

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XV Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.  
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,  
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 2

Новосибирск  
СГУГиТ  
2019

УДК 622.3  
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, главный научный сотрудник  
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск

*А. Э. Конторович*

Доктор технических наук, академик РАН, академик РАН, главный научный сотрудник  
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск

*М. И. Эпов*

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

*И. Н. Ельцов*

Кандидат технических наук, директор Института горного дела  
им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

*А. С. Кондратенко*

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор  
АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,  
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск

*М. Ю. Смирнов*

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу  
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск

*А. И. Неволько*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г.,  
Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 9 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф.  
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, развед-  
ки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэко-  
логия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 2. – 274 с. – ISSN 2618-981X  
DOI: 2618-981X-2019-2-2

В сборнике опубликованы материалы XV Международного научного конгресса  
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной конференции «Недро-  
пользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки  
месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622.3

© СГУГиТ, 2019

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ЛЕДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ В АРКТИКЕ**

### ***Полина Сергеевна Осипова***

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, магистрант; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

### ***Владимир Сергеевич Могилатов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

### ***Аркадий Владимирович Злобинский***

Научно-техническая компания «ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Восход, 26/1, оф. 56, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Электромагнитные зондирования арктического региона затруднены влиянием проводящего слоя морской воды. В рамках проекта РНФ для решения проблемы предлагается использовать для возбуждения поля круговой электрической диполь (КЭД). Установка должна быть размещена на дрейфующем льду. Такая методика требует трёхмерного моделирования, для которого существуют сложные алгоритмы. В работе предлагается подход с использованием борновского приближения для упрощения реализации трёхмерного моделирования сигнала электромагнитных зондирований с применением КЭД.

**Ключевые слова:** электроразведка, морские геоэлектромагнитные зондирования, круговой электрической диполь, вертикальная электрическая линия, борновское приближение.

## **SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC SOUNDING SIGNALS FROM THE ARCTIC ICE SURFACE**

### ***Polina S. Osipova***

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

### ***Vladimir S. Mogilatov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, e-mail: MogilatovVS@ipgg.sbras.ru

### ***Arkadiy V. Zlobinskiy***

STC «ZaVeT-GEO», of. 56, 26/1, Voskhod St., Novosibirsk, 630102, Russia, Ph. D., General Director, e-mail: zlobinskyav@newmail.ru

Electromagnetic sounding of the Arctic region is hampered by the influence of the conductive layer of seawater. As part of the RSF project, it is proposed to use a circular electrical dipole (CED) to excite the field. Installation should be placed on drifting ice. This technique requires three-

dimensional modeling for which there are complex algorithms. The paper proposes an approach using the Born approximation to simplify the implementation of three-dimensional modeling of the electromagnetic sounding signal using CED.

**Key words:** electrical exploration, marine geoelectromagnetic sounding, circular electrical dipole, vertical electrical line, Born approximation.

## Введение

Морские электромагнитные зондирования методами становления поля затруднены влиянием проводящего слоя морской воды. Успешное применение морской электроразведки выполнено в виде CSEM (controlled source electromagnetic method) [5, 6]. Однако, метод требует погружения установки на дно моря и огромные разности (~15 км).

Мы предлагаем методику, которая не зависит радикально от мощности слоя воды. В то же время она является чувствительной к аномальным объектам различной проводимости. Продемонстрируем ее применение для модели, используемой в CSEM (рис. 1). Суть заключается в возбуждении ТМ-поля круговым электрическим диполем (КЭД) с радиусом 500 м и с гармоническим режимом на частоте 1 Гц (как в CSEM).

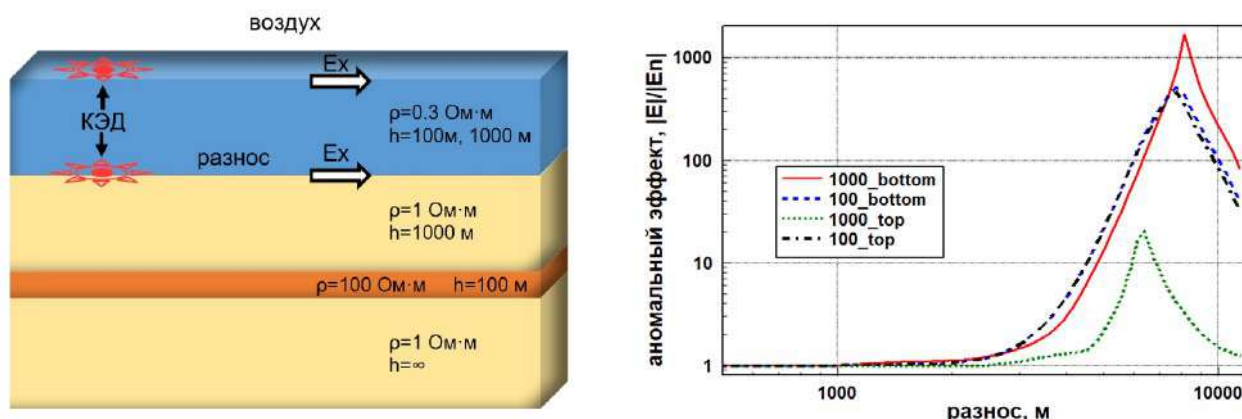


Рис. 1. Кривые отношений полного поля ( $E_r$ ) КЭД к нормальному. 1000\_bottom – КЭД на дне, море 1000 м; 100\_bottom – КЭД на дне, море 100 м; 1000\_top – КЭД на поверхности моря (1000 м); 100\_top – КЭД на поверхности моря (100 м)

Рассматривается море с мощностью слоя воды в 1000 м и 100 м, КЭД расположен как на дневной поверхности, так и на дне, объект – высокоомный тонкий пласт. На рис. 1 представлены результаты относительного аномального эффекта, который выражается в виде отношения аномального поля к нормальному (без пласта – объекта). Полученные большие величины относительного аномального эффекта означают малость нормального поля, то есть, измеряя полное поле, фактически, измеряем аномальное.

Такой результат говорит, что, как и в CSEM, мы имеем большой аномальный эффект. Но в случае размещения КЭД на поверхности 1000-метрового моря аномальный эффект падает до 2000%. Это означает, что влияние вмещающей толщи почти полностью скомпенсировано и пренебрежимо мало. Хотя разносы в этом примере велики, но, как показано в [7], в режиме становления поля от КЭД можно использовать небольшие разносы.

Таким образом, применение КЭД для электромагнитных зондирований с ледовой поверхности в Арктике оптимально [3]. Расположенные на дрейфующих льдинах станции проходят долгий путь в областях Арктики, где сведения о геологии дна чрезвычайно скудны. В проекте предполагается организация новых дрейфующих станций на базе самодвижущейся платформы. На них будет расположена система геофизических наблюдений, в том числе электромагнитных зондирований с использованием КЭД (рис. 2).

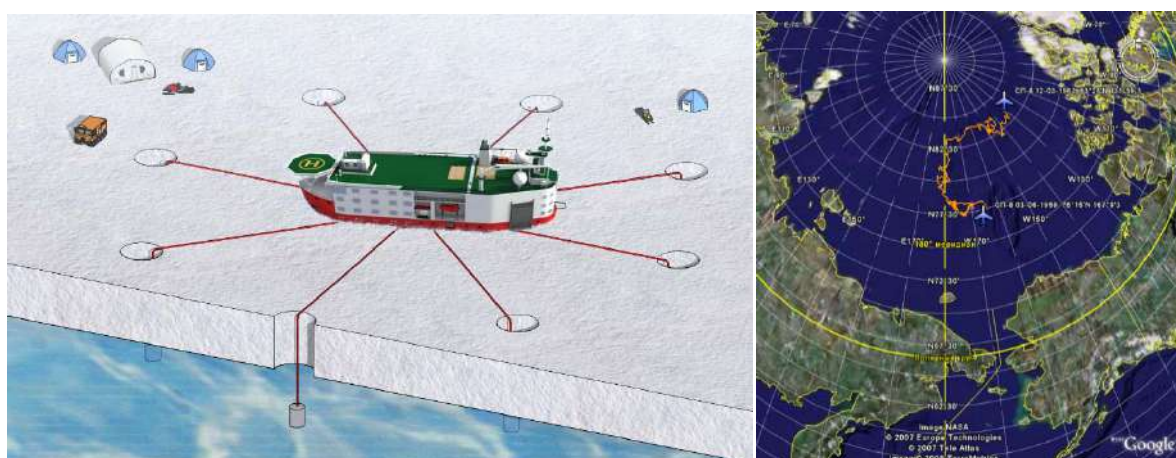


Рис. 2. Общий вид электрической питающей установки на арктическом льду и возможная область исследований (дрейф станции СП-8)

Ниже приводится обоснование к применению предлагаемой технологии зондирований с круговым электрическим диполем с поверхности моря. Основной целью на данный момент является создание оперативного математического обеспечения трехмерного характера.

### *Поле КЭД в одномерной среде*

Во введении сказано, что режим становления позволяет погасить фоновый одномерный сигнал и выявить аномальный без использования больших разносов и опускания установки на дно. На рис. 3 представлены графики процессов становления для частотного режима для одномерной среды, показанной на рис. 1. Здесь радиус КЭД равен 1414 м, ток 1000 А, разнос 2000 м. Получается аномальный эффект в измеримом диапазоне сигналов. Это говорит о том, что применение источника в виде КЭД в переходном режиме действительно позволяет убрать влияние вмещающей среды.

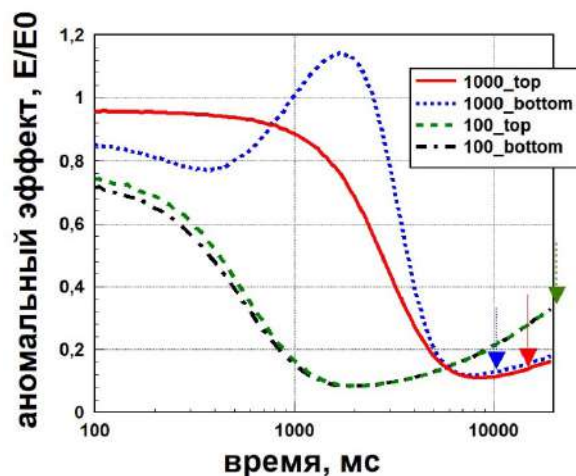


Рис. 3. Кривые отношений полного поля ( $E_r$ ) КЭД к нормальному. 1000\_bottom – КЭД на дне, море 1000 м; 100\_bottom – КЭД на дне, море 100 м; 1000\_top – КЭД на поверхности моря (1000 м); 100\_top – КЭД на поверхности моря (100 м). Вертикальные стрелки отмечают время, где сигналы уходят ниже уровня возможности измерения

### *Борновское приближение для 3D моделирования импульсного поля КЭД*

Как показано выше, нетрудно убедиться в эффективности питающей установки КЭД в случае одномерной среды. Одномерная проблема в геоэлектрике вполне освоена в вычислительном плане. Однако, настоящее исследование требует анализа трехмерной ситуации, поэтому были привлечены средства трехмерного моделирования. Для режима становления применяются сложные, ресурсоемкие программы, использующие метод конечных элементов (МКЭ) и требующие авторского сопровождения, особенно в нестандартных условиях. Необходимы более гибкие и оперативные процедуры, позволяющие моделировать и быстро интерпретировать получаемые сигналы. Такую процедуру можно построить на базе теории возмущений, известной в виде приближения Борна, что приводит к линеаризации задачи по отношению к небольшому трехмерному возмущению в одномерной среде. В геоэлектромагнитных практических аспектах этот подход предлагался в работе [2]. Однако, ранее борновское приближение было реализовано для задач индуктивной электроразведки, где преобладает поле ТЕ-поляризации. Поле кругового электрического диполя имеет ТМ-поляризацию, и, соответственно, вертикальную электрическую компоненту. Поэтому здесь борновское приближение будет работать хуже, поскольку оно не учитывает возмущения условий на границах. Тем не менее, попытаемся построить подобный алгоритм для поля КЭД в режиме становления.

Используем в качестве источника круговой электрический диполь с током  $I$ , радиуса  $a$  с центром в точке  $S(x_0, y_0)$  на дневной поверхности. Рассмотрим сначала гармонический режим. Нормальное решение (одномерное) известно:

$$E_{x,y,z}^0(x, y, z, S, \omega) = I \cdot e_{x,y,z}^0(x, y, z, S, \omega) \quad (1)$$

Пусть имеется некоторое возмущение проводимости  $\Delta\sigma$  в области  $V(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ . Здесь первое уравнение Максвелла есть:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \sigma_0 \cdot \mathbf{E} + \Delta\sigma \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  представляет одномерную среду. Будем рассматривать  $\Delta\sigma \cdot \mathbf{E}$  как дополнительный источник в 1D среде. Область возмущения можно представить совокупностью электрических диполей с моментами  $dI_{x,y,z} = \Delta\sigma \cdot E_{x,y,z}^0 \cdot d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}$ , где  $E_{x,y,z}^0$  – электрические компоненты нормального поля, которым мы заменяем полное поле. Замена полного поля нормальным как раз и даёт приближённое линейризованное решение.

При создании алгоритма расчета приближенного отклика от трехмерной среды использовались схемы и элементы полуаналитического «одномерного» математического аппарата. В результате написана и отлажена процедура расчёта аномального сигнала от локального прямоугольного объекта в программе 3D\_CED.

Для тестирования нового алгоритма привлечены расчеты по программе GeoPrep [3], где используется метод конечных элементов. Модель для расчета сигналов представлена на рис. 4. Она представляет собой трехслойную среду с высокоомным объектом, расположенном в первом слое осадков. Источник – КЭД на поверхности среды (моря). Выполнялись расчеты  $E_r$  и  $dBz/dt$  в 441 точке с шагом 500 м на поверхности.

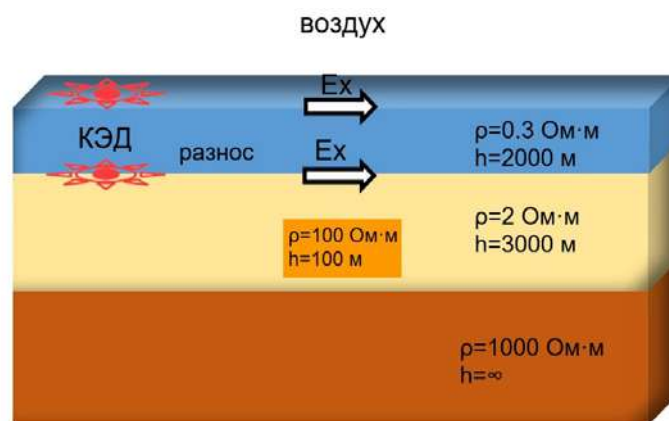


Рис. 4. Модель среды для выполнения расчетов по программам 3D\_CED и GeoPrep

Рис. 5 демонстрирует сравнение расчетов  $dBz/dt$  (точнее ЭДС с индуктивного датчика  $10^6 \text{ м}^2$ ) в виде площадных изображений сигнала на фиксированном времени становления (20,9 сек) по программам 3D\_CED и GeoPrep. Несмотря на большой момент датчика, сигнал весьма слаб. Неоднородность выделяется аномалиями разной полярности. Видно хорошее качественное и количе-

ственное соответствие. Однако результат не стоит переоценивать, так как приводится расчет аномального (оно же полное) магнитного поля, которое образуется за счет горизонтальных токов (TE-поле). Для него имеются лучшие условия для борновского приближения. Более показательное сравнение аномальных электрических полей (ЭДС с радиальной приемной линией 3000 м) на рис. 6.

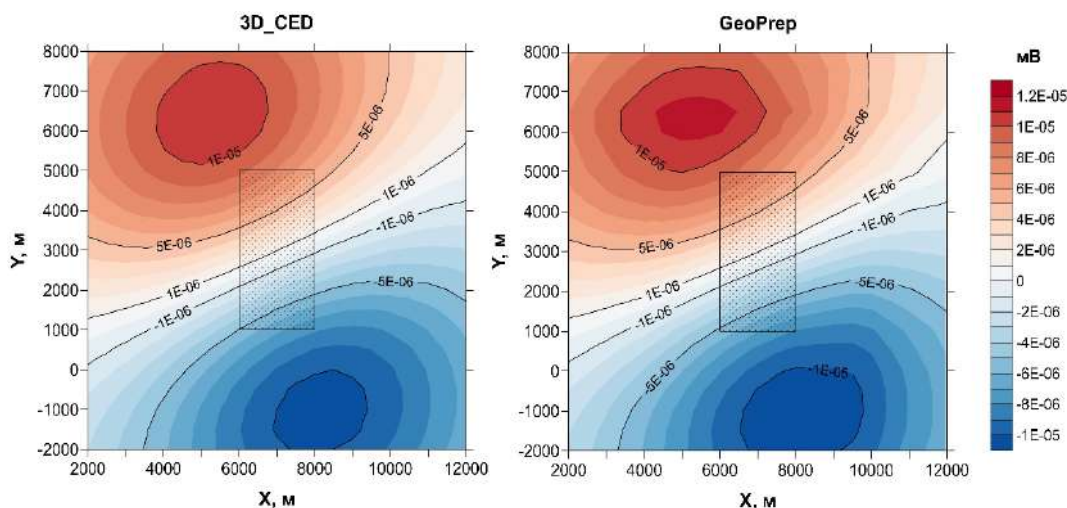


Рис. 5. Сравнение расчетов сигналов в виде карты изолиний ЭДС по программам 3D\_CED и GeoPrep в момент времени  $t=20900$  мс

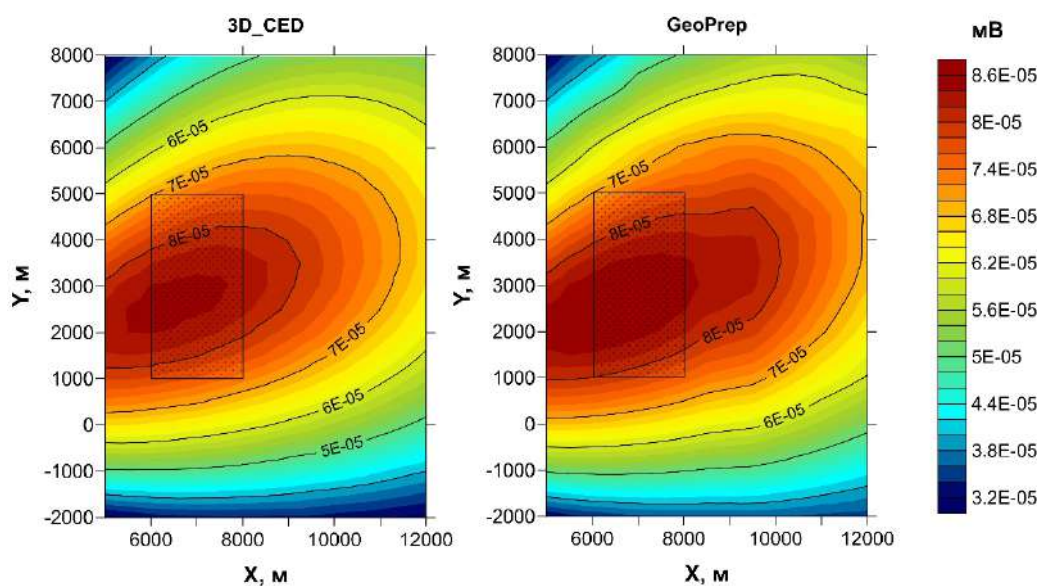


Рис. 6. Сравнение расчетов аномального поля ( $E_r$ ) по программам 3D\_CED и GeoPrep в момент времени  $t = 27300$  мс

С учетом условности сравнения точного и приближенного подхода сравним кривые становления для  $dBz/dt$  и  $E_r$  (рис. 7). Согласно принципам борновского приближения (низкочастотного), кривые лучше совпадают на поздних временах.



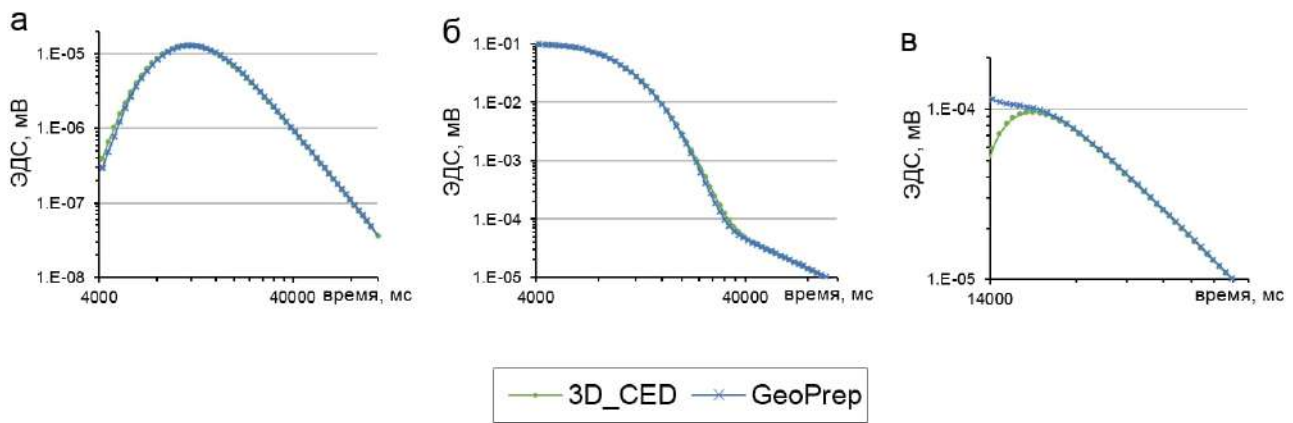


Рис. 7. Сравнение кривых становления в точке  $X = 8\ 000$ ,  $Y = 5\ 000$ :  
 а) кривые  $dB_z/dt$ ; б) кривые  $E_r$  суммарный сигнал; в) кривые  $E_r$  аномальный сигнал

Таким образом, показана работоспособность борновского приближения в режиме становления при расчете аномального поля КЭД. Далее проводится анализ с использованием только приближенного алгоритма.

### *Сравнение полей погруженной и поверхностной установки КЭД*

Погружение установки на дно при зондированиях с длительно дрейфующего льда противоречит идеи эксперимента. Выше было определено, что зондирование одномерной среды с поверхности моря при применении КЭД не уступает варианту с погруженной на дно установкой. Проверим эту возможность в трехмерном случае с помощью программы 3D\_CED.

На рис. 8 приведены кривые становления  $dB_z/dt$  и  $E_r$ .

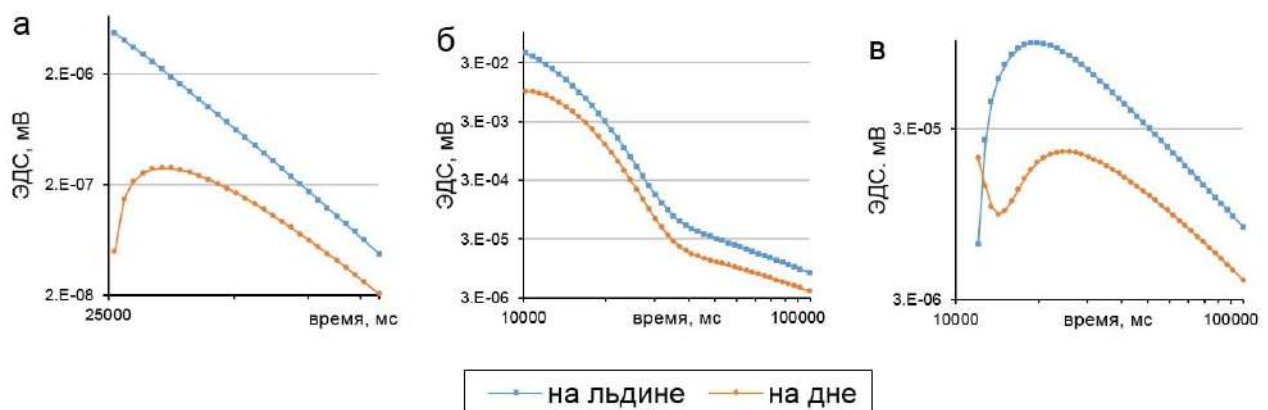


Рис. 8. Сравнение кривых становления на дне и на поверхности  
 в точке  $X = 8\ 000$ ,  $Y = 5\ 000$ :  
 а) кривые  $dB_z/dt$ ; б) кривые  $E_r$  суммарное; в) кривые  $E_r$  аномальное

Сигналы с донной установки имеют более сложный вид, что связано с квадрупольностью поля от погруженного КЭД. Здесь отклик формируется в результате взаимодействия двух тороидальных токовых систем – под КЭД и над КЭД в морском слое [7]. Тем не менее уровень сигналов не падает для поверхностной установки. Такой результат говорит о том, что установку можно без сомнений расположить на поверхности моря или на льдине.

### *Заключение*

Зондирование с поверхности моря с применением кругового электрического диполя решает основную проблему метода морской электроразведки. В рамках предполагаемого эксперимента в Арктике метод зондирования становится с применением КЭД серьезным дополнением системы геофизических наблюдений на дрейфующем льду.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 18-17-00095.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Геоэлектрический эксперимент в Арктике (проект) // Геофизика. – 2016. – № 1. – С. 75-80.
2. Могилатов В.С., Эпов М.И. Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Физика Земли. – 2000. – № 1. – С. 78-86.
3. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. – 2011. – № 2. – С. 3-14.
4. Constable S., Srnka L.J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // Geophysics. – 2007. – Т. 72. – №.2 – P. WA3-WA12.
5. Constable S. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration // Geophysics. – 2010. – Т. 75. – №. 5. – P. 75A67-75A81.
6. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets / M. Goldman, V. Mogilatov, A. Haroon, E. Levi, B. Tezkan // Geophysical Prospecting. – 2015. – Т. 63. – №. 1. – P. 192-210.
7. Mogilatov V.S., Zlobinsky A.V., Balashov B.P. Transient electromagnetic surveys with unimodal transverse magnetic field: ideas and result // Geophysical Prospecting. – 2017. – Т. 65. – № 5. – P. 1380-1397.

© П. С. Осипова, В. С. Могилатов, А. В. Злобинский, 2019