метода малоглубинной электроразведки: частотное зондирование и электротомография. Оба метода характеризуются малым (близким к нулевому) воздействием на окружающую среду, высокой разрешающей способностью и информативностью, а также малыми трудозатратами. Результаты мониторинга показали высокую достоверность применяемых геофизических методов, а также их перспективность для выполнения инженерных исследований в зонах распространения многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: деградация многолетнемерзлых пород, электротомография, частотное зондирование, антропогенное воздействие на окружающую среду.

### **Введение**

**П**роблема деградации многолетнемерзлых пород под воздействием антропогенных факторов является актуальной для регионов Крайнего Севера. Чаще всего это связано с жилищно-коммунальной инфраструктурой [1] и производственной деятельностью [2], однако в некоторых случаях, влияние оказывают объекты, существенно удаленные от цивилизации. К таким объектам относится НИС о. Самойловский. Ежегодный мониторинг на подобном удаленном объекте требует наличия компактной аппаратуры, реализующей эффективный и информативный метод исследования. В нашем случае такими методами являются электротомография и частотное зондирование.

Исследуемый объект характеризуется существенным антропогенным воздействием в течение всего года: зимой мощность снежного покрова существенно отличается от нетронутых техногенным воздействием участков тундры, а летом происходит растепление верхнего слоя многолетнемерзлых пород вследствие теплового излучения дизель-генератора, обеспечивающего энергией «НИС о. Самойловский». При этом, вследствие высокого содержания льда в грунтах в районе работ, растепление приводит не только к просадке, но и к выделению значительного количества воды, которая собираясь на поверхности дополнительно ускоряет процесс деградации. Стоит отметить, что опасность для основных сооружений «НИС о. Самойловский» в данный момент отсутствует вследствие большой глубины погружения свайного основания (более 15 м). Однако появление на территории станции зон просадки грунтов, а также обводненных и заболоченных участков мешает нормальному функционированию НИС, поэтому мониторинг состояния многолетнемерзлых пород, а также поиск вариантов решения имеющейся проблемы является важной задачей.

Современные методы электроразведки – электротомография и частотное зондирование за счет высокой разрешающей способности позволяют выявлять особенности геологического



*Рис. 1. Ортофотоплан жилого модуля и дизель-генераторной «НИС о. Самойловский». Съемка выполнена в 2016 г. при помощи беспилотного комплекса Supercam S250. Белым четырехугольником отмечена площадка трех-летнего мониторинга [3]*

строения, недоступные другим методам геоэлектрики. Мобильность методов делает их привлекательным для решения широкого круга научных и прикладных задач в условиях Крайнего Севера, поскольку дает возможность изучать геологическое строение интересующих участков без использования тяжелой техники [3]. В частности, методы могут быть полезны при оценке объемов деградации многолетнемерзлых пород, вызванной как естественными, так и антропогенными факторами.

### **Аппаратурное обеспечение работ по мониторингу состояния многолетнемерзлых пород на территории «НИС о. Самойловский»**

Аппаратура ЭМС реализует методы электромагнитного индукционного частотного (ЧЗ) зондирования и профилирования (ЭП) с вертикальным магнитным диполем, и представляет собой трехкатушечный зонд.

Геометрические параметры ЭМС (рис. 2): радиус генераторной катушки  $R_r = 0,165$  м; радиусы приемных катушек  $R_{\Pi 1} = R_{\Pi 2} = 0,025$  м. Количество витков в генераторной катушке  $n_r = 40$ , в ближней приемной катушке  $n_{\Pi 1} = 10,8$ ; в дальней катушке  $n_{\Pi 2} = 50$ . Расстояния между центрами генераторной и приемных катушек  $r_1 = 1,5$  м и  $r_2 = 2,5$  м.

Генераторная петля излучает электромагнитное поле на 14 частотах в диапазоне 2,5–250 кГц. Аппаратура обладает следующими особенностями: приемные катушки включены встречно-параллельно, их моменты разнонаправлены, таким образом, на вход усилителя поступает разностный сигнал; благодаря оригинальной конструкции приемников, прямое поле компенсировано в 1000 раз [ссылка].

Аппаратура СКАЛА (рис. 3), разработанная в ИНГГ СО РАН [4], реализует модифицированный метод сопротивлений на постоянном токе, который основан на применении многоэлектродных кос, подключаемых к аппаратуре, автоматически коммутирующей токовые и измерительные электроды.

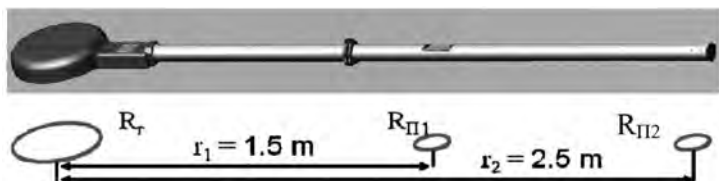


Рис. 2. Схема аппаратуры ЭМС (ИНГГ СО РАН, КБ Электрометрии, 2014 г.)

Такая технология увеличивает на порядок производительность и повышает разрешающую способность зондирований, особенно если аппаратура имеет несколько измерительных каналов, позволяющих измерять разность потенциалов одновременно с нескольких приемных линий. Аппаратура работает в режимах электротомографии, вызванной поляризации, электропрофилирования и вертикального электрического зондирования. Результаты измерений представляются в виде разрезов и карт (в случае площадных наблюдений) распределения удельного электрического сопротивления (УЭС). Прибор смонтирован в компактном (43×28×33 см) ударопрочном плавающем корпусе. Вес аппаратуры 12 кг.

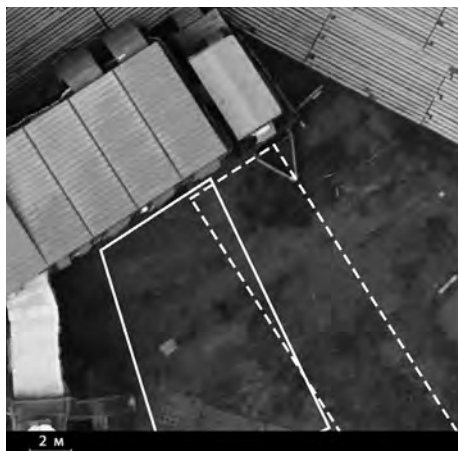


*Рис. 3. Программно-аппаратурный комплекс Скала-48 (Siber), реализующий метод электротомографии (ИНГГ СО РАН, КБ Электрометрии, 2014 г.)*

В дополнение к внутреннему аккумулятору (12 В, 7 А·ч) через разъемы на лицевой панели к прибору можно подключить внешнее питание (12 В) [ссылка].

Основа аппаратуры – микроконтроллер Philips NXP LPC2378 с ядром ARM7 и программируемая логическая матрица (ПЛМ) Xilinx Spartan-3E). Аппаратура включает матричный релейный коммутатор 4 линии на 48, осуществляющий коммутацию, как приемных, так и питающих линий. Такая конфигурация рассчитана на работу с двумя электроразведочными кабелями, по 24 электрода каждый. Для их подключения на лицевой панели прибора предусмотрены два разъема. Дополнительно на панель выведены клеммы питающей и приемной линий, предназначенные для работы с традиционной четырехэлектродной установкой и выносными электродами.

Источник тока изолирован от всей схемы и имеет мощность до 200 Вт. Максимальный выходной ток источника 1,5 А, максимальное напряжение 750 В. Входные цепи защищены от перенапряжения до 1000 В, а выходные – от короткого замыкания. Измерительный канал выполнен с применением изолирующего усилителя постоянного тока, аналогичный канал используется и для измерения рабочего тока. В аппаратуре применяется прецизионный 24х-разрядный сигма-дельта АЦП AD7799.



*Рис. 4. Ортофотоплан дизель-генераторной установки НИС о. Самойловский. Четырехугольники соответствуют площадкам исследования [3]*

Диапазон регистрируемых напряжений в измерительной линии лежит в пределах от 0,05 мВ до 200 В. Точность измерения полезного сигнала не хуже 2,5% и зависит от величины питающего тока. Диапазон усиления входного усилителя изменяется автоматически.

### **Методика наблюдений**

До начала измерений была произведена проверка работоспособности генератора и приемных катушек. Последующие измерения проводились на всех частотах аппаратуры ЭМС.

Работы были проведены на объекте, подверженном постоянному антропогенному воздействию вблизи дизельной установки. Площадка № 1 в нумерации объектов 2014 г. Ее расположение в плане станции представлено на рис. 4.

Площадка 2014 г. (пунктирная линия на рис. 4) имеет размеры 18×5 м, шаг измерений по профилю фиксирован и составляет 0,5 м, расстояние между профилями 1 м. Количество точек измерений 3108. Площадка 2015 г. (сплошная линия на рис. 4) имеет размеры 16×7,5 м, шаг измерений по профилю фиксирован и составляет 0,5 м, расстояние между профилями 0,5 м. Количество точек записи 7392.

### **Результаты трехлетнего мониторинга состояния многолетнемерзлых пород вблизи дизель-генераторной установки**

Мониторинговые работы по геоэлектрическому исследованию многолетнемерзлых пород на данной площадке проводились три года (рис. 5, а).

Повторные измерения проводились в августе 2014, 2015 гг., а затем в июле 2016 г.

По результатам работ построены разрезы кажущихся величин УЭС, полученные по данным метода частотного индукционного зондирования и электротомографии. Распределение кажущееся

гося сопротивления на разрезах 2014 г. представлено на рис. 6. На всех разрезах присутствуют близповерхностные аномалии пониженного сопротивления, по которым можно идентифицировать верхнюю границу мерзлых пород. Аномалии протаивания, расположенные на разрезах на 5, 8 и 12 м по профилю, на поверхности выражаются в наличии растительности, что может быть свидетельством увеличения мощности оттаявшего слоя [5]. Это ярко проявляется на разрезах ЧЗ (левая часть рис. 5). На всех построенных разрезах присутствуют мощные аномалии, относящиеся к опорной свае в левой части площадки. Также на разрез  $Y=0$  в правой части наблюдается влияние правой сваи.

Для учета влияния опорной сваи на результаты измерений было проведено физическое моделирование, которое показало, что влияние металлических конструкций становится пренебрежимо мало уже на расстоянии 2 м от них.

В ходе работ по мониторингу в 2015 г. площадку наблюдений пришлось сместить относительно площадки 2014 г. в связи с установкой временного дизельного генератора (рис. 5, б).

По результатам повторных измерений построены разрезы кажущихся величин УЭС, полученные по данным метода частотного зондирования. На рис. 7 изображены результаты сопоставления повторных измерений. На правые разрезы также вынесены данные о фактической глубине мерзлых пород, по данным шупа. Как мы видим граница твердых пород хорошо коррелирует с изоповерхностью 100 Ом·м. Отталкиваясь от данного вывода возможна оценка увеличения объема нарушенных (протаявших) пород (рис. 8).

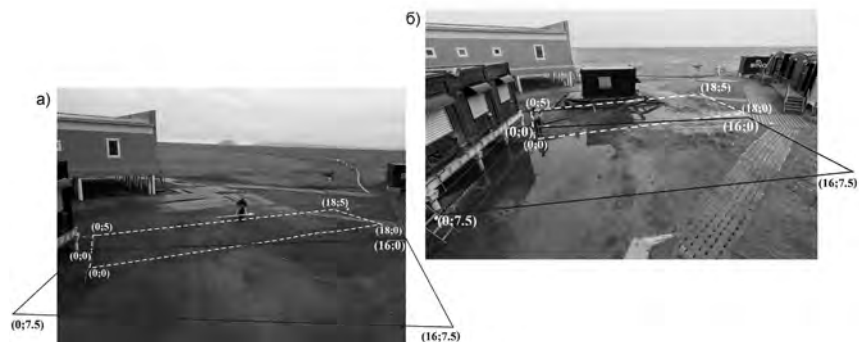


Рис. 5. Сравнение внешнего состояния объекта на моменты времени, соответствующие августу 2014 г. (а) и августу 2015 (б). Белыми и черным прямоугольниками обозначена площадь исследований 2014 и 2015 гг. Локальные координаты углов даны в метрах

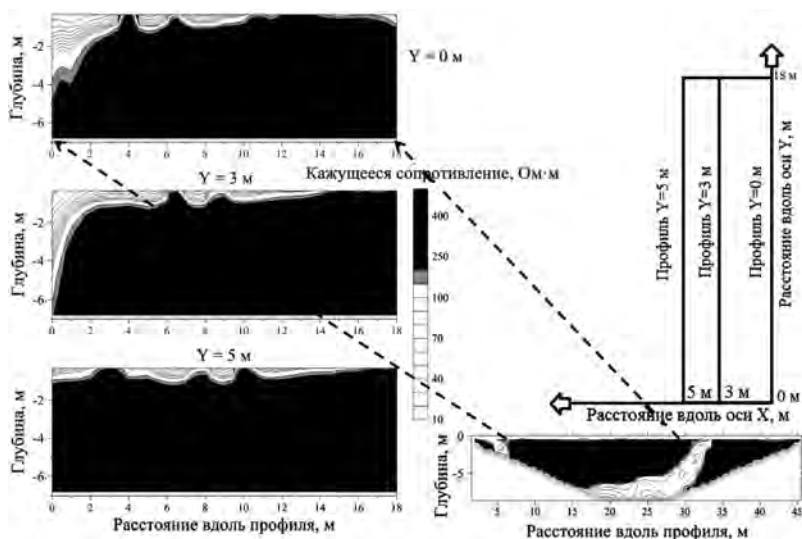


Рис. 6. Результаты трансформации данных частотного зондирования (7 августа 2014 г.), и разрез электротомографии на объекте исследования

За период с 2014 по 2016 гг. заметно увеличилась область протайки, что видно даже при визуальном осмотре площади работ. По данным частотного зондирования глубина протайки в зоне свободной от помех, связанных с опорными столбами, но все еще подвергающейся непрерывному воздействию вентиляции, увеличилась на 0,5 м по глубине.

Протяженность измененной области (4–6 м по профилю) увеличилась на 30–50 см. Появилась дополнительная зона углубления мерзлых пород (8 м). Увеличился общий объем протайки по площадке. Последующий прогресс техногенной деградации мерзлоты на объекте может в будущем привести к аварийно-опасной ситуации.

Работы, выполненные методом частотного зондирования в 2016 г. (рис. 9) показали, что глубина деградации многолетне-мерзлых пород уменьшилась. Однако достоверно сказать, что это связано с уменьшением антропогенного влияния нельзя, поскольку измерения производились на месяц раньше по сравнению с предыдущими годами. В этой связи необходимо произвести измерения вновь в августе 2017 г. Тем не менее, определенные выводы по результатам исследований 2016 г. сделать можно: пунктирной линией на рисунках обозначена граница активного слоя, построенная по данным шупа. Из разрезов мы

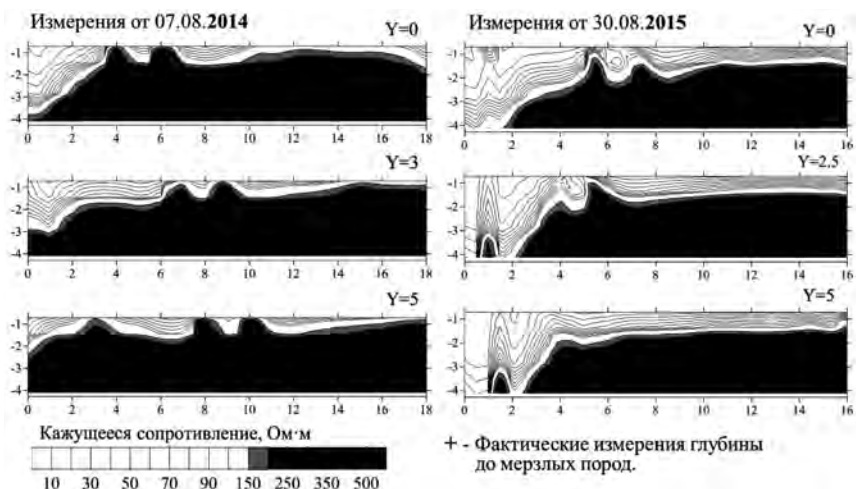


Рис. 7. Результат трансформации данных ЧЗ, слева 2014 г, справа состояние на 2015 г.

видим достаточно хорошее совпадение границ протайки, особенно на профилях с увеличенной мощностью этого слоя. Аномалии повышенного электрического сопротивления в верхней части разрезов (на разрезе  $Y = 5$  м – 11,5 м, и 8,5–10,5 м для  $Y = 7,5$  м) приурочены к дорожному настилу на дневной поверхности. По сравнению с августом 2015 г. средняя протайка на площадке уменьшилась на 37 см. В то же время по данным предоставленным Günter Stoof следует что изменение протайки в 300 м от станции за 2015–2016 гг. на момент измерений составляло всего 5 см (42,4 см в 2015 г. и 37,5 см в 2016 г.)

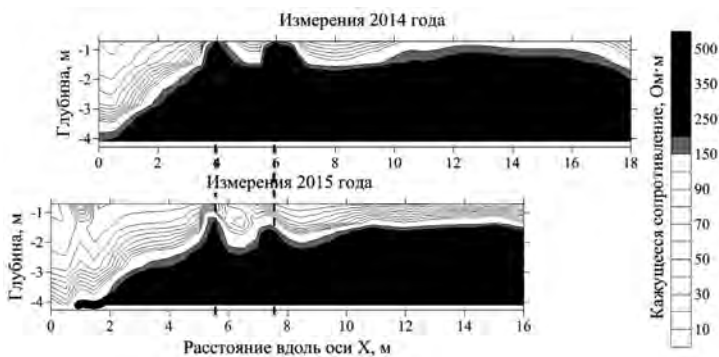


Рис. 8. Сравнение результатов трансформации данных ЧЗ 2014 и 2015 гг. Пунктиром показано геометрическое соответствие профилей



## Обсуждение результатов

Выполненные за три года работы позволили адаптировать к условиям Крайнего Севера два современных метода мало-глубинной электроразведки. При этом оба метода продемонстрировали свою высокую эффективность и подтвердили работоспособность в ситуации, когда значения УЭС исследуемой среды находятся в экстремально высоком диапазоне. Данный результат важен в первую очередь с методической точки зрения, поскольку нами была доказана работоспособность методов на постоянном и переменном токе (контактных и бесконтактных) в условиях многолетнемерзлых пород.

Возник ряд вопросов, связанных с результатами инверсии обоих данных методов: на полученных геоэлектрических разрезах имеется несколько аномальных артефактов, не связанных с изучаемой средой. В случае с данными ЭМС большая часть этих аномалий имеет объяснимую природу: наличие металлических конструкций в непосредственной близости от точки исследования. В то же самое время, аномалии, возникающие на геоэлектрических разрезах по данным метода электротомографии в ряде случаев трудно объяснить без дополнительной камеральной исследовательской работы: выполнении комплексного трехмерного моделирования при помощи специального

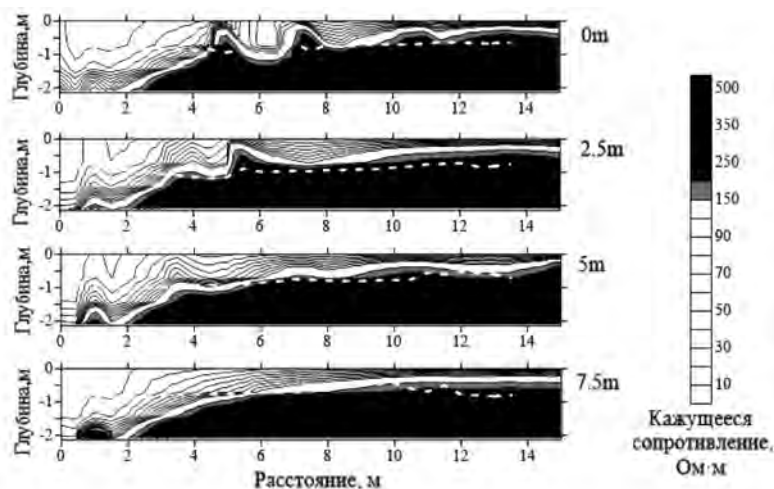


Рис. 9. Геоэлектрические разрезы кажущегося УЭС для площадки на территории научно-исследовательской станции Самойловский построенные по данным индукционного зондирования в 2016 г.

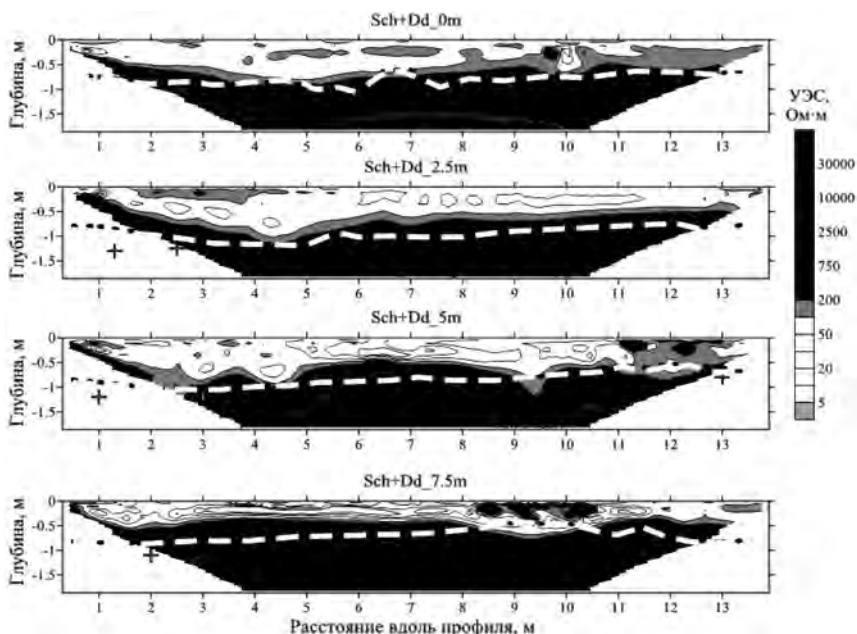


Рис. 10. Геоэлектрические разрезы УЭС для площадки, примыкающей к дизель-генератору научно-исследовательской станции Самойловский построенные по данным электротомографии. Пунктирной линией обозначена граница активного слоя построенная по данным шупа [3].

программного обеспечения [6]. Данное программное обеспечение имеется в наличии в ИНГГ СО РАН и в настоящее время идет интенсивная работа по расчету геоэлектрических моделей среды. Результаты этой работы будут опубликованы отдельно.

### Заключение

Проведенные исследования показали перспективность методов малоглубинной электроразведки (частотного зондирования и электротомографии) в условиях многолетнемерзлых пород. Кроме того, была подтверждена эффективность этих методов при решении задач мониторинга состояния многолетнемерзлых пород в условиях антропогенного воздействия. Это открывает широкие перспективы для вышеупомянутых методов в качестве инструментов получения дополнительной информации при инженерных изысканиях в условиях Крайнего Севера.

Возникшие в ходе работ вопросы по результатам инверсии данных обоих методов предстоит решить при помощи специа-

лизированного программного обеспечения, разработанного в ИНГГ СО РАН.

Работы по мониторингу состояния многолетнемерзлых пород на «НИС о. Самойловский» будут продолжены в рамках работ Стратегической академической единицы (САЕ) НГУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А.* Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне (на примере РВС 20 000) / Материалы пятой конференции геокриологов России, пленарные доклады, статья в сборнике трудов конференции. — С. 259–265.

2. *Сергеев К. С., Рыжков В. И., Белоусов А. В., Бобачев А. А., Сафиуллин Р. И.* Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инженерные изыскания. — 2015. — № 10–11. — С. 46–53.

3. *Фаге А. Н., Суродина 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 Международный научный конгресс, 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: сборник материалов в 4 т. Т. 2. — Новосибирск: СГУГиТ, 2016. — С. 253–258.

4. *Булгаков А. Ю., Маништейн А. К.* Геофизический прибор для автоматизации многоэлектродной электроразведки // Приборы и техника эксперимента. — 2006. — № 4. — С. 123–125.

5. *Boike J., Georgi C., Kirilin G.* Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia – observations and modeling (Lena River Delta, Siberia) // Biogeosciences, 12, 5941–5965, 2015, doi: 10.5194/bg-12-5941-2015.

6. *Фаге А. Н., Суродина И. В., Фадеев Д. И., Кабанов В. А., Ельцов И. Н., чл.-корр Каширцев В. А.* Локализация таликовых зон под термокарстовыми озерами по данным метода электротомографии и трехмерного численного моделирования с использованием графических процессоров // Доклады Академии Наук, в печати. **ИАГ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Фаге Алексей Николаевич*<sup>1,2</sup> — младший научный сотрудник, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru,

*Фадеев Денис Игоревич*<sup>1,2</sup> — младший научный сотрудник, аспирант, e-mail: fadeevdi@ipgg.sbras.ru,

*Ельцов Игорь Николаевич*<sup>1,2</sup> — доктор технических наук, доцент, e-mail: yeltsovin@ipgg.sbras.ru,

Новосибирский государственный технический университет,

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН,

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

**A.N. Fage, D.I. Fadeev, I.N. El'tsov**

**ELECTROMAGNETIC MONITORING  
OF ANTHROPOGENIC PERMAFROST DEGRADATION  
AT SAMOYLOV POLAR RESEARCH STATION**

A three-year monitoring has been conducted on the area adjacent to diesel-electric power plant at Samoylov polar research station (Bulunskiy ulus, republic of Sakha (Yakutia)). In the course of this monitoring two methods have been used: multifrequency sounding and electrical resistivity tomography. Both methods are characterized by low (close to zero) impact on the environment, high resolution and informative value as well as low human effort requirements. The results of this study have shown high confidence level of the applied geophysical methods as well as their good prospects for use in future work aimed at engineering surveys in permafrost regions.

Key words: permafrost degradation, electrical resistivity tomography, multifrequency sounding, environmental anthropogenic impact.

**AUTHORS**

Fage A.N.<sup>1,2</sup>, Junior Researcher, e-mail: faguetan@ipgg.sbras.ru,  
Fadeev D.I.<sup>1,2</sup>, Junior Researcher, Graduate Student, e-mail: fadeevdi@ipgg.sbras.ru,  
El'tsov I.N.<sup>1,2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: yeltsovin@ipgg.sbras.ru,  
Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia,  
<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia,  
<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia.

**REFERENCES**

1. Ibragimov E. V., Kronik Ya. A. *Materialy pyatoy konferentsii geokriologov Rossii, plenarnye doklady, stat'ya v sbornike trudov konferentsii* (Proceedings of the 5th Conference of Geocryologists of Russia), pp. 259–265.
2. Sergeev K. S., Ryzhkov V. I., Belousov A. V., Bobachev A. A., Safiullin R. I. *Inzhenernye izyskaniya*. 2015, no 10–11, pp. 46–53.
3. Fage A. N., Surodina I. V., El'tsov I. N. *Interekspo GEO-Sibir'-2016. XII Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress*, 18–22 aprelya 2016 g., Novosibirsk: sbornik materialov v 4 t. T. 2 (InterExpo GEO-Sibir 2016: XII International Conference Proceedings, April 18–22, 2016, Novosibirsk. Collection of materials, in 4 vol., vol. 2), Novosibirsk, SGUGiT, 2016, pp. 253–258.
4. Bulgakov A. Yu., Manshteyn A. K. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2006, no 4, pp. 123–125.
5. Boike J., Georgi C., Kirilin G. Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia observations and modeling (Lena River Delta, Siberia). *Biogeosciences*, 12, 5941–5965, 2015, doi: 10.5194/bg-12–5941-2015.
6. Fage A. N., Surodina I. V., Fadeev D. I., Kabanov V. A., El'tsov I. N., Kashirtsev V. A. *Lokalizatsiya talikovykh zon pod termokarstovymi ozerami po dannym metoda elektrotomografii i trekhmernogo chislennogo modelirovaniya s ispol'zovaniem graficheskikh protsessorov*. Doklady Akademii Nauk (Localization of thaw zones under cave-in lakes based on electrotomography data and 3D numerical modeling using graphic processors: Proceedings of the Academy of Sciences).