

В работе рассматриваются теоретические, методические и аппаратные возможности для решения инженерно-геокриологических задач на примере многолетних геофизических исследований в районе проектируемого перехода газопровода Бованенково-Ухта Байдарецкой губы Карского моря. Сделаны обобщения о достоинствах и недостатках использования различных геофизических технологий. Показаны возможности современных геофизических методов при решении инженерно-геокриологических задач.

ЮРИЙ ЗЫКОВ

Заведующий лабораторией кафедры
геокриологии геологического факультета МГУ

АНДРЕЙ КОШУРНИКОВ

Генеральный директор
ООО «МГУ-Геофизика»

ПАВЕЛ ПУШКАРЕВ

Доцент кафедры геофизики
геологического факультета МГУ

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГАЗОПРОВОДОВ

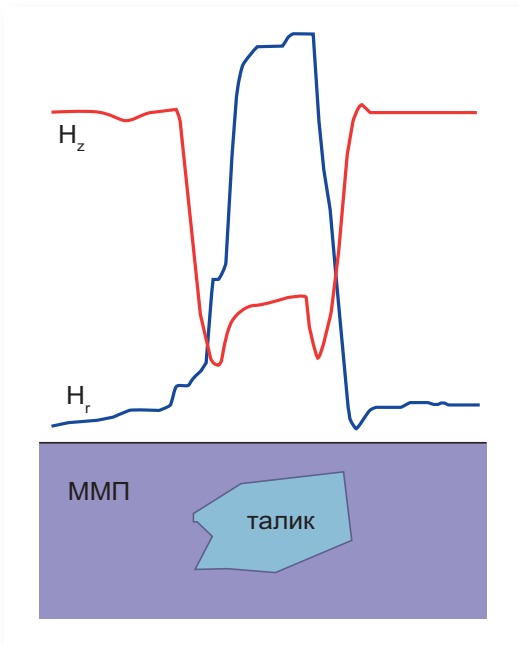


Рис.3. Графики H_z и H_r по профилю, пересекающему талик



Рис.6. Полевые работы методом малоглубинных ЧЗ. Измеритель электромагнитного поля с антенной

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА И ИЗМЕРИТЕЛЯ		
Рабочие частоты:	Высокие	512, 362, 256, 181, 128, 90.5, 64, 45.3 кГц
	Низкие	45.3, 32, 22.6, 16, 11.3, 8, 5.66, 4 кГц
Синхронизация приборов		Через Bluetooth, не реже 1 раз/сутки
Корпус:	Габариты	235 x 170 x 80 мм
	Исполнение	Стандарт IP-65
	Материал	Алюминиевый сплав
Источник питания		— Два внутренних аккумулятора 6 В, 7 А*ч — Внешний источник питания 9–15 В
Длительность работы от внутренних аккумуляторов		Не менее 12 часов
Диапазон рабочих температур		от - 20°C до + 50°C

При проектировании линейных сооружений в условиях криолитозоны необходима информация о талом и мерзлом состоянии грунтов. При этом особое внимание уделяется границе перехода суша-море, т.к. она относится к зоне несплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), талики и криопэги. Для решения задач литологического и геокриологического картирования были использованы частотные электромагнитные зондирования.

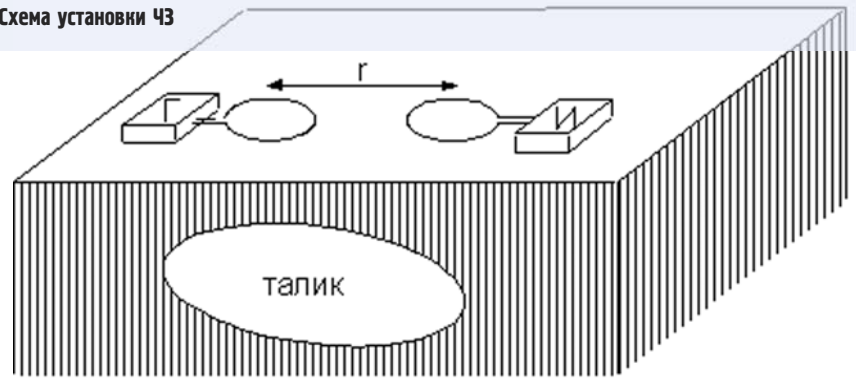
Методика малоглубинных частотных зондирований

Установка для проведения работ методом ЧЗ (рис.1) включает две петли (рамки) диаметром около одного метра, расположенные на расстоянии r (обычно 5–100 метров) друг от друга. Генераторная петля подключается к генератору (Г), вырабатывающему ток на фиксированной частоте в диапазоне от первых кГц до сотен кГц, а измерительная — к измерителю (И). Геометрия установки (в данном случае расстояние r) остается неизменной на протяжении всех измерений. Установка ориентируется вдоль профиля наблюдений и перемещается по нему с шагом, в несколько раз меньшим, чем расстояние r . Точка записи (к которой относят 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 генераторной петлей поля и коэффициент, связывающий напряженность поля с разностью потенциалов в измерительной петле, прямо пропорциональны числу витков в генераторной и измерительной петлях соответственно. Поэтому используются петли многовитковые.

При рассмотрении теории низкочастотных методов электроразведки используется квазистационарное приближение. В основе теории лежит решение прямой задачи о магнитном поле гармонического вертикального магнитного диполя на поверхности однородного полупространства. Решение этой задачи громоздко, поэтому приведем лишь

Рис.1. Схема установки ЧЗ



ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Гармоническим электромагнитным полем называют такое поле, характеристики которого меняются во времени по синусоидальному закону. При его рассмотрении применяется символический метод, заключающийся в представлении характеристик поля в следующем виде:

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\vec{E} \cdot e^{-i\omega t}), \quad \vec{H}(t) = \text{Re}(\vec{H} \cdot e^{-i\omega t})$$

Здесь $\vec{E}(t)$ и $\vec{H}(t)$ — мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей, $\vec{E}(t)$ и $\vec{H}(t)$ — их независимые от времени комплексные амплитуды, ω — круговая частота колебаний, t — время. Гармоническое электромагнитное поле на участках, где среда однородна, удовлетворяет уравнениям Гельмгольца:

$$\begin{cases} \Delta \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0, \\ \Delta \vec{H} - k^2 \vec{H} = 0, \end{cases}$$

где k — волновое число, причем

$$k = \sqrt{-i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma + \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon},$$

где σ — проводимость, ε — диэлектрическая проницаемость, μ — магнитная проницаемость среды. Магнитная проницаемость входит в оба стоящих под корнем слагаемых, в то время как проводимость входит лишь в слагаемое, пропорциональное частоте, а диэлектрическая проницаемость — в слагаемое, пропорциональное квадрату частоты. В электроразведке магнитными свойствами пород обычно пренебрегают, поэтому в дальнейшем мы будем считать магнитную проницаемость μ равной магнитной проницаемости вакуума $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Характер распространения электромагнитного поля существенно зависит от соотношения токов проводимости и токов смещения. Плотности токов проводимости и смещения связаны с электрическим полем следующими соотношениями:

$$\vec{j}^{PD} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad \vec{j}^{SI} = -i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \vec{E}$$

Соотношение токов проводимости и токов смещения зависит только от круговой частоты и электрических свойств среды:

$$|\vec{j}^{PD}| / |\vec{j}^{SI}| = \sigma / (\omega \cdot \varepsilon)$$

В волновом приближении, т.е. при низкой проводимости (высоком удельном сопротивлении) и высокой частоте преобладают токи смещения. В этом случае волновое число $k = \sqrt{-\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon}$. Поле распространяется как волна, имеющая скорость $v = 1 / \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon}$ и длину $\lambda = 2\pi \cdot v / \omega = 2\pi / \sqrt{\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon}$. Модуль волнового числа $|k| = 2\pi / \lambda$ может рассматриваться как пространственная частота.

В квазистационарном приближении, т.е. при высокой проводимости (низком удельном сопротивлении) и низкой частоте, преобладают токи проводимости. При этом $k = \sqrt{-i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma}$. Распространение поля имеет диффузионный характер, и электромагнитной волны в физическом смысле (как объекта, существующего независимо от источника за счет внутренних энергетических преобразований) нет. Колебательный процесс существует за счет смены знака тока в источнике. Однако термины «волна», «длина волны» применяются и в этом случае, причем длина волны $\lambda = 2\pi / \text{Im}(k) = 2\pi \sqrt{2} / |k|$. Величина $h_s = 1 / \text{Re}(k) = \sqrt{2} / |k| = \lambda / (2\pi)$ называется толщиной скин-слоя. Толщина скин-слоя характеризует глубину проникновения квазистационарного поля в среду (в Землю) и численно равна глубине, на которой поле затухает в e раз.

При искусственном возбуждении электромагнитного поля его характер, в основном, определяется величиной $|kr|$, где r — расстояние до источника поля. Так, если $|kr| \gg 1$ (высокая частота и проводимость среды, большое расстояние до источника) говорят о дальней зоне, а если $|kr| \ll 1$ — о ближней зоне.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА	
Максимальная выходная мощность	100 Вт
Максимальное выходное напряжение	100 В
Максимальный выходной ток	1 А (на самой низкой частоте диапазона)
Изменение тока с ростом частоты	Обратно пропорционально
Форма выходного тока	Прямоугольные разнополярные импульсы без паузы, с одинаковыми углами наклона фронтов
Нагрузка (питающие антенны)	Две многовитковые (высоко- и низкочастотная)
Вес	Не более 5 кг
Текстовый ЖКИ	4 строки x 20 символов
Клавиатура	4 кнопки
Разъемы	ВЧ-антенна, НЧ-антенна, питание

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ	
Диапазон входных напряжений	От -2 В до +2 В
Минимальный измеряемый сигнал	5 мкВ
Максимальное усиление	80 дБ
Число разрядов АЦП	16
Микропроцессор	АТmega128
Энергонезависимая память	4 Мбита, 1 000 измерений ЧЗ
Датчик	Многовитковая приемная антенна
Вес	Не более 5 кг
Графический ЖКИ	240 x 180 точек
Клавиатура	16 кнопок (4 x 4)
Разъемы	Приемная антенна, питание
Связь с внешним компьютером для сброса данных	Через Bluetooth

его результат. Магнитное поле имеет две компоненты (вертикальную и радиальную), которые записываются в виде

$$H_z = -\frac{M}{4\pi r^3} h_z, \quad H_r = -\frac{M}{4\pi r^3} h_r,$$

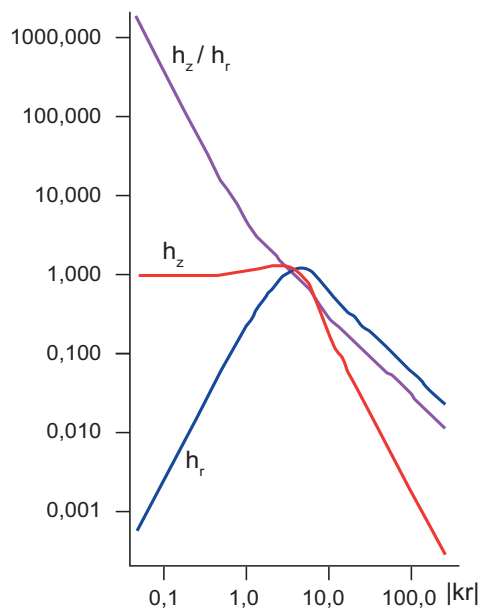


Рис.2. Зависимость h_z , h_r , h_z/h_r от $|kr|$

где H_z и H_r — магнитные числа, имеющие в данном случае вид

$$\begin{cases} h_z = \frac{2}{k^2 r^2} [9 - (9 + 9kr + 4k^2 r^2 + k^3 r^3) e^{-kr}] \\ h_r = k^2 r^2 (I_1 K_1 - I_2 K_2). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь M — момент питающего диполя ($M = S \cdot N \cdot I$, где S — площадь питающей петли, N — число витков в этой петле, I — сила вырабатываемого тока), k — волновое число полупространства, I_1, I_2, K_1 и K_2 — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода от комплексного аргумента $kr/2$.

Очевидно, что магнитные числа h_z и h_r являются функциями параметра kr . Результаты расчетов по формулам (1) в виде графиков модулей магнитных чисел показаны на рис.2.

В ближней зоне ($|kr| \ll 1$) структура рассматриваемого поля совпадает со структурой поля постоянного магнитного диполя. При этом h_z по своей абсолютной величине значительно превосходит h_r . Формулы (1) для асимптотического случая ближней зоны значительно упрощаются

$$\begin{cases} h_z \approx 1, \\ h_r \approx -\frac{k^2 r^2}{4}. \end{cases} \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что в ближней зоне h_z перестает зависеть от волнового числа полупространства k , а значит и от проводимости этого полупространства.

По мере перехода в дальнюю зону ($|kr| \gg 1$) картина меняется и h_r начинает превышать h_z . При этом формулы (1) принимают вид

$$\begin{cases} h_z \approx \frac{18}{k^2 r^2}, \\ h_r \approx \frac{6}{kr}. \end{cases} \quad (3)$$

Теперь оба магнитных числа через k зависят от проводимости полупространства.

При проведении работ методом электромагнитного профилирования (ЭМП) частоту и расстояние r выбирают такими, чтобы над ММП выполнялось условие ближней, а над тальми породами (за счет их высокой проводимости и, следовательно, большого значения k) — условие дальней зоны. В этом случае по изменениям H_r и H_z может проводиться картирование таликов, криопеггов. Действительно, если, например, вдали от талика $|kr| = 0.1$, а над таликом $|kr| = 100$, то над ММП компонента H_z будет больше H_r , в то время как над таликом будет наблюдаться обратная ситуация (рис.3).

Совместное рассмотрение компонент H_r и H_z повышает эффективность исследований, поскольку H_r в отдельности может принимать одно и то же значение для двух разных $|kr|$, а H_z в отдельности не зависит от разреза в области малых $|kr|$. Поэтому удобным параметром является отношение $H_z/H_r = h_z/h_r$, являющееся убывающей функцией $|kr|$ (рис.2). Это отношение позволяет также однозначно определить так называемое приведенное сопротивление $\tilde{\rho}$. Действительно, с помощью графика (рис.4) каждому измеренному значению H_z/H_r может быть сопоставлено соответствующее $|kr|$, которое затем пересчитывается в приведенное сопротивление по формуле $\tilde{\rho} = \omega \mu_0 r^2 / |kr|^2$.

Приведенное сопротивление имеет тот же смысл, что и кажущееся сопротивление в других методах электроразведки. В частности, над

однородным полупространством $\tilde{\rho}$ равно истинному сопротивлению этого полупространства.

Необходимо отметить, что выбор частоты и расстояния r определяет также глубинность исследований, которая растет с ростом r (не превышает $r/2$) и уменьшается с ростом частоты (не превышает h_b). Точнее говоря, она равна меньшему из этих двух чисел ($r/2$ и h_b).

Аппаратура для малоглубинных частотных зондирований

В компании «МГУ-Геофизика» совместно с геологическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова была создана и постоянно модернизируется аппаратура для малоглубинных частотных электромагнитных зондирований (ЧЭМЗ). Комплект аппаратуры состоит из генератора, измерителя и многовитковых рамок-антенн (рис. 4). Генератор последовательно подает в генераторную многовитковую антенну прямоугольные разнополярные импульсы тока различной частоты (от 4 до 512 кГц). Измеритель синхронно с генератором измеряет в приемной многовитковой антенне магнитное поле на тех же частотах. Измерение всего ряда частот происходит в автоматическом режиме и занимает 80 сек. (5 сек на одну частоту). Аппаратура позволя-

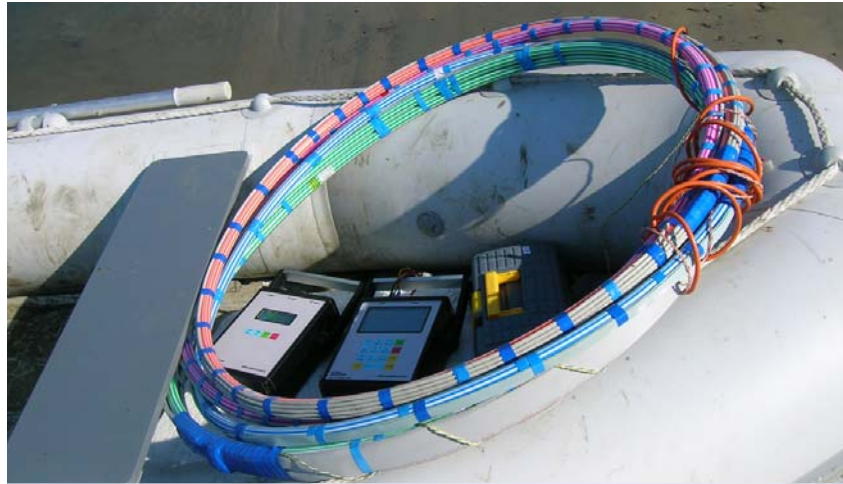


Рис.4. Аппаратурный комплекс ЧЭМЗ для малоглубинных частотных зондирований

ет работать как в режиме частотных зондирований (ЧЗ), так и в режиме (ЭМП), зафиксировав на генераторе и измерителе одну частоту. Основные характеристики аппаратного комплекса приведены ниже:

Контроль качества измерения осуществляется оператором на точке измерения. На графическом дисплее измерителя отображается кривая ЧЗ в зависимости E (вольт) от ω (кГц) или rk ($\text{Ом} \cdot \text{м}$) от ω (кГц). 16-ти кнопочная клавиатура позволяет при сохранении данных добавлять текстовую строку, просматривать данные, осуществлять их редакцию и задавать различные настройки аппаратуры.

После перезаписи данных частотных зондирований на компьютер программное обеспечение EM-1D (Пушкарев П.Ю.) позволяет осуществить 1D инверсию полевых данных в модельное УЭС и строить объемные модели среды.

Результаты работ технологией малоглубинных частотных зондирований в районе перехода газопровода Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу

Геофизические исследования технологией малоглубинных ча-



НЕЗАВИСИМАЯ ЭКСПЕРТИЗА ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ, ПРОГРАММ, СМЕТ И МАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

ОАО ПНИИС, основной институт в области инженерных изысканий в Российской Федерации, предоставляет услуги по проведению НЕЗАВИСИМОЙ экспертизы технических заданий, программ, смет и материалов инженерных изысканий. Большая часть нормативных документов, определяющих состав и порядок проведения инженерных изысканий, подготовлены в ОАО ПНИИС. Институтом разрабатываются и обновляются справочники базовых цен. Проводится работа по надзору за качеством проведения инженерных изысканий для крупных заказчиков, таких как ОАО «Газпром», ОАО «НК «Роснефть», ОАО «Транснефть» и других. Высококвалифицированные эксперты ОАО ПНИИС предоставляют консультации изыскательским организациям, их заказчикам, органам государственной власти исполнительной, законодательной и судебной.

ОБРАЩАЙТЕСЬ К НАМ, И МЫ ВАМ ПОМОЖЕМ

105187, Москва, Окружной проезд, д.18
Тел.: +7 (495) 366-3189, факс: +7 (495) 366-3190
E-mail: mail@pniis.ru www.pniis.ru


в ручной. Оператор измерителя оценивал качество получаемой кривой на каждой точке и сохранял измерение. Производительность работ на береговых участках (как Ямальском, так и Уральском) составляла 80 точек ЧЗ в день. Производительность работ на акватории Байдарацкой губы составляла 100 точек ЧЗ в день.

Наиболее актуальны данные геофизики были по Ямальскому береговому участку. Вследствие малых глубин акватории здесь распространение мерзлых пород («козырьков» ММП) представляло серьезную проблему для проектирования газопровода. Результаты 1D моделирования УЭС по Ямальскому береговому участку приведены на рис.7. По данным ЧЗ были построены модели развития и состояния ММП на Ямальском и Уральском береговых участках.

В заключение отметим, что выбор геофизических технологий должен определяться поставленной геологической задачей.

Метод ЧЗ (в случае профилирования — ЭМП) имеет несколько отличий от другого распространенного метода зондирования — метода вертикального электрического зондирования на постоянном токе — ВЭЗ (в случае профилирования ЭП), которые при определенных условиях превращаются в важные преимущества. Во-первых, метод ЧЗ (ЭМП) хорошо чувствует проводящие области и почти «не замечает» изменения сопротивления вмещающей высокоомной среды, в то время как метод ВЭЗ (ЭП) почти одинаково чувствителен к проводящим и к непроводящим областям. Благодаря этому при поиске и разведке хорошо проводящих тел (талики, криопэги) результаты ЧЗ (ЭМП) обычно более просты и наглядны, чем результаты ВЭЗ (ЭП).

Во-вторых, метод ЧЗ не требует заземлений, что важно при проведении работ в условиях, когда приповерхностный слой состоит из скальных или мерзлых пород.

И, в-третьих, полевые работы бесконтактными методами обладают гораздо большей производительностью и меньшей стоимостью, чем методы, требующие гальванических заземлений. 

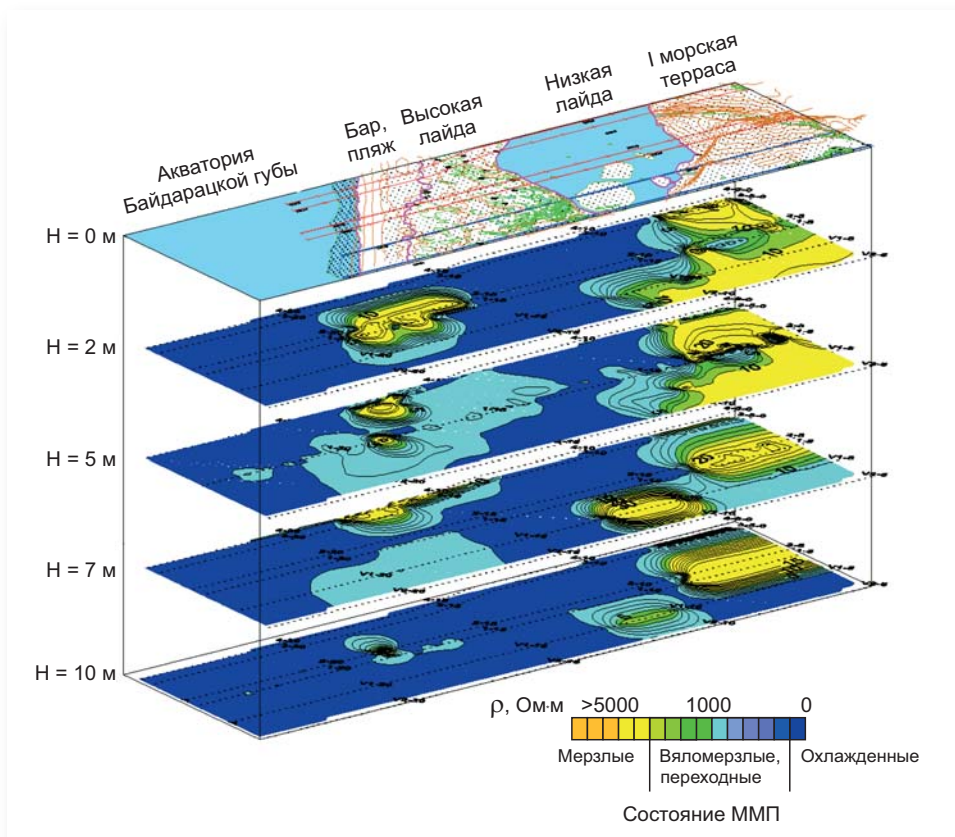


Рис.7. Модель состояния ММП по данным ЧЗ (Ямальский берег)

стотных зондирований в районе перехода газопровода Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу выполнялись в зимний период со льда акватории Байдарацкой губы и на береговой части Ямальского и Уральского участков. Работы про-

водились для картирования ММП в сторону акватории Байдарацкой губы. Изучение развития мерзлых пород на акватории проводилось до изобаты —5 м и до глубины 20 метров. Для изучения глубин до 20 м выполнялись частотные зондирования с разносами между генераторной и измерительной антеннами — 40 м и шагом по проектируемому ниткам газопровода — 20 метров. Антенны генератора (рис.5) и измерителя (рис.6) располагались на льду (или на снежном покрове для береговых участков) в горизонтальной плоскости (измерялась вертикальная составляющая магнитного поля диполя). Работы велись на всем частотном диапазоне аппаратуры от 4 до 512 кГц. На измерение одной точки ЧЗ и переход на следующую точку уходило две минуты. Через две минуты генератор автоматически начинал подачу сигнала в антенну. Для проведения работ требовалось два оператора. Оператор генератора располагал антенну на поверхности в горизонтальной плоскости и в случае задержек (если переход с точки на точку занимал более 40 секунд) переводил генератор из автоматического режима



Рис.5. Полевые работы методом малоглубинных ЧЗ. Генератор электромагнитного поля с антеннами