

# РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

В современных условиях, при постоянном повышении требований и сокращении сроков выполнения проектно-изыскательских работ, чрезвычайно актуален рациональный выбор методов инженерно-геологических изысканий, позволяющих получать необходимую информацию с меньшими затратами ресурсов и времени. При инженерно-геологических изысканиях в районах распространения многолетнемерзлых грунтов весьма перспективны геофизические методы, повышающие информативность и достоверность инженерных изысканий в сложных условиях криолитозоны. Они указывают, как правильно сформулировать конкретные задачи по изучению геологического и геокриологического строения трассы проектируемого строительства, оценить риски опасных геокриологических процессов. Наиболее информативными геофизическими методами изучения криолитозоны являются электроразведочные технологии, основанные на использовании переменных электромагнитных полей (ЗСБ, ЧЗ, ДЭМП, ДЗ, ДИП). В последнее время эти технологии все шире применяются для решения геокриологических задач вместо традиционных методов постоянного тока (ВЭЗ, ЭП) и сейсморазведки (МПВ, МОВ). Использование переменных электромагнитных полей позволило отказаться от заземлений антенн, поскольку осуществляется индукционное возбуждение и регистрация электромагнитного поля, и получать информацию ниже кровли ММП, поскольку высокоомные среды не являются экраном для переменных электромагнитных полей.

Коллективом сотрудников геологического факультета МГУ разработана теоретически и успешно внедрена новая технология малоглубинных частотных зондирования (ЧЗ) для решения инженерно-геокриологических задач на глубинах от 1 до 30–50 м. Созданная при этом аппаратура была успешно применена и в технологии ДЭМП (дипольное электромагнитное профилирование).

В основе метода лежит зондирование исследуемого подповерхностного пространства (в частности, криолитозоны) периодическими импульсными электромаг-

нитными сигналами на частотах от нескольких килогерц до нескольких мегагерц через передающую антенну (генераторную петлю) и измерение с поверхности участка горизонтальной  $H_r$  и вертикальной  $H_z$  составляющих напряженности магнитного поля  $H$  приемной антенной на этих же частотах. В зависимости от состояния исследуемого подповерхностного слоя (многолетнемерзлые породы (ММП), подтаявшие почвы (талики) и т.д.) величины  $H_r$  и  $H_z$  будут иметь различные значения, и по их соотношению  $H_r/H_z$  можно с большой долей достоверности выявить структуру исследуемой геофизической среды до глубин 30–50 м.

Установка для проведения работ как методом ЧЗ, так и при ДЭМП включает две петлевые антенны (рамки) диаметром около 1 м, расположенные на расстоянии  $r$  (20–100 м) друг от друга (рис. 1).

Генераторная петля подключается к генератору, вырабатывающему ток на фиксированных частотах в диапазоне от первых килогерц до первых мегагерц, а измерительная – к измерителю, настроенному на частоту генератора. Геометрия установки (в данном случае расстояние  $r$ ) остается неизменной на протяжении всех измерений. Установка ориентируется вдоль профиля наблюдений и размещается по нему с шагом, в несколько раз меньшим расстояния  $r$ . Точка записи (к которой относятся результаты наблюдения) находится в центре установки (посередине между петлями).

Генераторная петля размещается в горизонтальной плоскости на расстояниях, в несколько раз превышающих диаметр петли; создаваемое ею поле эквивалентно полю вертикального магнитного диполя. Измерительная петля может располагаться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, перпендикулярной  $r$ . Поскольку петля является датчиком той компоненты магнитного поля, которая ортогональна плоскости петли, то в первом случае измеряется компонента  $H_z$ , а во втором –  $H_r$  (начало цилиндрической системы координат находится в центре питающей петли, ось  $z$  направлена вниз, ось  $r$  – по поверхности Земли). Интенсивность создаваемого ге-

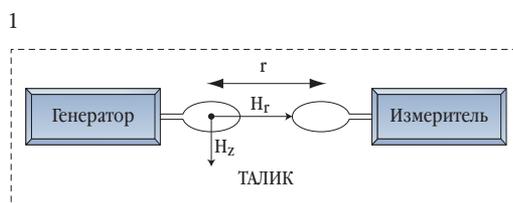


СХЕМА УСТАНОВКИ  
ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

2



ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ МЕТОДОМ ЧЗ (ЛЕТО 2009 ГОДА, ЯМАЛ)

нераторной петлей поля, и коэффициент, связывающий напряженность поля с разностью потенциалов в измерительной петле, прямо пропорциональны числу витков в генераторной и измерительной петлях. Поэтому петли используются многовитковые.

Выбор частоты и расстояния  $r$  определяет также глубинность исследований. Глубинность растет с ростом  $r$  (не превышает  $r/2$ ) и уменьшается с ростом частоты.

От другого распространенного метода профилирования – метода электропрофилирования на постоянном токе (ЭП), метод ДЭМП имеет два отличия, которые при определенных условиях превращаются в важные преимущества:

1. Метод ДЭМП хорошо чувствует проводящие области и почти «не замечает» изменения сопротивления вмещающей высокоомной среды, в то время как метод ЭП почти одинаково чувствителен к проводящим и к непроводящим областям. Благодаря этому при картировании хорошо проводящих тел графики ДЭМП обычно более просты и наглядны, чем графики ЭП.

2. Метод ДЭМП не требует заземлений, что важно при проведении работ в условиях, когда приповерхностный слой сложен скальными или мерзлыми породами. Кроме того, это позволяет проводить съемку в движении (с судов, автомобилей, самолетов).

Комплект аппаратуры состоит из генератора и измерителя. Генератор последовательно подает в генератор-

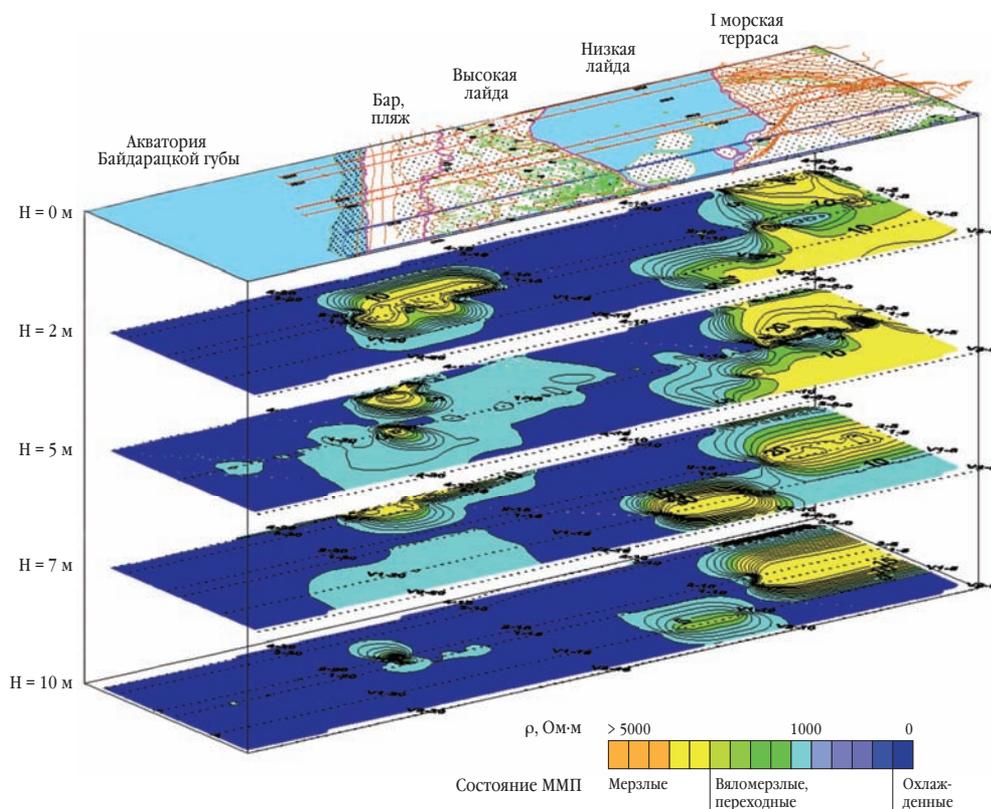
ную многовитковую антенну прямоугольные разнополярные импульсы тока различной частоты (от 4 до 1024 кГц). Измеритель синхронно с генератором измеряет с помощью приемной многовитковой антенны магнитное поле на тех же частотах. Измерение всего ряда частот происходит в автоматическом режиме и занимает 80 секунд (5 секунд на одну частоту). Аппаратура позволяет работать как в режиме частотных зондирований (ЧЗ), так и в режиме ДЭМП. В последнем случае на генераторе и измерителе фиксируется только одна частота.

Контроль качества измерения осуществляется оператором на точке измерения. На графическом дисплее измерителя отображается кривая ЧЗ (зависимость измеряемого напряжения от частоты). 16-кнопочная клавиатура позволяет при сохранении данных добавлять текстовую строку, просматривать данные, осуществлять их редакцию и задавать различные настройки аппаратуры. Общие характеристики аппаратного комплекса:

- генератор – 235 × 170 × 80 мм, вес 5 кг;
- измеритель – 235 × 170 × 80 мм, вес 5 кг;
- 2 петлевые антенны диаметром 1 м.

Аппаратура способна в автономном режиме работать в течение 12 часов при температуре от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Измерение всего ряда частот происходит в автоматическом режиме и занимает 80 секунд (5 секунд на одну частоту). Данные частотных зондирований, переданные на компьютер, с помощью программного обеспечения EM-1D (геологический факультет МГУ)





ОБЪЕМНАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ММП (ЯМАЛЬСКИЙ БЕРЕГОВОЙ УЧАСТОК)

позволяют осуществить 1D-инверсию полевых данных в последовательность значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) среды, по которым строится объемная модель среды.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ТЕХНОЛОГИИ МАЛОГЛУБИННЫХ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Геофизические исследования технологией мало-глубинных частотных зондирований в районе перехода газопровода Бованенково – Ухта через Байдарацкую губу выполнялись в зимний период 2007 года со льда акватории Байдарацкой губы и на береговой части Ямальского и Уральского участков. Геофизические исследования проводились в рамках инженерно-геологических изысканий на стадии «проект» (1–4-я нитка). Работы проводились для картирования ММП в сторону акватории Байдарацкой губы. Изучение развития мерзлых пород на акватории проводилось до изобаты 5 м и до глубины 20 м. Для изучения глубин до 20 м выполнялись частотные зондирования с разносами между генераторной и измерительной антеннами 40 м. Для проведения работ требовалось два оператора (для обслуживания генератора и измерителя). Производительность работ составляла от 80 до 100 точек ЧЗ в день.

По данным ЧЗ была построена модель развития и состояния ММП на Ямальском береговом участке (рис. 3).

Результаты геофизических исследований сыграли важную роль при подготовке документации и выбора мест выхода газопровода с моря на сушу. По данным ЧЗ был зафиксирован в пространстве «козырек» мерзлых пород, распространяющийся от суши в сторону акватории, который существенно ограничивает возможности прокладки трубопровода и представляет опасность для строительных работ.

В 2009–2010 годах инженерно-геофизические исследования выполнялись в летний период в рамках инженерно-геологических изысканий на стадиях «рабочая документация» (3–4-я нитка) и «мониторинг» (1–2-я нитка). В настоящее время первая нитка газопровода уже построена. По геофизическим данным была оценена современная геокриологическая обстановка в районе перехода газопроводом границы суша – море, зафиксировано влияние строительных работ на ММП в районе перехода. Отдельной задачей в комплексе инженерно-геофизических исследований 2009–2010 годов являлась задача изучения геоэлектрического строения коффердамов 1, 2-й ниток. На Ямальском береговом участке по результатам геофизических исследований удалось зафиксировать границы распространения ММП в районе коффердама, а также тело отсыпки коффердама. Причем аномалии повышенного сопротивления внутри коффердама соответствуют распространению крупнообломочного материала на входе и выходе трубы из коффердама. Таким образом, по модели распределения УЭС в коффердаме можно фиксировать положение и качество отсыпки коффердама.



На данном участке планируется развернуть сеть мониторинговых скважин. В скважинах предполагается организовать измерения температуры и удельного электрического сопротивления (УЭС). Для Ямальского и Уральского береговых участков Байдарацкой губы измерения только температуры грунтов не всегда достаточно для оценки состояния грунтов. Так, в криопэгах зафиксирована температура  $-4^{\circ}\text{C}$ . Удельные электрические

сопротивления мерзлых грунтов для данного участка характеризуются значениями 3000–5000 Ом·м, тогда как талых 20–1 Ом·м в зависимости от засоления. Таким образом, измерения температуры и УЭС позволят наиболее достоверно фиксировать состояние ММП на участке перехода. Термометрические и электрические измерения предполагается визуализировать в Москве в реальном времени с помощью GPS-канала.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР ООО «МГУ-ГЕОФИЗИКА»,  
СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК КАФЕДРЫ ГЕОКРИОЛОГИИ  
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

К. Г.-М. Н.

А.В. Кошурников