

УДК 550.837

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В АРКТИКЕ (ПРОЕКТ)

В.С. Могилатов<sup>1</sup>, А.В. Злобинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Проспект академика Коптюга 3, г. Новосибирск, Россия, 630090. e-mail: mvecs@ya.ru

<sup>2</sup> ООО «Научно-техническая компания ЗаВеТ-ГЕО». Ул. Восход 26/1 оф.56, г. Новосибирск, Россия, 630102. e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

**Аннотация.** Обсуждается проект долговременных электромагнитных зондирований в Арктике с дрейфующего льда. Обосновывается применение особого источника электромагнитного поля. Рассмотрены некоторые методические и технические проблемы.

**Ключевые слова.** Зондирования становлением, Арктика, дрейфующие льды.

## GEOELECTRIC EXPERIMENT IN ARCTIC (PROJECT)

V.S. Mogilatov<sup>1</sup>, A.V. Zlobinsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics. Koptug ave.3, Novosibirsk, Russia, 630090. e-mail: mvecs@ya.ru

<sup>2</sup> ZaVeT-GEO Ltd. Voskhod str. 26/1 office 56, г. Novosibirsk, Russia, 630102. e-mail: ZlobinskyAV@newmail.ru

**Abstract.** We discuss the project of long-term electromagnetic soundings in the Arctic with use the drifting ice floes. We've justified the application of a special source of the electromagnetic field and discuss some methodological and technical problems.

**Key words.** transient soundings, Arctic, drifting ice floes.

**ВВЕДЕНИЕ.** Изучение, а затем и освоение минеральных ресурсов арктического бассейна стоит на повестке человеческой цивилизации. Не все в восторге от этой перспективы, но это объективная необходимость, возникающая из роста населения Земли и исчерпания известных ресурсов. Вопрос этот крайне важный, и имеет даже геополитические измерения. Законная активность России (самого большого естественного претендента на арктический бассейн) вызвала в недавнее время большие волнения и даже некоторое раздражение. Мировое сообщество будет как-то регулировать правовые формы использования ресурсов Арктики, но неизбежно будет при этом учитываться реальная деятельность по изучению и освоению этих ресурсов. Таким образом, предлагаемый проект актуален и соответствует национальным интересам РФ. Здесь есть еще один аспект – ресурсы (например, нефть), разведанные и добытые в Арктике, являются высокотехнологичным продуктом, что бы там не говорилось о статусе нашей страны как сырьевого придатка мировой экономики. Такая добыча стимулирует развитие наукоемких отраслей промышленности так же, как это свойственно производству новой военной техники и космической деятельности. Разработка проекта по изучению геологического строения дна арктического бассейна, в особенности, в районах, закрытых льдами, соответственно, есть весьма наукоемкое предприятие.

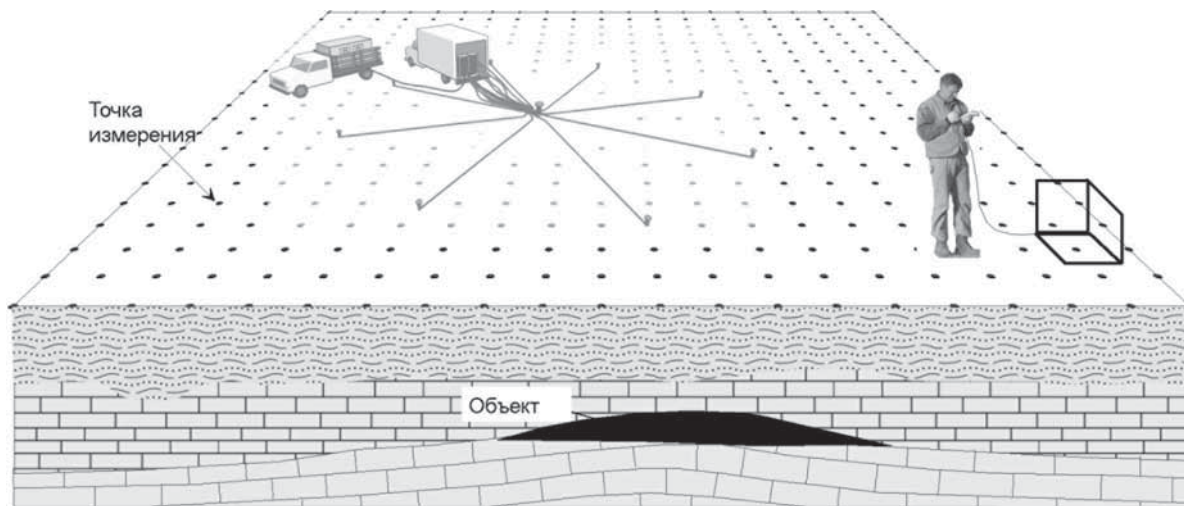
### Способ решения проблемы

Основная, принципиальная проблема, которую приходится решать при проектировании геолого-геофизического исследования в Арктике состоит в том, что объект покрыт довольно глубоким морем (до 5 км) всюду и, на значительной части, еще и вечными

льдами. Такая «двойная» упаковка сразу исключает длинный ряд наземных технологий, дистанционные исследования с летательных аппаратов и спутников, но также и многие наработки морской геофизики. Что же остается? Невероятно дорогая и проблематичная в этих условиях сейсморазведка? Малоэффективные гравиметрические и магнитометрические исследования? Электромагнитные зондирования? Электромагнитные исследования с использованием естественных полей могут сохранить свое значение. Но они не обладают необходимой детальностью. Нужны активные методы. Однако традиционные методы электромагнитных зондирований с искусственными источниками направлены на изучение общего распределения параметра сопротивления в геологической среде и становятся неэффективными при наличии такого мощного проводящего экрана как слой морской воды. Льды также делают невозможным применение некоторых морских технологий (таких как CSEM [3]), которые все же претендуют на некоторую эффективность в море.

Мы предлагаем в этих условиях применить специальную технологию электромагнитных зондирований, основанную на возбуждении особой поляризации электромагнитного поля, что с технической стороны обеспечивается применением особого же источника поля (круговой электрический диполь – КЭД). Эта сложная с традиционной точки зрения питающая установка, образованная радиальными заземленными линиями, может быть весьма мощной. В наземном варианте она давно уже используется (например, [1]) как питающая установка в методе зондирований вертикальными токами (ЗВТ) и представлена здесь на рис. 1.

Вполне логично, что для получения результата в тяжелых условиях требуется усложнять экспери-



**Рис. 1.**  
**Схема полевых работ с применением кругового электрического диполя (КЭД)**



**Рис. 2.**  
**Дрейф многолетних льдов в Арктике**

ментальную схему. Но эта плата превращается в совершенно неподъемную в условиях Арктики. Как вообще перемещать такую установку для покрытия площади или профиля во льдах? Но тут мы предлагаем вторую сторону нашего проекта – использование известного дрейфа льдов.

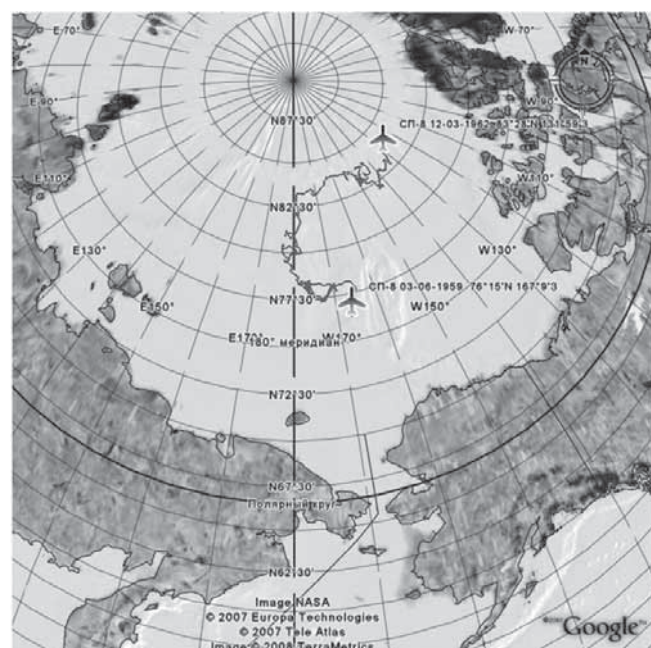
**Итак, предлагается однажды разместить сложную, масштабную электроразведочную питающую и, частично, приемную конфигурации на дрейфующем льду, и в течении долгого времени повторять реализацию системы наблюдения, подразумевая перемещение всей установки относительно дна арктического бассейна.**

Можно тут сослаться на опыт советских дрейфующих станций СП. Вот, например, справка по станции *Северный полюс-8 (СП-8)* – советская научно-исследовательская дрейфующая станция. Открыта 19 апреля 1959 года. Работа на станции проводилась в три смены: 1-я смена в составе 20 человек с 19 апреля 1959 года по 3 апреля 1960 года (354 дня). 2-я смена в составе 18 человек с 3 апреля 1960 года по 15 апреля 1961 года (377 дней). 3-я смена в составе 19 человек с 15 апреля 1961 года по 19 марта 1962 года (338 дней). Станция была эвакуирована по причине разлома дрейфующей льдины, проработав в общей сложности 1069 дней и продрейфовав 5976 километров в Северном Ледовитом Океане.

На рис. 2 показана схема дрейфа льдов Арктики, а на рис. 3 приведена схема движения СП-8. Собственно, мы продолжили бы традицию станций СП, дополнив электромагнитные зондирования наблюдениями за другими геофизическими полями на новой научно-технической базе. Весьма полезны были бы и магнитотеллурические исследования.

**Почему КЭД?**

Идея многодневных геофизических наблюдений на дрейфующем льду, таким образом, не является оригинальной. Мы только дополняем это электромагнитными зондированиями с контролируемым источником. Вопрос у специалистов может возникнуть относительно предлагаемого источника. Поче-



**Рис. 3.**  
**Траектория СП-8**

му не использовать в мощном и сверхмощном варианте традиционные источники – токовую петлю или заземленную линию?

Обратимся к теории, хорошо известной. В силу одномерности базовой, горизонтально-однородной модели среды в электроразведке с контролируруемыми источниками имеет место разделение общего поля на E- и H-составляющие (поперечно-магнитное и поперечно-электрическое поле, ТМ (transverse magnetic) и ТЕ (transverse electric), E- и H-моды, поле электрического типа и поле магнитного типа). На совершенно разные свойства этих составляющих поля произвольного источника обратил внимание еще Дж. Р. Уэйт в 1986 г. в контексте чувствительности к тонкому высокоомному горизонту. Это разделение позволяет эффективно и просто описать теорию, а также имеет глубокую связь с типами питающих установок. Такой известный источник, как токовая петля на дневной поверхности или в другой горизонтальной плоскости, возбуждает только ТЕ-поле. Известный источник, возбуждающий только ТМ-поле, – это малопрактичный вертикальный электрический диполь (ВЭД или линия – ВЭЛ). Также традиционный источник – горизонтальный электрический диполь (ГЭД или линия – ГЭЛ) – возбуждает смешанное поле, но в котором превалирует ТЕ-мода. Физико-математическая модель индукционной электроразведки с контролируруемыми источниками, представленная условно на рис. 4, двуедина и симметрична по отношению к полям электрического и магнитного типов. Это совершенно не новая теория, а лишь схема, правильно отражающая дуальную (ТЕ-ТМ) природу геоэлектромагнитного поля [2]. Современная индукционная электроразведка (в частности, импульсная) основана практически лишь на использовании поля магнитного типа. Оно возбуждается индуктивно (например, петлей) и в целом речь идет об индуктивной электроразведке. Существует ясная альтернатива индуктивной электроразведке, основанная на использовании ТМ-поля.

Прежде всего, надо понимать, что ТМ-поле – это радикально иной способ существования электромагнитного поля в слоистой земле и иной способ взаимодействия с ней, нежели привычное ТЕ-поле. На рис. 5 условно представлены системы возбуждаемых токов при ТЕ-поляризации и ТМ-поляризации – знаменитое «токовое кольцо», образуемое горизонтальными токами, и тороидальная система токов, имеющая вертикальную электрическую компоненту. Первая возбуждается токовой петлей, вторая – вертикальным электрическим диполем и

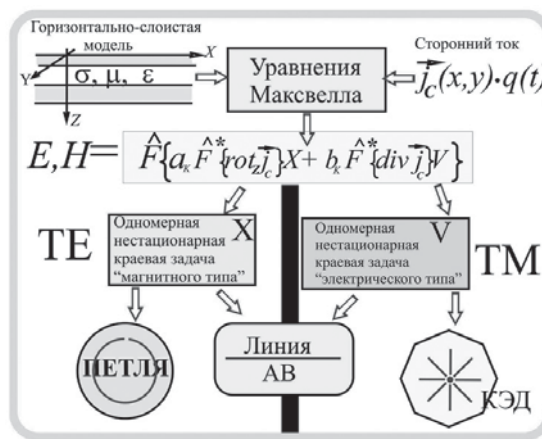


Рис. 4. «Дуальная» физико-математическая модель и три типа источников

круговым электрическим диполем. Дело в том, что устанавливаемое ТМ-поле имеет совсем другие свойства, чем у традиционного процесса становления с преобладанием ТЕ-поля. В контексте нашего предложения очень важно, что процесс установления ТМ-поля не зависит только от суммарной продольной проводимости, а также не имеет магнитного отклика на дневной поверхности. Это позволяет решить проблему подавляющего вклада продольной проводимости слоя морской воды.

Сравним «в лоб» возможности горизонтальной линии и КЭД в качестве источников переходного процесса при установке их на поверхности моря (1000 м) для определения тонкого «резистивного» слоя. Примем «стандартную» модель, которая широко используется в мировой литературе (рис. 6). На рис. 6 представлены также результаты расчетов процессов становления в виде относительных кривых. Мы видим, что аномальный эффект в случае применения КЭД достигает 10 раз (т.е. 1000%!). Что касается линии, то максимальный эффект порядка 30%, да и то, фактически, на постоянном токе, процесс становления только ухудшает ситуацию (из-за превалирующей малочувствительной ТЕ-моды).

Еще надо бы обсудить возможность использования вертикальной электрической линии (ВЭЛ, или диполя – ВЭД). Этот источник также как и КЭД возбуждает чистое ТМ-поле и, в принципе, тоже решает проблему эффективного источника. Однако, мы против такого предложения. Нестабильность геометрии под воздействием течений и внутренних волн,

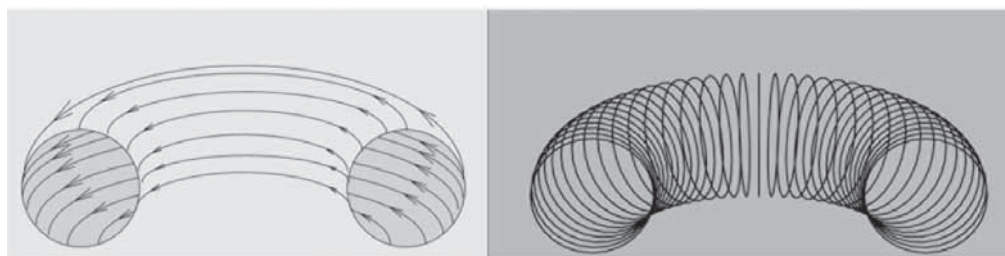


Рис. 5. «Токовое кольцо» (ТЕ) и тороидальная система токов (ТМ)

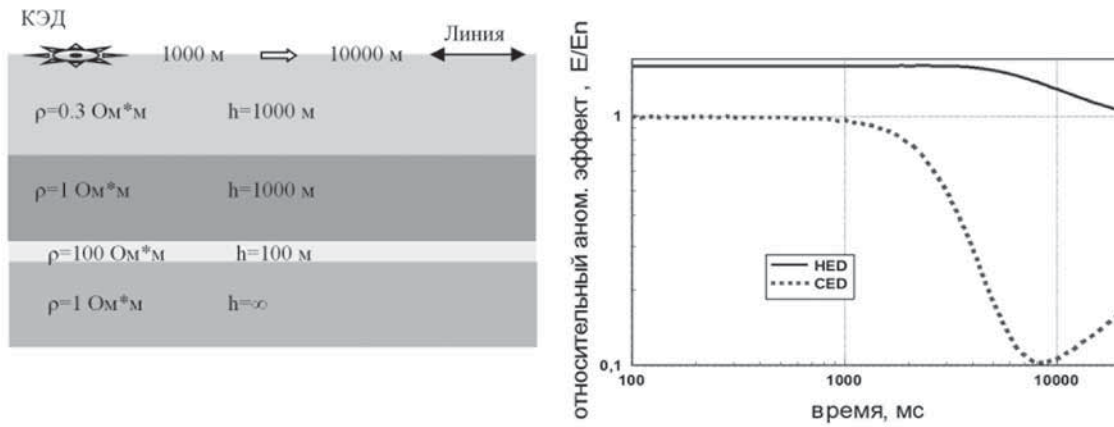


Рис. 6.

Модель и относительные аномалии в случае КЭД (кривая CED) и линии (кривая HED)

а также необходимость изменения длины вертикальной линии в зависимости от глубины моря (от 200 до 5000 м) делает этот источник худшим вариантом [3]. В то же время проблемы со строгой, жестко фиксированной геометрией КЭД вполне решаются при установке на льдине.

**Описание эксперимента**

Итак, мы предлагаем обосновать следующую методику электромагнитных зондирований придонной геологической среды глубиной до нескольких километров с целью определения распределения удельного сопротивления, а также других геоэлектрических параметров, что выявит различные региональные и локальные геологические объекты при перемещении всей экспериментальной установки в пределах арктического бассейна. На льду располагается (один раз и очень тщательно) питающая в импульсном режиме установка кругового электрического диполя. Установка заземляется в центре и по концам радиальных питающих линий через отверстия во льду.

Электроды заземлений могут быть глубоко погружены в море (как на рис. 7), однако расчеты по-

казали слабую эффективность приближения электродов ко дну (при больших радиусах КЭД). В то же время нестабильность висящих электродов из-за движения воды искажает сигнал. Целесообразность погружения заземлений – один из исследуемых вопросов.

Радиус КЭД (длина радиальной линии) может достигать 10–20 км (вопрос подлежит изучению). Система наблюдения складывается из электрических приемников в виде фиксированных, заземленных в воде, горизонтальных и вертикальных линий, а также из площадной, оперативно выполняемой мобильными индуктивными датчиками системы измерений магнитного поля. Здесь намечается альтернатива – делать ли непрерывные измерения (что едва ли возможно), или же проводить цикл измерений, привязывать его к определенной точке, и повторять его через некоторое время (сутки – это 5–7 км дрейфа). Этот вопрос предстоит изучить.

Так или иначе, исходя из опыта работ методом ЗВТ, в котором используется КЭД, измерениями может быть охвачена полоса вдоль траектории источника шириной в десять радиусов. Итак, исходя из радиуса КЭД 15 км, мы получаем при общей длине

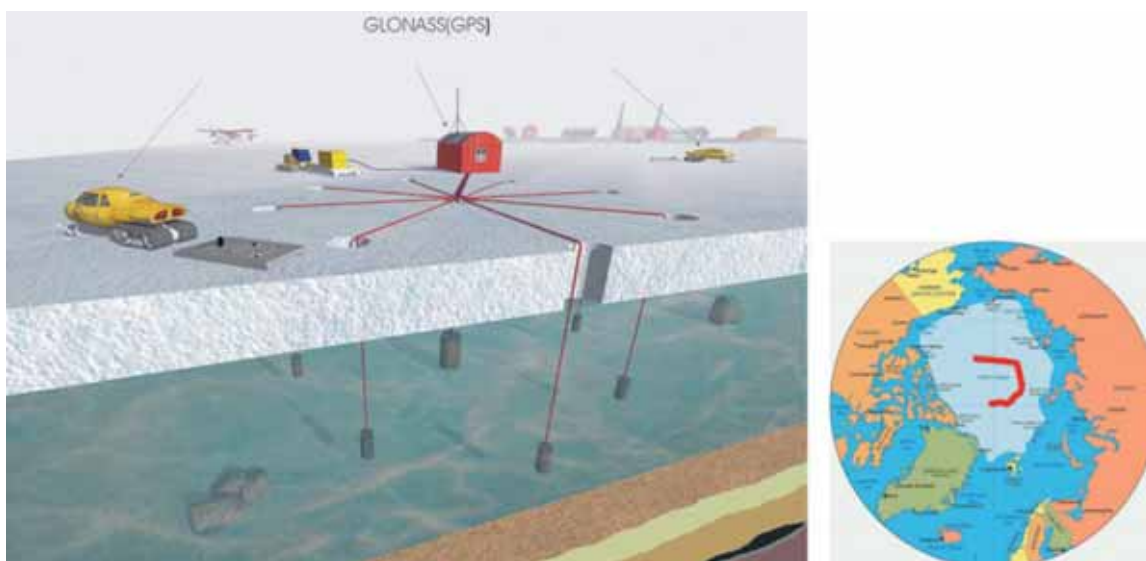


Рис. 7.

Общий вид питающей установки на арктическом льду и возможная область исследований

дрейфа в 4000 км (средний показатель по советским СП) 600 000 кв.км обследованной площади в виде, что интересно, весьма вытянутого извилистого коридора (см. рис. 7). Нам, кстати, уже указывался вполне очевидный недостаток таких зондирований – хаотичность и неконтролируемость перемещения системы наблюдения. Однако скудность имеющейся информации оправдывает неопределенность траектории, по крайней мере, на первых порах. Кроме того, можно до некоторой степени прогнозировать траекторию, пользуясь картами дрейфа льда.

Обращаем внимание, что описанный геофизический эксперимент при учете опыта советских и российских СП выглядит весьма реалистично и не слишком затратно (учитывая также дополнительные, разнообразные геофизические исследования, кроме основного электромагнитного зондирования). Вопрос вызывает только регулярное снабжение энергоресурсами. Подвоз авиатранспортом ГСМ для электрогенераторов не выглядит хорошим решением. Возможно, нужно рассмотреть (при прерывном, периодически возобновляемом режиме работ) питание от аккумуляторных батарей с подзарядкой в периоды пауз от ветрогенераторов или солнечных батарей. Или, может быть, целесообразна доставка и установка компактного ядерного реактора (конечно, в непотопляемом и неразрушаемом исполнении). Надо также заметить, что такие зондирования, с такой статичной, фиксированной приемно-питающей установкой, с идеально сохраняемыми параметрами обеспечат высочайшее качество измерений и не потребуют большого накопления сигнала, что будет также поддержано малым уровнем электромагнитных помех в тех широтах.

В геофизическом сообществе при предварительном обсуждении этого проекта была высказана также идея автономного, автоматизированного эксперимента, без постоянного присутствия людей. Это чрезвычайно удешевило бы проект, учитывая также отсутствие необходимости эвакуации всего оборудования в конце (возможно, вынужденном и преждевременном) эксперимента (дешевая электроника, провода, выработавшие ресурс аккумуляторы и ветрогенераторы). При условии предварительной передачи всей накопленной информации.

### Некоторые результаты моделирования

Уже проведенные исследования по обоснованию этого проекта позволили предложить некоторые методические решения, частично изложенные в предыдущем разделе.

Эти решения были получены на основе анализа и экстраполяции опыта работ с установкой КЭД, а также на основе математического 1D и 3D моделирования. Трехмерное моделирование было выполнено методом конечных элементов (М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик). Так, например, для глубоководных районов (вмещающий разрез в табл.1, первый

Таблица 1

№	h, м	$\rho$ , Ом·м
1	3000	0,3
2	4000	2
3	$\infty$	1000

слой – море) были рассмотрены двенадцать трехмерных геоэлектрических моделей, которые отличаются положением трехмерного объекта (размер  $8 \times 10 \times 0.1$  км<sup>3</sup> и сопротивление 100 Ом·м) по глубине (4, 5, 6, 7 км), и в плане как на рис. 8. Т.е. в первых четырех геоэлектрических моделях объект будет расположен от 2 до 10 км по оси x, в моделях 5–8 – от 10 до 18 км, а в моделях 9–12 – от 18 до 26 км). Радиус КЭД взят равным 5 км.

Приводим пример расчета устанавливающегося поля КЭД в таких условиях. Рассмотрим влияние аномального объекта на напряженность электрического поля во времени в точках P1–P8 с координатами (3000,0,0), (10000,0,0), (15000,0,0), (20000,0,0), (25000,0,0), (30000,0,0), (35000,0,0), (40000,0,0) в соответствии с рис. 8.

На рис. 9 приведены графики x-компоненты напряженности электрического поля ( $E_x(t)$ ) в точках P1–P8 для трехмерной геоэлектрической модели №4, в которой объект расположен от 2 км до 10 км в плане на глубине 7 км в сравнении с полем горизонтально-слоистой среды. Ток в КЭД был задан равным 1 А.

Из приведенных результатов видно, что для локальных объектов наблюдается два типа аномалии

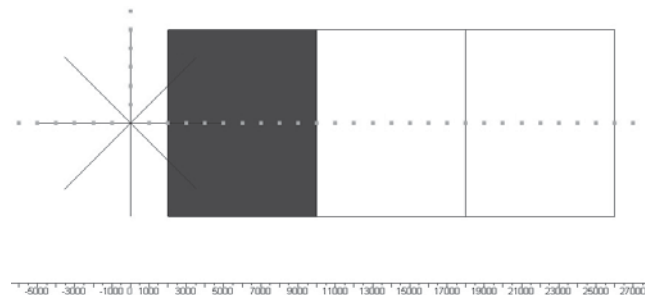


Рис. 8.  
Расположение трехмерного объекта  
в геоэлектрических моделях 1-12

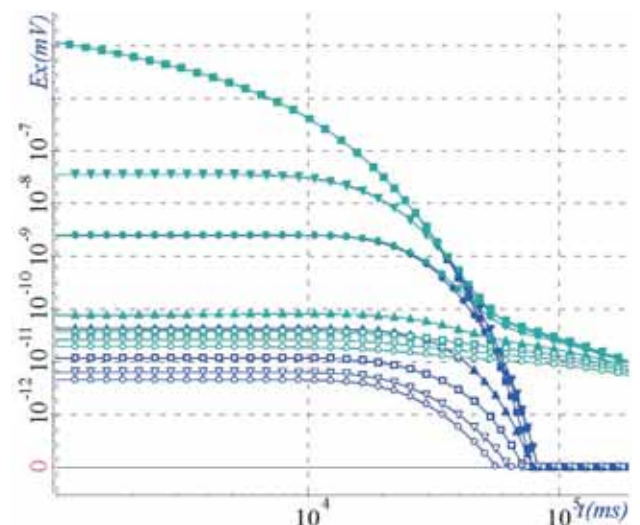


Рис. 9.

Графики  $E_x(t)$  в точках P1–P8 для модели горизонтально-слоистой среды (обозначены синим цветом) и для трехмерной модели №4 (голубой цвет). Графики, соответствующие одной и той же точке, обозначены одинаковыми знаками

в сигналах: в области времен до 5 с, соответствующей постоянному сигналу для точек, расположенных снаружи КЭД (фактически это аномалии, соответствующие постоянному току), и в области самых поздних времен – для рассматриваемых глубины моря и толщи осадочных пород это времена от 80 секунд и более. В целом можно сказать, что наблюдается значительный аномальный эффект.

Выше приведен лишь один эпизод наших исследований. Рассматривалась, разумеется, и мелководная шельфовая зона. Численному анализу в трехмерной ситуации подвергались вопросы о необходимых размерах питающей установки и приемных линий, о величине тока в источнике, о возможном удалении точек измерения от источника. Изучался вопрос об эквивалентности идеальной установки КЭД и реальной, восьмилучевой, а также определялась необходимая степень выравнивания токов в лучах. Исследовалась эффективность значительно погружения электродов в морскую толщу. Проводилось также сравнительное моделирование для традиционных установок – токовых линии и петли с целью обоснования выбора именно кругового электрического диполя в качестве источника.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Здесь напомним, что мы сейчас предлагаем не выполнение собственно геофизического проекта, а его научно-техническое проектирование. Т.е. пока что сам проект является объектом научных исследований. Что касается самого геофизического эксперимента, то его народно-хозяйственный эффект, в случае исполнения, конечно же велик и касается национальных интересов.

Проект имеет уже свою историю и авторский коллектив. Впрочем, к исследованиям по проекту приглашаются все желающие. Проект уже предлагался для обсуждения научному сообществу, и готовятся публикации (русские и англоязычные). Авторы, безусловно, уверены в эффективности предлагаемых нетрадиционных электромагнитных зондирований, но имеют в виду и неизбежное соприкосновение эксперимента многими другими геофизическими исследованиями. Однако такой эксперимент должен быть тщательно подготовлен и обоснован. Необходимо выполнить сложное математическое моделирование, оценить технические параметры, провести сбор геолого-геофизической информации. Такой научно-обоснованный, подготовленный к реализации проект сам по себе имеет большое народно-хозяйственное значение, позволяя планировать, оценивать перспективы и рассматривать альтернативы.

Опять-таки подчеркиваем, что здесь предлагается работа по научно-техническому обоснованию предполагаемого крупного геофизического эксперимента в Арктике. Основные ожидаемые результаты следующие:

1. На основании собранной геолого-геофизической информации и соответственного математического моделирования (включая трехмерное) оценить эффективность предлагаемых зондирований;
2. На основании математического моделирования выбрать оптимальные схемы наблюдения электромагнитного сигнала;

3. Предложить алгоритмы обработки и интерпретации собираемых данных;

4. На основании моделирования оценить необходимые технические параметры экспериментальной установки.

Потенциальными потребителями научного результата по данному проектированию является, прежде всего, нефтегазовая отрасль России, в лице таких компаний как Газпром, Роснефть, которые, как известно, в последнее время планируют работы на арктическом шельфе в сотрудничестве с мировыми нефтяными компаниями (с поправкой на текущие геополитический и экономический кризисы). Как кажется, они заинтересованы в том, чтобы иметь в своем портфеле научно-обоснованные проекты по поиску и разведке углеводородных ресурсов по всему арктическому бассейну.

*Завершая текст, авторы должны поблагодарить М.Г. Персову, Ю.Г. Соловейчика и М. Гольдмана за сотрудничество по некоторым проблемам, затронутым здесь.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Злобинский А.В., Могилатов В.С. Электроразведка методом ЗВТ в рудной геофизике // Геофизика. 2014. №1. С.26-35.
2. Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика. Новосибирск: Изд. НГУ. 2014. 182 с.
3. Goldman M., Mogilatov V., Haroon A., Levi E. and Tezkan, B. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets // Geophysical Prospecting. 2015. Vol.63. Pp.192–210.

*РЕЦЕНЗЕНТ – доктор технических наук И.А.Безрук*

### ОБ АВТОРАХ



**МОГИЛАТОВ**  
Владимир Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики НГУ. Область научных интересов – физико-математические основы геоэлектрики с контролируемыми источниками.



**ЗЛОБИНСКИЙ**  
Аркадий Владимирович

Генеральный директор Научно-технической компании ЗаВеТ-ГЕО, кандидат технических наук, окончил физический факультет Новосибирского Государственного Университета в 1992 г. Область интересов – методика, обработка и интерпретация

результатов электромагнитных зондирований. Автор около 20 научных работ (1 монография).