



А.К. Сараев
канд. геол.-мин. наук
Институт наук о Земле СПбГУ¹
доцент
a.saraev@spbu.ru



К.М. Анташук
Институт наук о Земле
СПбГУ¹
главный специалист
k.antashuk@spbu.ru



А.Е. Симаков
Институт наук о Земле
СПбГУ¹
главный специалист
a.simakov@spbu.ru



А.А. Шлыков
канд. физ.-мат. наук
Институт наук о Земле
СПбГУ¹
главный специалист
shlykovarseny@gmail.com

Перспективы применения электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником при поисках углеводородов в Арктическом регионе России*

1. Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9.

*Работа выполнена при поддержке ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ.

Рассмотрены возможности методов магнитотеллурических и аудиоманнитотеллурических зондирований (МТЗ-АМТЗ) при поисках углеводородов. Показана возможность существенного повышения информативности поисковых работ при использовании метода электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником: повышение точности и достоверности изучения интервалов локализации продуктивных коллекторов 1–5 км, получение данных об анизотропии пород, реализация на суше успешного варианта морских электромагнитных зондирований для обнаружения в разрезе продуктивных коллекторов, получение данных зондирований высокого качества в районах с повышенным уровнем промышленных помех. В Арктическом регионе России для зимних работ может применяться технология зондирований с бесконтактными приемными электрическими линиями. Работы с контролируемым источником более производительные по сравнению с измерениями естественных электромагнитных полей и обеспечивают получение надежных данных зондирований при нестабильности ближних ионосферных источников естественного электромагнитного поля. Рациональное комплексирование электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником и МТЗ-АМТЗ позволит получить полноценные данные на поисковых участках при оптимальных затратах средств и времени

Ключевые слова: магнитотеллурика; электромагнитные зондирования; контролируемый источник; поиск углеводородов

В настоящее время при поисках углеводородов (УВ) ведущую роль играют методы сейсморазведки, с помощью которых выявляются структуры, потенциально благоприятные для накопления нефти и газа. В последние годы при проведении поисковых работ возросли объемы исследований методами магнитотеллурических и аудиомангнитотеллурических зондирований (МТЗ-АМТЗ). Это связано с высоким уровнем нового поколения аппаратуры МТЗ-АМТЗ и детально разработанными методами и программными средствами обработки и интерпретации данных зондирований [1, 8, 12, 14]. В дополнение к сейсморазведке методы МТЗ-АМТЗ позволяют получать новую и необходимую для решения поисковых задач информацию об электрических свойствах пород. Применение методов МТЗ-АМТЗ, основанных на измерениях естественных электромагнитных полей, позволяет при поисках УВ решать следующие задачи [3, 13]:

- картирование осадочных бассейнов, выделение разломов, поиск ловушек разного типа, существенно дополняя данные сейсморазведки за счет возможности выявления площадей с улучшенными коллекторскими свойствами пород;
- разбраковка обнаруженных сейсморазведкой структур, выделение ловушек с повышенной пористостью и флюидонасыщенностью коллекторов для первоочередной проверки бурением;

- поиск УВ на участках развития солянокупольной тектоники и базальтовых покровов при наличии в разрезе жестких сейсмических границ, когда данные сейсморазведки имеют низкое качество;

- проведение поисковых работ в экологически чувствительных районах и труднодоступных местах при существенно меньшей по сравнению с сейсморазведкой стоимости работ.

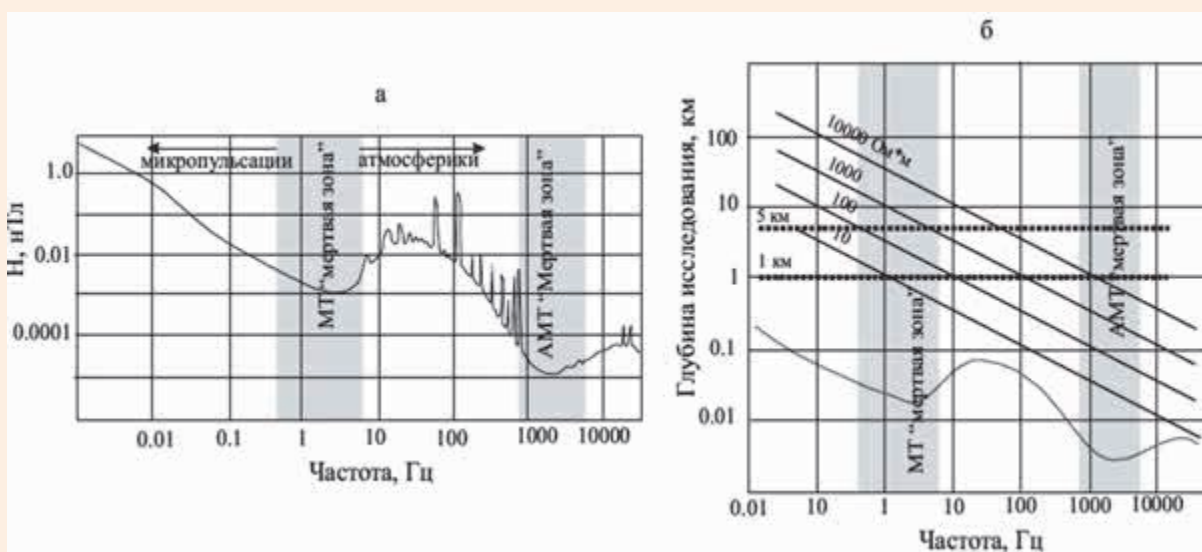
Эффективность методов МТЗ-АМТЗ при проведении поисковых работ может быть значительно повышена с использованием мощного контролируемого источника. В статье рассматриваются перспективы применения электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником при поисках УВ в Арктическом регионе России.

Проблемы методов МТЗ-АМТЗ

Одной из проблем методов МТЗ-АМТЗ является наличие в спектре используемых частот «мертвых зон» – МТ-«мертвой зоны» 0,5–7 Гц и АМТ-«мертвой зоны» 800–5000 Гц (*рис. 1а*), естественные поля в которых имеют пониженный уровень и получаемые данные зондирований характеризуются низким качеством [14]. В МТ-«мертвой зоне» происходит смена источников естественных электромагнитных полей, вызванных процессами в магнитосфере Земли, и возникновением микропульсаций магнитного поля для низких частот и вызванных грозовой активностью и возникновением сигналов грозовой при-

Рис. 1.

Особенности естественного переменного магнитного поля в диапазонах частот, соответствующих методам АМТЗ-МТЗ (а) и зависимость эффективной глубины исследования от частоты электромагнитного поля (б). Выделены интервалы частот, соответствующие МТ-«мертвой зоне» и АМТ-«мертвой зоне»



роды – атмосфериков – для более высоких частот.

В результате в интервале глубин 1–5 км (*рис. 2*), соответствующем МТ-«мертвой зоне» и перспективном для поисков УВ, не всегда качество данных зондирований позволяет надежно изучать геологический разрез. Эффективная глубина исследований на *рис. 1б* (равна $d/\sqrt{2}$, d – толщина скин-слоя) отвечает глубине, на которой плотность вихревых токов в земле максимальная.

Для повышения качества данных в МТ-«мертвой зоне» применяется технология работ с удаленной базовой станцией (*Remote Reference – RR*) [11] и используются специальные (робастные) методы обработки данных зондирований [7]. Базовая станция обычно устанавливается на удалении несколько десятков километров от участка работ. Локальные шумы, присутствующие в записях на рабочих станциях и базовой станции, некоррелируемы, что позволяет их отбраковывать при обработке данных синхронных измерений.

Применение технологии *RR* и робастных методов обработки позволяет существенно улучшить качество полевых данных по сравнению с использованием одноприборной технологии (*Single Station – SS*) (*рис. 2*). Пределы погрешностей на *рис. 2* для точек, соответствующих обработке по технологии *SS* для разных частот, показаны вертикальными линиями. Точки с небольшими погрешностями измерений по технологии *SS* могут отличаться от исправленной кривой по технологии *RR*. Значения погрешностей не дают надежного представления о правильном распределении измеряемых параметров, т.к. зависят, в том числе от выбранной при расчете модели сигнал/шум.

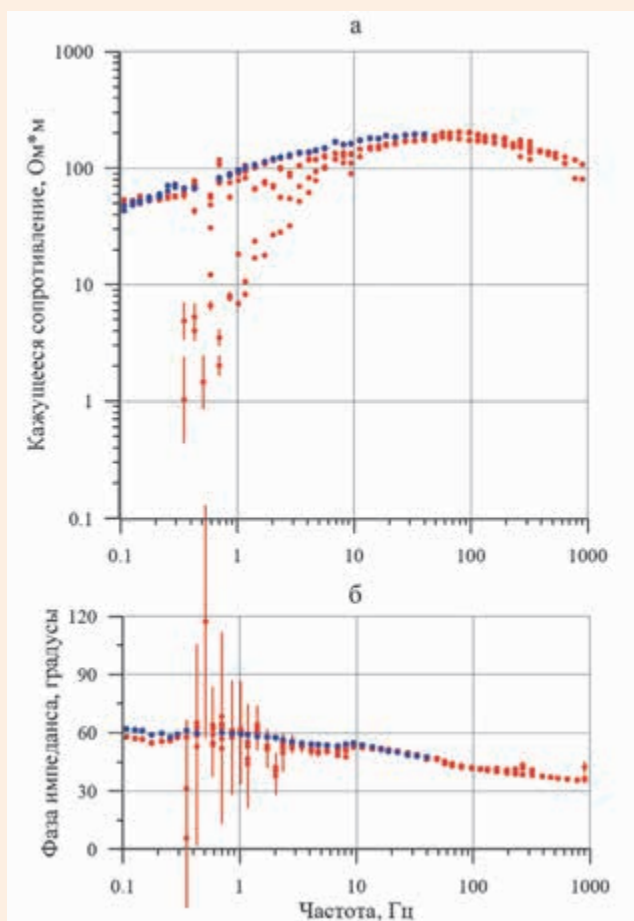
В результате исправленные по технологии *RR* кривые зондирований могут использоваться при изучении общих черт геоэлектрического строения территорий. Однако для исследования слабоконтрастных разрезов и выявления аномалий небольшой величины, связанных с изменениями свойств пород в зонах локализации коллекторов на больших глубинах, точности технологии *RR* недостаточно. При этом проблемой является выбор критериев, по которым исправленные по технологии *RR* кривые зондирований можно считать адекватными реальному геоэлектрическому разрезу. В ряде случаев использование различных программных пакетов или работа разных интерпретаторов приводят к различным результатам. В результате при

выделении слабоконтрастных аномалий в зонах локализации коллекторов методы МТЗ-АМТЗ, основанные на измерениях естественных электромагнитных полей, не позволяют получать достаточно надежные результаты.

Надежность изучения интервала глубин 1–5 км может быть существенно повышена при проведении зондирований в дальней зоне мощного контролируемого источника. Его применение возможно как непосредственно для зондирований, так и для получения опорных данных в конкретных геолого-геофизических условиях. Опорные данные могут использоваться для выбора параметров обработки данных МТЗ. При этом возможно рациональное комплексирование методов МТЗ и зондирований с контролируемым источником.

Применение контролируемого источника большой мощности необходимо для обеспечения условий измерений на достаточ-

Рис. 2. Сравнение исходных кривых МТЗ-АМТЗ, полученных по технологии *SS* (красные точки) с кривыми, полученными с использованием технологии *RR* и робастных процедур обработки данных (синие точки)



но больших удалениях точки наблюдения (5–8 км), когда первичное поле источника может быть аппроксимировано плоской вертикально падающей волной. При этом интерпретация данных зондирований проще и может быть выполнена с использованием хорошо разработанных методов и программных средств магнитотеллурики. Вместе с тем, как будет рассмотрено ниже, новые возможности для получения дополнительных данных о геоэлектрическом разрезе открываются при проведении работ на относительно небольших удалениях в промежуточной зоне источника.

Проведение работ в Арктическом регионе России методами МТЗ-АМТЗ имеет специфику, связанную с нестабильностью ближних ионосферных источников естественного электромагнитного поля. В этих условиях более надежные результаты зондирований обеспечит использование мощного контролируемого источника. Для проведения зимних работ, в том числе и в Арктическом регионе, разработана технология зондирований с использованием бесконтактных электрических антенн [5], пример применения которой рассмотрен ниже.

Существенной проблемой для методов МТЗ-АМТЗ также является влияние повышенного уровня промышленных помех. При проведении поисковых работ в промышленно освоенных районах получаемые данные часто имеют низкое качество, несмотря на применение технологии *RR* и робастных методов обработки, и непригодны для построения достоверных геоэлектрических разрезов. Применение мощного контролируемого источника может обеспечить получение данных зондирований высокого качества в этих условиях.

При проведении зондирований на низких частотах (до 0,01–0,1 Гц) для методов МТЗ-АМТЗ, основанных на измерениях естественных электромагнитных полей, требуется значительное время накопления данных (до 5–7 часов на одной точке зондирования). Это заметно снижает производительность работ. В случае использования мощного контролируемого источника время измерений на одной точке зондирования заметно меньше (1–1,5 часа) и производительность работ выше.

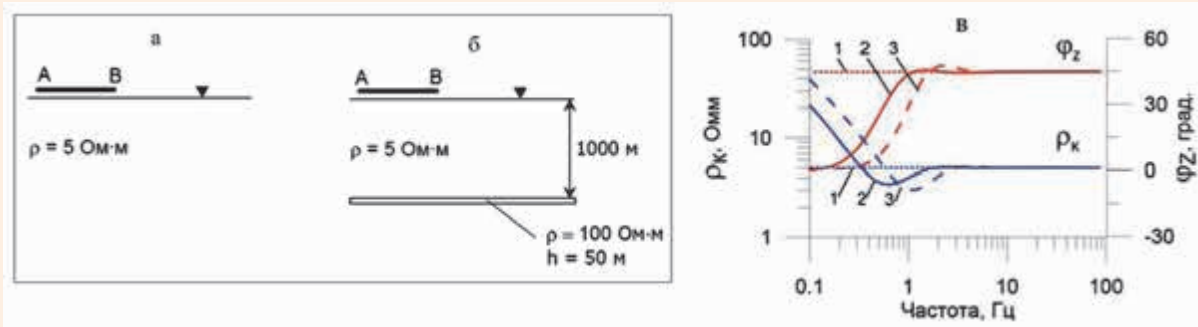
Новые возможности зондирований с контролируемым источником

При проведении работ в промежуточной зоне контролируемого источника могут быть получены дополнительные данные о геоэлектрическом разрезе. Возможности выделения тонких пластов высокого удельного сопротивления, связанных с коллекторами УВ, ранее были успешно использованы в морских работах методом *Controlled Source Electro Magnetics (CSEM)*. В начале 2000-х гг. началось бурное развитие направления, связанное с применением морской электроразведки при поисках УВ на шельфе. При этом применялась модификация с контролируемым источником – горизонтальным электрическим диполем, питаемым гармонически изменяющимся током, и донными приемными станциями [10].

Основная идея использования электрического диполя состоит в том, что в промежуточной зоне существенную роль играют вертикальные токи данного источника, чувствительные к наличию в разрезе горизонтальных плохо проводящих пластов. В результате удается выделять аномалии маломощных залежей УВ, которые при использовании стандартных подходов (зондирования с использованием естественных электромагнитных

Рис. 3.

Результаты моделирования для двух вариантов разреза: а – полупространство; б – полупространство с тонким пластом повышенного удельного сопротивления; в – кривые зондирования (расстояния условные; 1, 2, 3 – кривые зондирования для дальней зоны, промежуточной зоны при наличии тонкого пласта и без тонкого пласта, соответственно)



полей или работы в дальней зоне контролируемого источника) не отмечаются на кривых зондирований.

На **рис. 3** показаны результаты моделирования для двух вариантов геоэлектрического разреза: 1) полупространства с удельным сопротивлением 5 Ом·м, 2) полупространства с удельным сопротивлением 5 Ом·м при наличии в нем тонкого пласта с удельным сопротивлением 100 Ом·м мощностью 50 м на глубине 1000 м, аппроксимирующего залежь УВ. Графики 1 соответствуют зондированиям в дальней зоне контролируемого источника, графики 2 – полупространству при работах в промежуточной зоне источника, графики 3 – полупространству с тонким высокоомным пластом при работах в промежуточной зоне источника.

При работах в дальней зоне контролируемого источника или по данным МТЗ-АМТЗ разрешающей способности зондирований недостаточно, и выделить тонкий пласт не удастся (линии 1 на **рис. 3**, соответствующие кажущемуся сопротивлению ρ_k и фазе импеданса ϕ_z для модели поля в виде плоской вертикально падающей волны).

При проведении зондирований в промежуточной зоне кабеля конечной длины 2000 м (соосная установка, расстояние от заземления источника АВ до точки зондирования 4 км) кривые ρ_k и ϕ_z , соответствующие полупространству (2) и при наличии в нем тонкого пласта с повышенным удельным сопротивлением (3), заметно различаются в интервале частот 0,1–2 Гц.

Как отмечено выше, этот эффект успешно используется при проведении морских работ методом *CSEM* для выделения тонких пластов – коллекторов УВ. В настоящее время мировой рынок услуг по морским электромагнитным исследованиям является стабильным и привлекающим внимание нефтяных компаний. Успехи морской электроразведки привели к повышению интереса к подобным работам на суше. Вместе с тем, зондирования на суше проводятся в основном с использованием естественных электромагнитных полей методами МТЗ-АМТЗ, несмотря на то, что наиболее результативные исследования в морской электроразведке связаны с применением контролируемого источника.

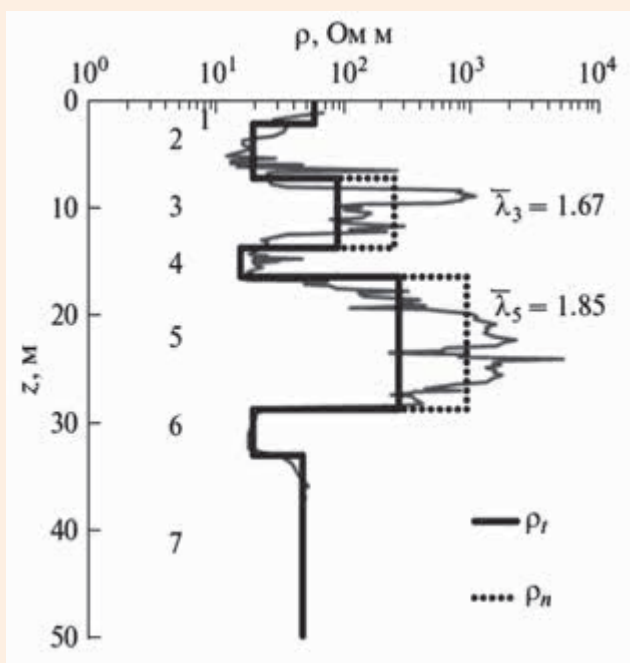
Важной информативной характеристикой является анизотропия пород разрезов и интервалов продуктивных коллекторов УВ. Для оценки анизотропии разреза используют комплекс методов с гальваническим и индукционным возбуждением (методы ВЭЗ и ЗСБ)

[2, 9]. Однако эти методы недостаточно глубинные для нефтепоисковых работ и производительность работ двумя методами невысокая.

Оценка параметров анизотропии также возможна на основании проведения работ в промежуточной зоне горизонтального электрического диполя. Разработанные подходы и программные средства интерпретации данных [6] позволяют успешно решать данную задачу. В промежуточной зоне горизонтального электрического диполя имеется поле смешанной структуры с гальваническим и индукционным возбуждением. Это дает возможность одним методом с более высокой производительностью оценивать параметры анизотропии разреза.

На **рис. 4** приведен практический пример для высокочастотной модификации магнитотеллурики – радиомагнитотеллурических зондирований с контролируемым источником [6]. Синтетические кривые зондирования вычислены для модели, построенной по материалам электрического каротажа [9]. На каротажной диаграмме видно, что скважина пересекает несколько слоев с различными средними значениями удельного сопротивления. При этом рассматриваются третий и пятый слои с коэффициентами анизотропии по данным каротажа $\lambda_3 = 1,57$ и $\lambda_5 = 1,76$.

Рис. 4. Оценка анизотропии разреза по данным измерений в промежуточной зоне горизонтального электрического диполя



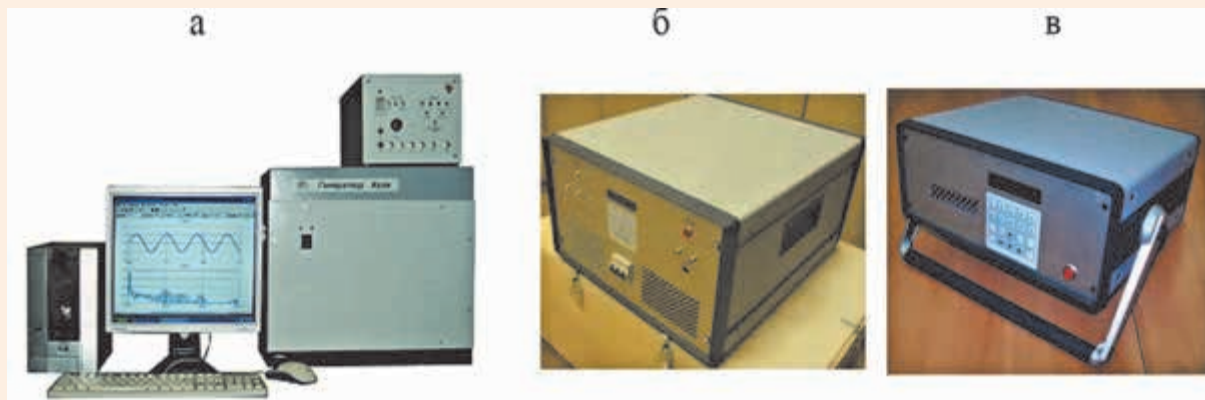


Рис. 5.
Генераторы большой (а), средней (б) и малой (в) мощности

Инверсия синтетических кривых выполнена совместно для данных импеданса и тилпера и найдены значения горизонтальной ρ_t и ρ_n составляющих удельного сопротивления анизотропных пластов. Полученные по результатам инверсии значения коэффициентов анизотропии $\lambda_3 = 1,67$ и $\lambda_5 = 1,85$ достаточно близки к приведенным выше исходным коэффициентам по данным каротажа [6].

Применение электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником при поисках УВ даст возможность решать следующие задачи:

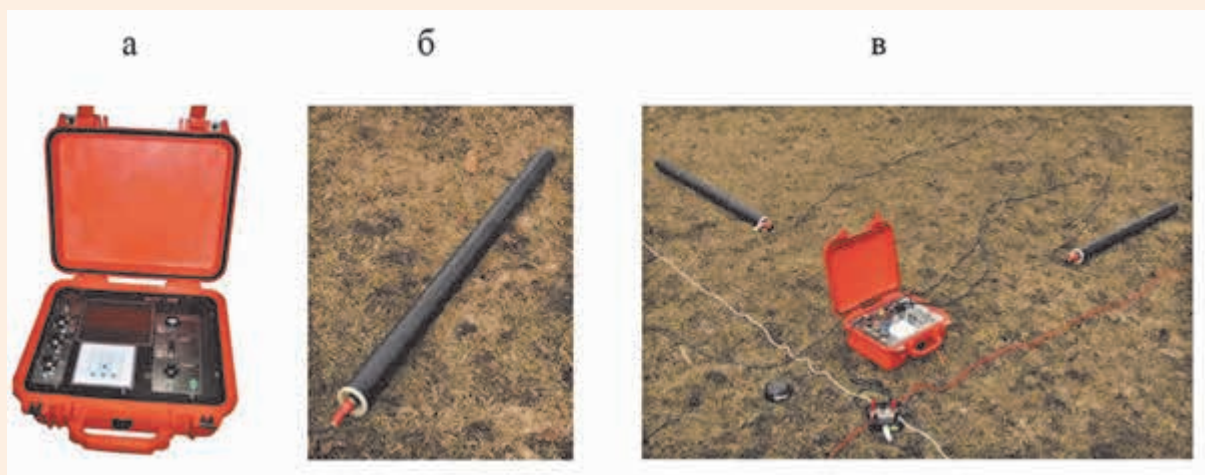
- получение данных высокого качества в МТ-«мертвой зоне», соответствующей глубинам 1–5 км, достоверная характеристика интервалов локализации продуктивных коллекторов и повышение надежности интерпретации данных МТЗ по технологии RR;
- выявление в разрезе тонких продуктивных коллекторов (реализация на суше успеш-

ного варианта морских электромагнитных зондирований с контролируемым источником);

- получение новых информативных параметров, характеризующих анизотропию разреза в целом и интервалов продуктивных коллекторов;
- получение данных зондирований высокого качества в районах с повышенным уровнем промышленных помех;
- при работах в Арктическом регионе России получение надежных данных зондирований при нестабильности ближних ионосферных источников естественного электромагнитного поля и проведение зимних работ с использованием бесконтактных электрических антенн;
- повышение производительности работ.

Это позволит кардинально повысить точность и надежность зондирований при поисках УВ, достоверность получаемых результатов и обеспечит повышение результативности поисковых работ в сложных геологических и неблагоприятных помеховых условиях.

Рис. 6.
Регистратор (а), магнитная антенна (б) и приемная аппаратура на точке зондирования (в)



Аппаратура электромагнитных зондирований с мощным источником

Для электромагнитных зондирований с контролируемым источником группой организаций – СПбГУ ООО «МикроКор», Российским институтом мощного радиостроения – РИМР, ООО «НПО ЭНТ», ООО «Геологическим центром СПбГУ», ООО «НПК ТехноСфера», ООО «Зонд-Гео» – разработаны генераторы, приемные комплексы и программное обеспечение обработки и интерпретации данных [4].

Генераторы малой (1 кВт), средней (25 кВт) и большой (50 кВт) мощности показаны на рис. 5. Диапазоны рабочих частот генераторов от 0,001–0,1 Гц до 10–1000 кГц. Ток на выходе – от 10 до 100 А. Напряжение и частота питания – 220 В, 380 В, 50 Гц.

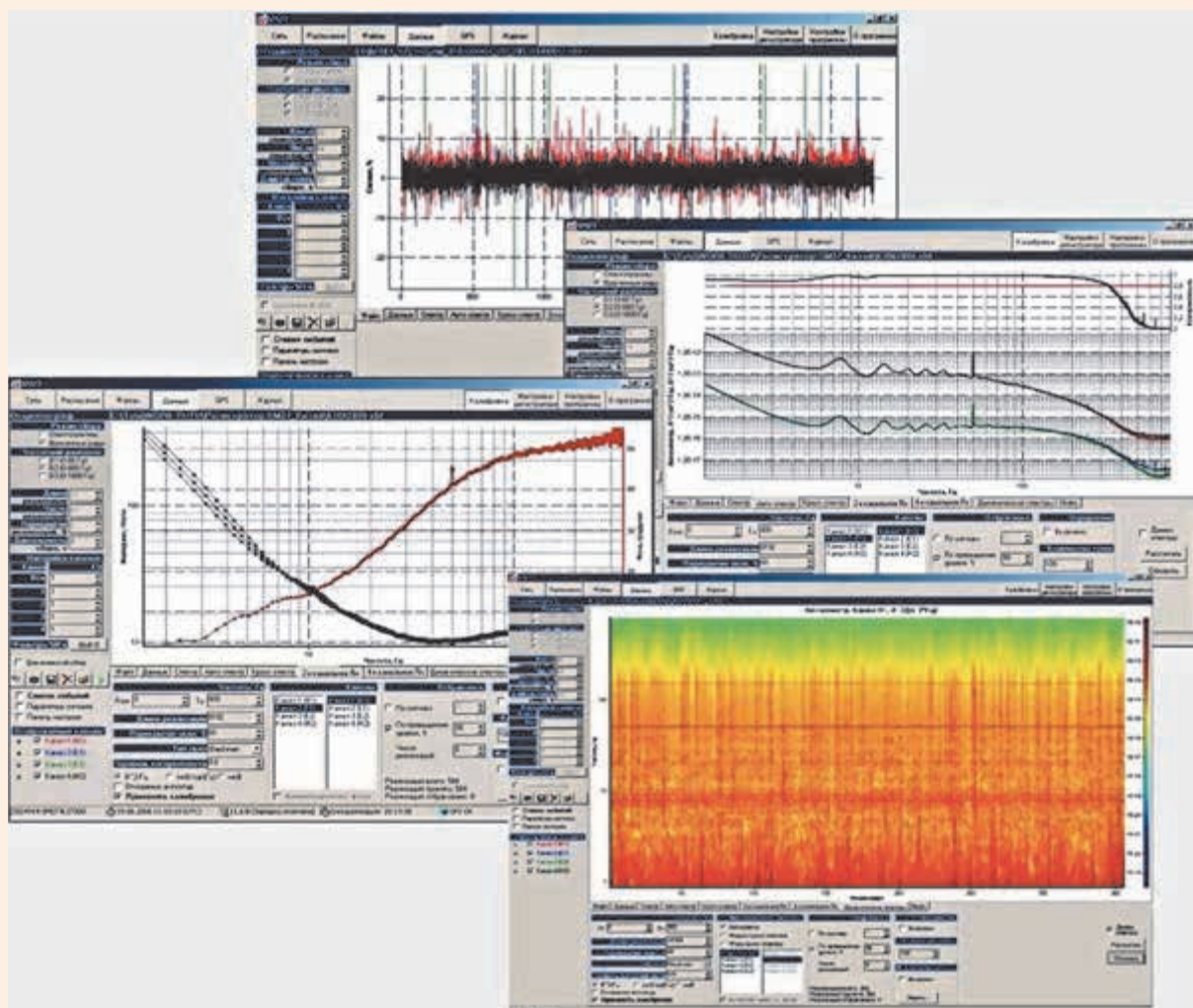
Регистратор (рис. 6а) имеет 4 канала синхронных измерений с 24-разрядными

АЦП в каждом канале. Диапазон частот – 0,01–1000 Гц. Размеры и масса регистратора 410×290×180 мм, 5 кг. Магнитная антенна (рис. 6б) имеет диапазон частот 0,01–1000 Гц, уровни шумов на частоте 10 Гц – 12 фТл/√Гц, на частоте 1000 Гц – 2,5 фТл/√Гц. Размеры и масса магнитной антенны 70×1110 мм, 5 кг.

Программные средства включают программы управления генератором и регистратором, программу первичной обработки данных зондирований (рис. 7), программу углубленной обработки с использованием робастных процедур, программу архивирования и визуализации, программы 1D- и 2D-инверсии, программу 3D-моделирования.

При использовании генераторов средней и малой мощности разработанная технология предусматривает проведение зондирований как в дальней, так и в промежуточной зоне источника для оценки параметров анизотропии разреза и выделения тонких слоев высоко-го удельного сопротивления, которые могут

Рис. 7. Окна программы первичной обработки данных



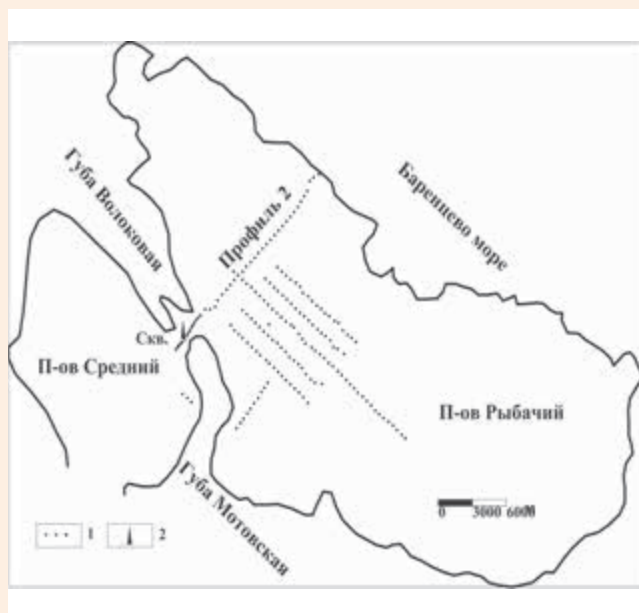


Рис. 8.
Расположение профилей АМТЗ на участке работ: 1 – точки зондирования, 2 – скважина

быть связаны с продуктивными ловушками УВ.

Выбор конкретного варианта системы электромагнитных зондирований (использование генератора определенной мощности, работы в дальней или промежуточной зоне источника) зависит от задач работ и геолого-геофизических особенностей территории. Для использования генератора большой мощности необходимо проведение предварительных специальных работ по выбору площадки для установки антенной системы и обустройству заземлений. Применение генератора малой мощности не требует значительных временных затрат и может использоваться для оперативной оценки перспективных структур.

Электромагнитные зондирования с контролируемым источником при поисках углеводородов в Арктическом регионе России целесообразно применять в комплексе с работами методами МТЗ-АМТЗ, основанными на измерениях естественных электромагнитных полей, более дешевыми и не требующими использования генератора и установки генераторной линии. Рациональное комплексирование этих методов, основанное на результатах опытно-методических работ в конкретном районе, позволит получить полноценные данные по объекту исследований при оптимальных затратах средств и времени. Ниже приведены примеры применения методов МТЗ-АМТЗ в Мурманской области и Республике Саха (Якутия).

Примеры применения

Работы в Мурманской области

Работы на п-ове Рыбачий (Мурманская обл.) были выполнены для изучения геологического строения территории в переходной зоне между Балтийским щитом и шельфом Баренцева моря и выявления зон, перспективных для аккумуляции УВ. Поскольку большая часть территории п-ова Рыбачий труднодоступна и применение вездеходов в летнее время по экологическим причинам на территории тундры запрещено, работы методом АМТЗ проводились в зимнее время по снежному покрову с перемещением между точками зондирования на снегоходах. При этом для измерений электрического поля в аудиочастотном диапазоне применялась новая технология метода АМТЗ с использованием бесконтактных (емкостных) антенн. В небольшом объеме в доступных местах были выполнены летние работы методом АМТЗ, подтвердившие результаты зимних работ.

П-ов Рыбачий находится в северной части Кольского п-ова (рис. 8). Профили зондирования располагались на п-ове Рыбачий, а также на п-ове Средний и на перешейке между ними. Разрез района работ сложен рифейскими платформенными образованиями. Фундамент представлен гранитоидами архейского возраста. На п-ове Рыбачий осадочный чехол включает ритмичное чередование конгломератов, песчаников и алевролитов в верхней части разреза, которые вниз по разрезу сменяются валунными и валунно-галечными конгломератами и брекчиями. В основании разреза осадочного чехла находятся тонкослоистые глинистые сланцы.

На рис. 9а приведен геоэлектрический разрез по данным АМТЗ по профилю 2. На разрезе можно выделить три участка. В левой части разреза на глубине 1400 м выделяется (пк 0–13) высокоомный блок, соответствующий фундаменту. Второй участок профиля (пк 13–23) характеризуется сложным строением, наличием каскада сбросов фундамента с увеличением глубины его кровли по направлению к Баренцеву морю. Третий участок профиля (пк 23–45) характеризуется двухслойным строением с верхним относительно высокоомным ($\rho = 500\text{--}2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и нижним достаточно проводящим ($\rho < 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) слоем.

В районе скважины работы были выполнены до завершения бурения (во время проведения работ АМТЗ скважина была пробурена до глубины около 300 м). По результатам инверсии была дана прогнозная оценка глубины кровли фундамента – 1400 м. Результаты

бурения скважины подтвердили прогнозную оценку глубины фундамента, который был вскрыт на глубине 1350 м. По данным сейсморазведки МОГТ положение кровли фундамента в районе скважины ошибочно прогнозировалось на глубине 8 км.

Общую структуру участка работ наиболее наглядно отражают планы изолиний фазы импеданса на разных частотах. На **рис. 10** приведены планы изолиний фазы на частотах 8, 70 и 200 Гц для средней части участка п-ова Рыбачий. Для плана изолиний на частоте 8 Гц участок работ разбивается на две достаточно контрастные зоны, при этом граница между ними имеет северо-западное направление. Юго-западная часть характеризуется низкими значениями фазы, что отвечает высоким значениям удельного сопротивления, характерным для фундамента. Резкий переход на плане изолиний фазы между профилями 4 и 21 соответствует сбросу фундамента. Северо-восточная часть участка, включающая профили 4, 23 и 24, характеризуется наличием на глубине блока проводящих пород, и в этой

части участка на частоте 8 Гц фундамент не прослеживается.

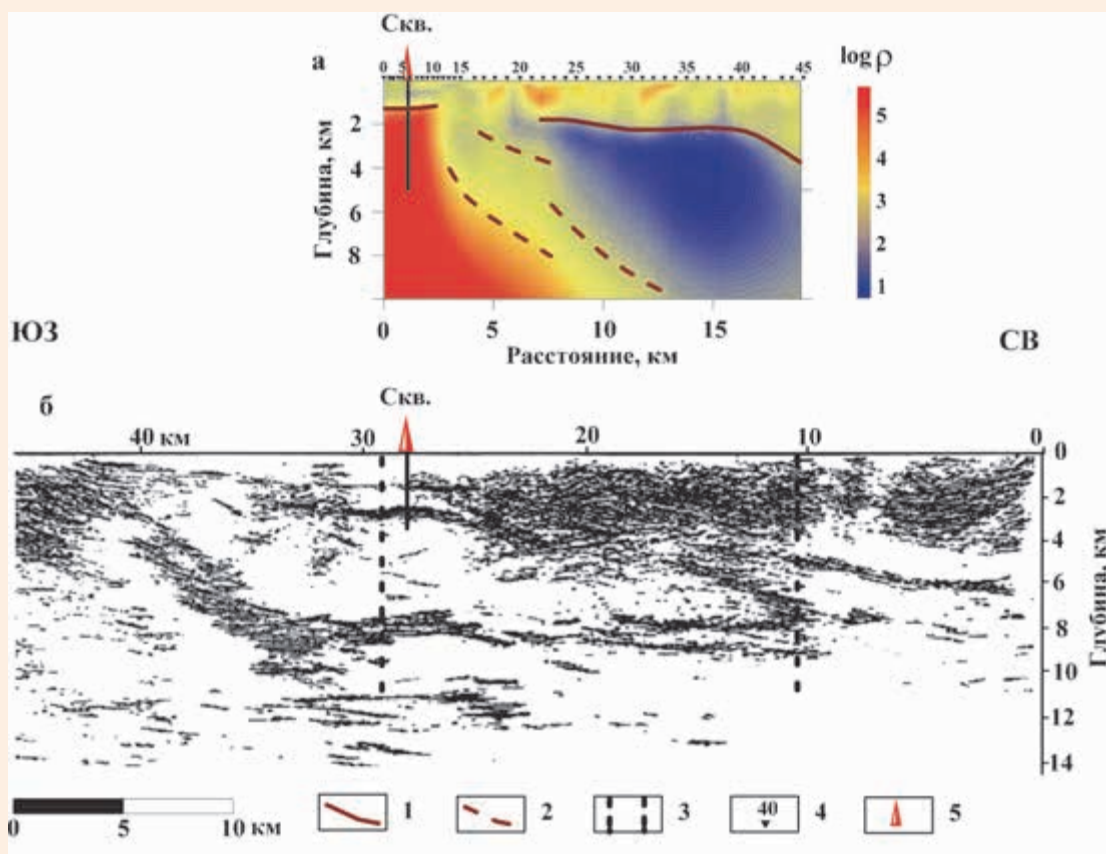
Приведенные материалы показывают возможность применения метода АМТЗ в Арктическом регионе России для работ в зимнее время и выделения проводящих зон, связанных с повышенной проницаемостью и водонасыщенностью пород, в которых существуют потенциальные условия для накопления УВ.

Работы в Республике Саха (Якутия)

Работы по изучению структуры осадочного чехла и выявлению участков с улучшенными коллекторскими свойствами пород были выполнены методом МТЗ-АМТЗ в Мало-Ботубинском нефтегазоносном районе Республики Саха (Якутия). Фундамент на глубине около 2 км представлен гнейсами, сланцами и метаморфизованными песчаниками архей-нижнепротерозойского возраста. Разрез чехла сложен аргиллитами, алевролитами и песчаниками венда, к которым приурочены промышленные залежи УВ. Выше по разрезу залегают терригенно-карбонатные породы с прослоями каменной соли кембрия и ор-

Рис. 9.

Геоэлектрический разрез по профилю 2 (а) и сейсмический разрез (б). Границы зон различного удельного сопротивления: 1 – уверенно выделенные, 2 – предполагаемые; 3 – пределы сейсмического разреза, совпадающие с геоэлектрическим разрезом, 4 – точки зондирования, 5 – скважина



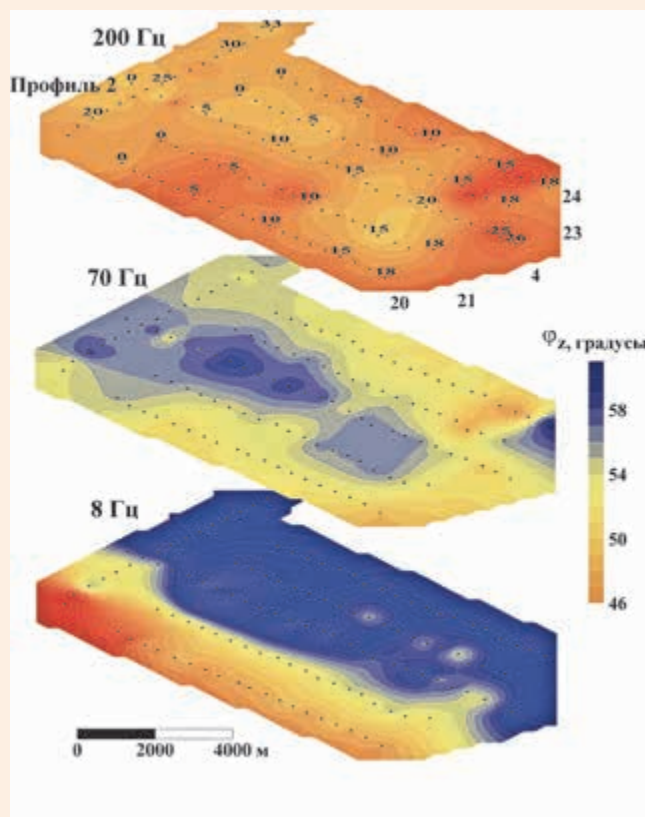


Рис. 10.
Планы изолиний фазы импеданса на разных частотах на участке п-ов Рыбачий

довика. Верхняя часть разреза представлена терригенно-осадочными отложениями каменноугольного, пермского и юрского возраста. Характерной особенностью разреза является наличие пород траппового комплекса – долеритовых силлов на различных глубинах, и многолетнемерзлых пород мощностью 200–300 м.

На *рис. 11* приведен полученный по данным МТЗ-АМТЗ геоэлектрический разрез по профилю широтной ориентировки.

На разрезе выделяются и прослеживаются проводящие слои, соответствующие терригенно-карбонатным породам среднего кембрия, насыщенным подмерзлотными водами (интервал глубин 150–350 м) и галогенно-карбонатным породам венда – нижнего кембрия (интервал глубин 800–2000 м). Используя эти проводящие слои как реперные, можно выделять разломы (показаны пунктиром) в толще пород чехла, которые являются естественными барьерами для циркуляции вод. Выявленные проводящие зоны связаны с повышенной проницаемостью пород.

Положение разломов более надежно отмечается на геоэлектрических разрезах, по-

строенных по результатам 1D-инверсии (*рис. 11а*). Однако достаточно изменчивый характер геоэлектрических горизонтов на этих разрезах связан с влиянием статических искажений кривых зондирования. Результаты 2D-инверсии позволяют существенно уменьшить влияние статических искажений, полученный разрез (*рис. 11б*) более плавный, что позволяет уверенно картировать кровлю кристаллического фундамента.

Надежность результатов МТЗ-АМТЗ подтверждается сопоставлением геоэлектрического разреза с данными по глубокой скважине, вскрывшей породы фундамента.

Выводы

Применение методов МТЗ-АМТЗ, основанное на измерениях естественных электромагнитных полей, позволяет решать при поисках УВ следующие задачи: изучение осадочных бассейнов, картирование разломов, выявление площадей с улучшенными коллекторскими свойствами пород, разбраковка обнаруженных сейсморазведкой структур, выделение ловушек с повышенной пористостью и флюидонасыщенностью для первоочередной проверки бурением, поиск УВ на участках развития соляно-купольной тектоники и базальтовых покровов. Данные МТЗ-АМТЗ позволяют в некоторых случаях значительно скорректировать выводы, полученные в результате проведения сейсморазведочных работ.

Существенное повышение информативности и новые возможности поисковых работ открываются при проведении исследований методом электромагнитных зондирования с мощным контролируемым источником: повышение точности и достоверности изучения интервалов локализации продуктивных коллекторов 1–5 км, получение данных об анизотропии пород, реализация на суше успешного варианта морских электромагнитных зондирования для обнаружения в разрезе продуктивных коллекторов, получение данных зондирования высокого качества в районах с повышенным уровнем промышленных помех.

Разработанная технология работ с бесконтактными приемными электрическими линиями позволяет проводить как летние, так и зимние работы в Арктическом регионе России. При этом работы с контролируемым источником более производительные по сравнению с измерениями естественных электромагнитных полей и обеспечивают получение надежных данных зондирования при нестабильности ближних ионосферных источников естественного электромагнитного поля.

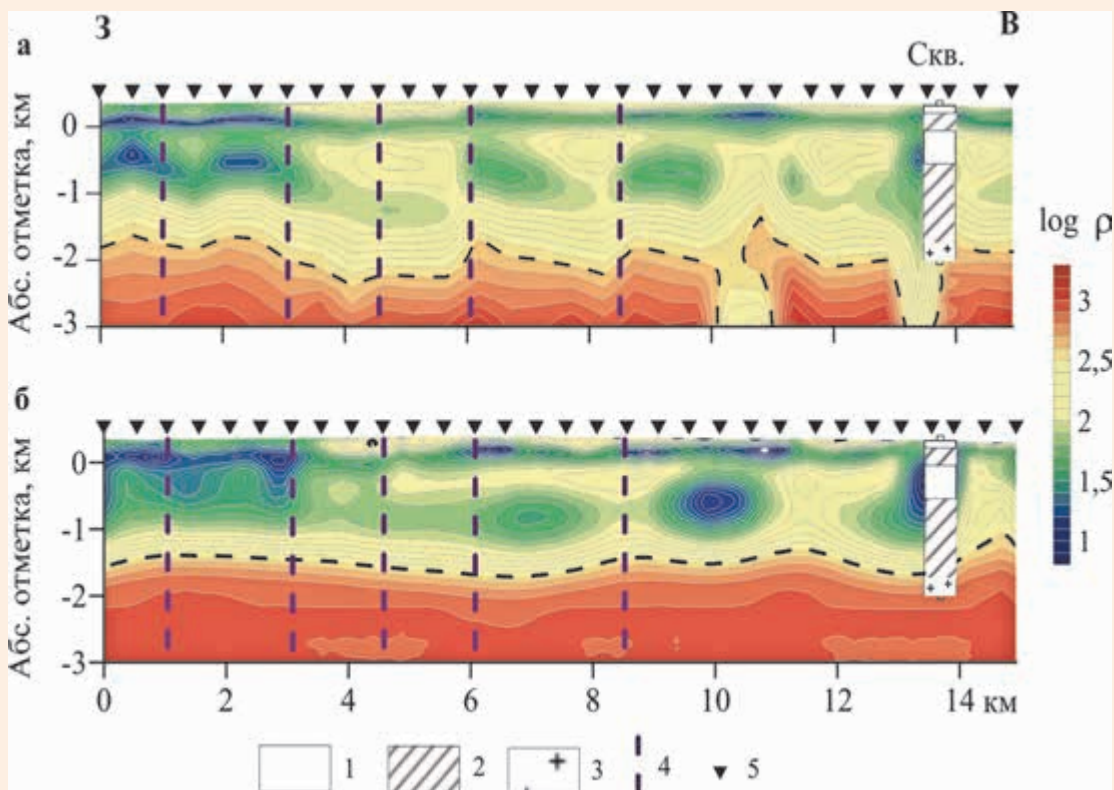


Рис. 11.

Геозлектрический разрез по профилю в Мало-Ботубинском нефтегазоносном районе (Якутия) по результатам: а – 1D-инверсии; б – 2D-инверсии. Положение разломов показано пунктиром. 1–3 – породы по скважине с различными значениями удельного сопротивления: 1 – 100–150 Ом·м, 2 – 10–50 Ом·м, 3 – > 500 Ом·м; 4 – разломы по данным предыдущих работ; 5 – точки зондирования

Рациональное комплексирование работ по электромагнитным зондированиям с мощным контролируемым источником и методами МТЗ-АМТЗ, основанными на измерениях естественных электромагнитных полей, позволит получить полноценные данные на поисковых участках при оптимальных затратах средств и времени.

Применение метода электромагнитных зондирования с мощным контролируемым источником позволит кардинально повысить точность и надежность зондирования при поисках УВ, достоверность получаемых результатов и обеспечит повышение результативности поисковых работ в сложных геологических и неблагоприятных помеховых условиях. ❊

Литература

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
2. Иванов П.В., Алексеев Д.А., Бобачев А.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г. О комплексировании методов вертикального электрического зондирования и зондирования становлением поля в ближней зоне //Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 42–51.
3. Ингертов О. Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов //Записки горного института. Современные технологии при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Том. 162. 2005. С. 15–25.
4. Сараев А.К., Анташук К.М., Пертель М.И., Еремин И.С., Головенко В.Б., Ларионов К.А. Аппаратурно-программный комплекс аудиоманнитотеллурических зондирования АКФ-4М. Материалы пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. Книга 2. СПб.: СПбГУ. 2011. С. 475–478.
5. Сараев А.К., Никифоров А.Б., Романова Н.Е., Прокофьев О.М., Еремин И.С. Возможности бесконтактных измерений электрического поля аудиочастотного диапазона //Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. Вып. 3. С. 5–11.
6. Шлыков А.А., Сараев А.К. Оценка макроанизотропии горизонтально-слоистого разреза по данным радиоманнитотеллурических зондирования с контролируемым источником //Физика Земли. 2015. № 4. С. 128–147.
7. Chave A.D., Thomson D.J. Bounded influence magnetotelluric response function estimation. Geophys. J. Int., No.157, 2004. P. 988–1006.
8. Chave A.D., Jones A.G. (Eds.). The magnetotelluric method: theory and practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 570 p.
9. Christensen N.B. Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations. Geophysical Prospecting. V. 48. 2000. P. 1–19.

10. Eidesmo T., Ellingsrud S., MacGregor L.M., Constable S., Sinha M.S., Johansen S., Kong F.N., Westerdahl H. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deep-water areas. *First Break*, 2002, 20. P.144–152.
11. Gamble T.D., Goubau W.M., and Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, Vol. 44, No. 1, 1979. P. 53–68.
12. Simpson F., Bahr K. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge university press, 2005. 254 p.
13. Strack K. M. Future directions of electromagnetic methods for hydrocarbon applications. IAGA 21st EM induction workshop Review Paper, Darwin, Australia, 2012. P. 1–21.
14. Vozoff K. The magnetotelluric method. *Electromagnetic methods in applied geophysics. V.2 - Applications. Series: Investigations in geophysics*, No 3, 1991. P. 641–711.

UDC 553.98+550.837

A.K. Saraev, PhD, Associate Professor of the Institute of Earth Sciences of SPbSU¹, a.saraev@spbu.ru
K.M. Antashchuk, Principal Expert of the Institute of Earth Sciences of SPbSU¹, k.antashchuk@spbu.ru
A.E. Simakov, Principal Expert of the Institute of Earth Sciences of SPbSU¹, a.simakov@spbu.ru
A.A. Shlykov, PhD, Principal Expert of the Institute of Earth Sciences of SPbSU¹, shlykovarseny@gmail.com

1. Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University. 7/9 Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia

Prospects of application of electromagnetic soundings with a powerful controlled source at searches for hydrocarbons in the Arctic region of Russia

Abstract. Possibilities of magnetotelluric and audiomagnetotelluric (MT–AMT) soundings at searches for hydrocarbons are considered. The opportunity of essential increase of the informative value of searches using electromagnetic soundings with a powerful controlled source is shown. Joint application of works with the powerful controlled source and MT–AMT soundings will allow receiving the high-grade data at optimum expenses and time.

Keywords: magnetotellurics; electromagnetic soundings; controlled source; search for hydrocarbons

References

1. Berdichevskii M.N., Dmitriev V.I. *Modeli i metody magnitotelluriki* [Models and methods of magnetotelluric], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 680 p.
2. Ivanov P.V., Alekseev D.A., Bobachev A.A., Pushkarev P.Iu., Yakovlev A.G. O kompleksirovanii metodov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia i zondirovaniia stanovleniem polia v blizhnei zone [About complexing of methods of the vertical electric sounding and transient electromagnetic sounding], *Inzhenernye izyskaniia – Engineering survey*, 2011, no. 11, pp. 42–51.
3. Ingerov O. Primenenie elektrorazvedochnykh metodov pri poiskakh zalezhei uglevodorodov [The use of electric prospecting methods in the search for hydrocarbon deposits], *Zapiski gornogo instituta. Sovremennye tekhnologii pri poiskakh i razvedke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Notes of Mining Institute. Modern technologies in prospecting and exploration of mineral deposits], vol. 162, 2005, pp. 15–25.
4. Saraev A.K., Antashchuk K.M., Pertel' M.I., Eremin I.S., Golovenko V.B., Larionov K.A. Apparturno-programnyi kompleks audiomagnetotelluricheskikh zondirovaniia AKF-4M [Hardware-software complex of the audio magnetotelluric sounding ACF-4M]. *Materialy piatoi vserossiiskoi shkoly-seminara imeni M.N. Berdichevskogo i L.L. Van'iana po elektromagnitnym zondirovaniiam Zemli* [Proceedings of the fifth All-Russian school-workshop named Berdichevsky and Vanyan on electromagnetic sounding of the Earth], book 2, St. Petersburg, SPbGU Publ., 2011, pp. 475–478.
5. Saraev A.K., Nikiforov A.B., Romanova N.E., Prokof'ev O.M., Eremin I.S. Vozmozhnosti beskontaktnykh izmerenii elektricheskogo polia audiochastotnogo diapazona [Features of non-contact measurements of the electric field of radio frequency range], *Seismicheskie pribory – Seismic instruments*, 2011, vol. 47, issue 3, pp. 5–11.
6. Shlykov A.A., Saraev A.K. Otsenka makroanizotropii gorizonta'l'no-sloistogo razreza po dannym radiomagnitotelluricheskikh zondirovaniia s kontroliruemym istochnikom [Estimation of the macroanisotropy of horizontally-layered section according to the controlled source radiomagnitotelluric soundings], *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2015, no. 4, pp. 128–147.
7. Chave A.D., Thomson D.J. Bounded influence magnetotelluric response function estimation. *Geophys. J. Int.*, No.157, 2004. P. 988–1006.
8. Chave A.D., Jones A.G. (Eds.). *The magnetotelluric method: theory and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 570 p.
9. Christensen N.B. Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations. *Geophysical Prospecting*. V. 48. 2000. P. 1–19.
10. Eidesmo T., Ellingsrud S., MacGregor L.M., Constable S., Sinha M.S., Johansen S., Kong F.N., Westerdahl H. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deep-water areas. *First Break*, 2002, 20. P.144–152.
11. Gamble T.D., Goubau W.M., and Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, Vol. 44, No. 1, 1979. P. 53–68.
12. Simpson F., Bahr K. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge university press, 2005. 254 p.
13. Strack K. M. Future directions of electromagnetic methods for hydrocarbon applications. IAGA 21st EM induction workshop Review Paper, Darwin, Australia, 2012. P. 1–21.
14. Vozoff K. The magnetotelluric method. *Electromagnetic methods in applied geophysics. V.2 - Applications. Series: Investigations in geophysics*, No 3, 1991. P. 641–711.