

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЬДА В АРКТИКЕ

В.С. Могилатов^{1,2}, П.С. Осипова^{1,2}, А.В. Злобинский³

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³ ООО «НТК ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Новосибирск, ул. Восход, 26/1, оф. 56, Россия

Морские геоэлектромгнитные зондирования с искусственными источниками сильно затруднены влиянием проводящего слоя морской воды. Известно лишь одно широкое успешное применение электроразведки в этой области — в виде CSEM. Однако метод имеет досадные ограничения: необходимость погружения установки на дно глубокого (более 1000 м) моря и огромные разносы (~ 15 км). В море, покрытом льдами, и этот метод не применим. Возможность глубинных зондирований с поверхности моря, а значит и с ледовой поверхности, возникает, если использовать поле ТМ-поляризации. Такое поле в чистом виде генерируется вертикальной электрической линией (ВЭЛ) или круговым электрическим диполем (КЭД). ВЭЛ имеет известные недостатки даже при применении в море. В то же время эффективность КЭД сохраняется в одномерной и трехмерной ситуациях, в частотном и временном режимах. Развивается трехмерный математический аппарат для устанавливающегося поля КЭД в борновском приближении, который в условиях проводящего разреза при наличии глубинных локальных неоднородностей вполне адекватен. Исследования проводятся в интересах геофизического проекта с использованием дрейфующих льдов в Арктике.

Морские геоэлектромгнитные зондирования, дрейфующий лед, круговой электрический диполь, вертикальная электрическая линия, борновское приближение, Арктика

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL SUBSTANTIATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING FROM THE ARCTIC DRIFT ICE

V.S. Mogilatov, P.S. Osipova, and A.V. Zlobinsky

Marine geoelectromagnetic sounding with artificial sources is strongly hindered by the influence of a conductive seawater layer. There is only one known wide successful application of electrical prospecting in this field — Controlled Source Electromagnetic Method (CSEM). However, this method has unfortunate limitations: the need to submerge an electromagnetic probe to the bottom of a deep (more than 1000 m) sea and the great rafting (~15 km). The method is not applicable in an ice-covered sea. Deep sounding from the sea surface and, hence, from the ice surface is possible if the TM polarization field is used. This field is generated by a vertical electric line (VEL) or a circular electric dipole (CED). The former has drawbacks even when it is used at sea. At the same time, a CED is efficient in one-dimensional and three-dimensional media in frequency and time modes. We have developed a three-dimensional mathematical tool for the CED field in the Born approximation, which is quite adequate in a conductive section with deep local inhomogeneities. The research is carried out within the framework of a geophysical project using the Arctic drift ices.

Marine geoelectromagnetic sounding, drift ice, circular electric dipole, vertical electric line, Born approximation, Arctic

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что морские геоэлектромгнитные зондирования с искусственными источниками, в особенности методами становления поля (зондирования становлением — ЗС), сильно затруднены влиянием проводящего слоя морской воды. Это основная принципиальная трудность морской электроразведки. Известно практически лишь одно широкое успешное применение электроразведки — в виде CSEM (Controlled Source Electromagnetic Method) [Constable, Srnka, 2007; Constable, 2010]. Однако метод имеет досадные ограничения: необходимость погружения установки на дно глубокого (более 1000 м) моря и огромные разносы (до 15 км). В море, покрытом льдами, и этот метод не применим.

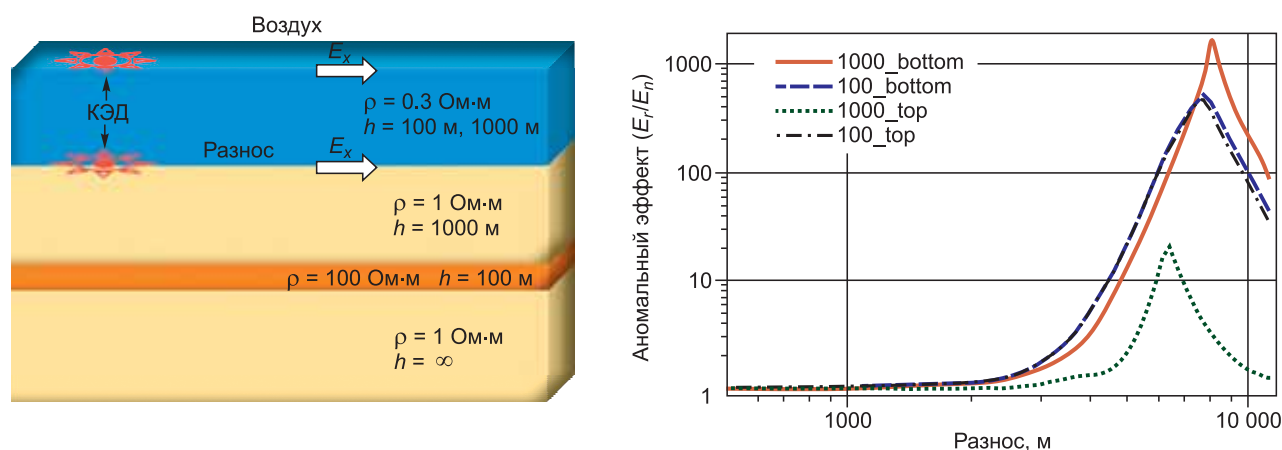


Рис. 1. Кривые отношений полного поля (E_r) КЭД к нормальному (E_n) (справа) для представленной модели (слева). Измерения производятся на уровне КЭД.

1000_bottom — КЭД на дне моря глубиной 1000 м; 100_bottom — КЭД на дне моря гл. 100 м; 1000_top — КЭД на поверхности моря (1000 м); 100_top — КЭД на поверхности моря (100 м).

С помощью ТМ-поля мы можем предложить методику, чувствительную к высокоомным, а также и к низкоомным аномальным объектам, более детальную и не зависящую радикально от глубины моря. Более того, ниже мы покажем, что эффективность этой методики не снижается при расположении установки на поверхности моря, что нам и требуется для зондирования с дрейфующего льда. Предварительно проиллюстрируем это, используя модель среды на рис. 1, которая часто используется в CSEM. Объектом является тонкий пласт высокого сопротивления на глубине 1000 м под дном. Для возбуждения ТМ-поля применяем установку круговой электрической диполь (КЭД) с радиусом 500 м, работающую в гармоническом режиме на частоте 1 Гц (как в CSEM).

В расчетах рассматривали море глубиной 1000 м и 100 м и помещали КЭД на дно и на дневную поверхность. Результаты представлены на рис. 1 в виде аномального эффекта — отношения полного поля к нормальному (без пласта-объекта). Тут мы следуем традиции в CSEM, но надо заметить, что столь большие величины аномального эффекта означают малость нормального поля, и измеряя полное поле, фактически измеряем аномальное. И оно вполне измеримо.

Итак, аномальный эффект велик, не хуже, чем в CSEM. Только в случае размещения КЭД на поверхности 1000-метрового моря аномальный эффект падает до 2000 %, но ведь это тоже означает, что влияние вмещающей толщи почти полностью скомпенсировано и пренебрежимо мало. Разносы в этом примере, конечно, велики. Но, как показано в [Goldman et al., 2015], в режиме становления поля от КЭД можно использовать небольшие разносы и точно определять границы объекта по латерали.

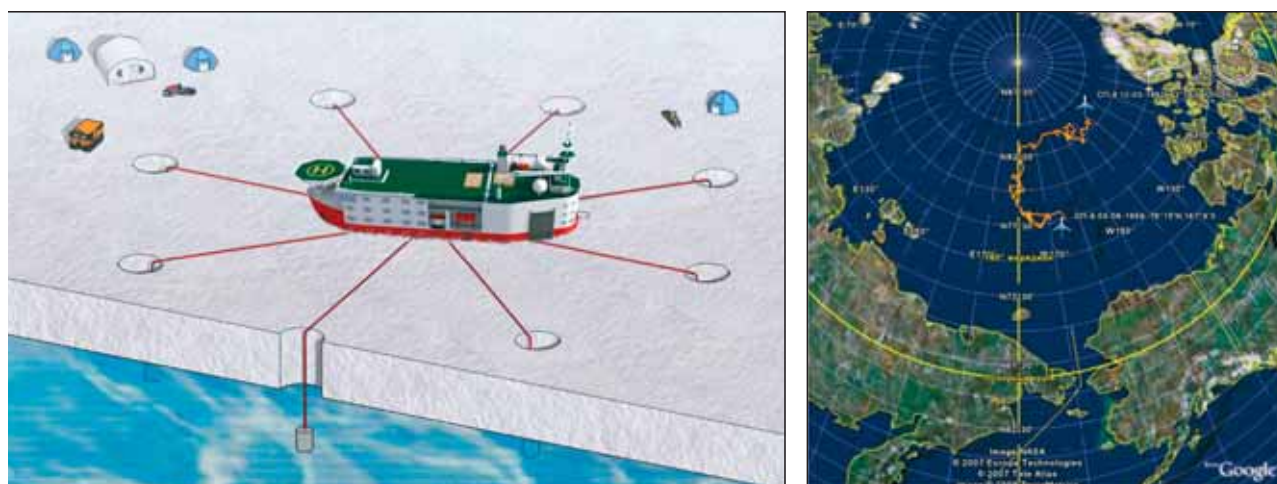


Рис. 2. Общий вид электрической питающей установки на арктическом льду при использовании ЛСП и возможная область исследований (дрейф станции СП-8).

Таким образом, для электромагнитных зондирований с ледовой поверхности в Арктике, при условии длительного дрейфа льда, применение КЭД является оптимальным и фактически безальтернативным [Могилатов, Злобинский, 2016]. Опыт станций СП показал, что в течение дрейфа станция проходит долгий путь в областях Арктики, где сведения о геологии дна чрезвычайно скудны. В наши дни предполагается организация новых дрейфующих станций на базе ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП), что придает проекту геофизических исследований Арктики, включая электромагнитные зондирования (рис. 2), новую реальность.

Ниже мы продолжаем обосновывать и развивать технологию зондирований с круговым электрическим диполем с поверхности льдины, и нашей основной целью здесь является создание оперативного математического обеспечения трехмерного характера.

УСТАНАВЛИВАЮЩЕЕСЯ ПОЛЕ КЭД В ОДНОМЕРНОЙ СРЕДЕ

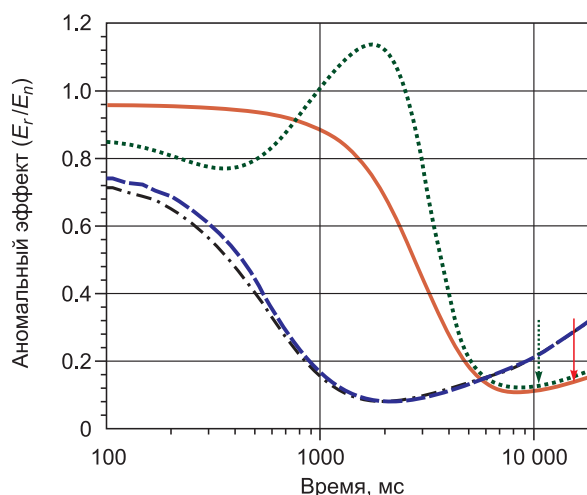
Итак, установка КЭД позволяет, в отличие от установки ABMN, применяемой в CSEM, размещать все элементы приемно-питающей конфигурации и производить все измерения на поверхности моря. Однако частотный режим требует больших разносов для компенсации нормального поля. Избавиться и от этого недостатка можно посредством переходного режима. Как уже сказано во «Введении», режим становления позволяет погасить фоновый, одномерный сигнал и выявить аномальный без использования больших разносов, притом с поверхности моря. Рассмотрим процесс становления в той же среде, что использовалась выше (см. рис. 1) для частотного режима. Здесь радиус КЭД равен 1414 м, ток 1000 А, разнос всего 2000 м. На рисунке 3 представлены во временном диапазоне кривые аномального эффекта для установки КЭД и измерений на поверхности моря и на дне, для глубокого (1000 м) и мелкого (100 м) моря. Во всех случаях мы имеем отличный аномальный эффект в измеримом диапазоне сигналов. Оценка внешнего шума в компонентах электрического поля приведена в работах [Constable, 2010; Flekkøy et al., 2012]. Вертикальная стрелка указывает время, на котором на единицу момента КЭД отклики достигают порогового шума $1\text{E-}15\text{ В}/(\text{А}\cdot\text{м}^2)$, определенного в упомянутой работе. Таким образом, источник в виде КЭД в переходном режиме позволяет убрать влияние вмещающей среды при размещении всей установки на поверхности в мелком и глубоком море при использовании небольших разносов.

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ КЭД В БОРНОВСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Как показано выше, нетрудно убедиться в эффективности питающей установки КЭД в случае одномерной среды. Соответствующее математическое обеспечение доступно в существующих вариантах и легко может быть воссоздано, поскольку одномерная прямая проблема в геоэлектрике вполне освоена в вычислительном плане. Однако современное исследование считается недостаточным без анализа трехмерной ситуации. Разумеется мы привлекали уже средства трехмерного моделирования. В режиме становления — это сложные и ресурсоемкие программы методом конечных элементов, которые требуют авторского сопровождения, особенно в нестандартных условиях. Конечно, в случае реализации проекта и соответствующего финансирования такие программы будут привлекаться для проверки результатов интерпретации и углубленного моделирования. Однако уже сейчас для обоснования предлагаемой методики с «дрейфующим КЭД» мы нуждаемся в гибких оперативных процедурах, позволяющих не только моделировать, но и наметить контуры интерпретационной технологии. Такую процедуру можно построить на базе теории возмущений, которая давно и широко применяется в физике в разных областях и наибольшую известность получила в виде приближения Борна, что приводит к линеаризации прямой задачи по отношению к небольшому трехмерному возмущению в одномерной среде. Линеаризация как раз и дает перспективу трехмерной инверсии на основе обращения линейных систем, связывающих данные и линеаризованное представление прямой задачи. В геофизике этот подход также широко приме-

Рис. 3. Кривые отношений полного поля (E_r) КЭД к нормальному (E_n).

Усл. обозн. см на рис. 1. Стрелки отмечают время, где сигналы уходят ниже уровня возможности измерения.



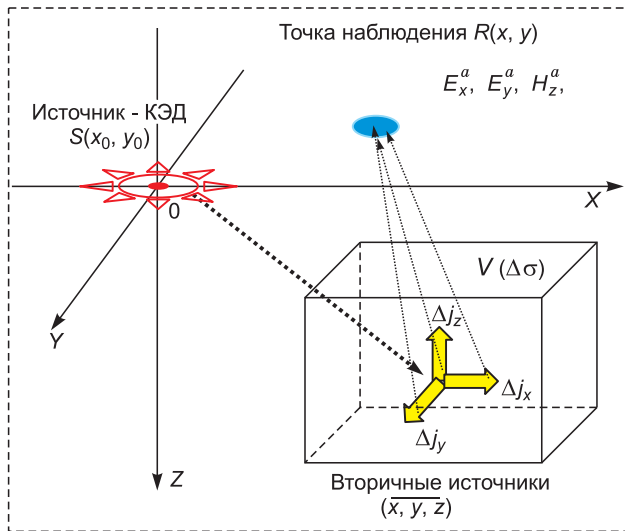


Рис. 4. Схема генерации аномального отклика вторичными токами.

няется и имеет достаточное описание, например, в работе [Жданов, 2007]. В геоэлектромагнитных практических аспектах давно предлагался такой подход в [Могилатов, Эпов, 2000]. Однако ранее мы вполне успешно реализовывали борновское приближение в задачах индуктивной электроразведки, в которой преобладает поле ТЕ-поляризации. Поле кругового электрического диполя имеет ТМ-поляризацию и, соответственно, вертикальную электрическую компоненту. Поэтому здесь борновское приближение будет работать хуже, поскольку не учитывает возмущения условий на границах. Тем не менее попытаемся построить подобный алгоритм для поля КЭД в режиме становления.

Итак, источник — круговой электрический диполь с током I , радиуса a с центром в точке $S(x_0, y_0)$ на дневной поверхности (для определенности). Рассмотрим сначала гармонический режим. Нормальное (одномерное) решение 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 $V(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. В этой области первое уравнение Максвелла есть:

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

где σ_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 (не возмущенного) поля, которым мы заменяем полное поле. Замена полного поля нормальным как раз и дает приближенное линеаризованное решение. На рисунке 4 проиллюстрирована эта схема генерации аномального отклика возмущения $\Delta\sigma$ проводимости в прямоугольной области V .

Итак, полагая, что возмущение $\Delta\sigma$ в области V в целом слабо влияет на суммарный процесс становления, мы должны учесть в точке наблюдения $R(x, y)$ на дневной поверхности поля всех вторичных горизонтальных и вертикальных диполей, т. е. рассчитать все члены вида

$$I \cdot \Delta\sigma \cdot \iiint_V e_{x,y,z}^0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, S, \omega) e_{x,y,z}(R, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \omega) d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}. \quad (3)$$

Приведем подробно, в качестве примера, только вклад вертикального поля КЭД в аномальную часть компоненты E_x , т. е.

$$E_x^a = I \cdot \Delta\sigma \cdot \iiint_V e_z^0(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, S, \omega) e_z(R, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \omega) d\bar{x}d\bar{y}d\bar{z}, \quad (4)$$

для чего мы должны знать поле КЭД в среде и поле вертикального электрического диполя. Вертикальная электрическая компонента КЭД [Могилатов, 2014]

$$E_z(r, z, \omega) = -\frac{I}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) [1 - J_0(\lambda a)] \lambda V(z, \lambda, \omega) d\lambda, \quad (5)$$

где функция — решение соответствующей краевой задачи и удовлетворяет уравнению

$$V_{zz}'' - u_i^2 V = 0 \quad (6)$$

и $u_i = \sqrt{\lambda^2 + k_i^2}$, $k_i^2 = -i\omega\mu_0\sigma_i$, $i = 0, 1, \dots, N$ — номера слоев. Поле вертикального электрического диполя с моментом $I dz$, в свою очередь, есть (в позиции в начале координат)

$$E_r(r, z, \omega) = -\frac{I dz}{4\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda r) \lambda Z(z, \lambda) d\lambda, \quad (7)$$

где функция Z также удовлетворяет уравнению (6) [Уэйт, 1987].

Аномальное поле теперь вместо (4) представится в виде

$$E_x^a(R, S, \omega) = I \Delta \sigma \frac{1}{(4\pi)^2} \int_0^\infty \int_0^\infty T(\lambda, \lambda') \lambda \lambda' Y(\lambda, \lambda', \omega) d\lambda' d\lambda, \quad (8)$$

где

$$Y(\lambda, \lambda', \omega) = \int_{z_1}^{z_2} V(\lambda, \omega, \bar{z}) Z(\lambda', \omega, \bar{z}) d\bar{z} = \left[\frac{V'_z(\lambda) Z(\lambda') - X(\lambda) Z'_z(\lambda')}{\lambda^2 - \lambda'^2} \right]_{z_1}^{z_2},$$

$$T(\lambda, \lambda') = [1 - J_0(\lambda a)] \cdot \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \phi(S, R, \bar{x}, \bar{y}) J_1(\lambda r_1) J_0(\lambda' r) d\bar{x} d\bar{y},$$

$$r_1 = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2},$$

x_p, y_p, z_i — границы прямоугольного объекта, ϕ — геометрический фактор, учитывающий взаимное расположение источника, приемника и объекта (угловой коэффициент). Следует еще рассмотреть Y при $\lambda = \lambda'$. Во временной области решение получается преобразованием Фурье выражения (8)

$$F(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{-i\omega} f(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (9)$$

Этот алгоритм программно реализован. При написании кодов (на языке Фортран) учитывалось, что функция (интеграл) T не зависит от частоты и рассчитывается один раз, а при вычислении матрицы значений $Y(\lambda, \lambda')$ используются заранее рассчитанные векторы $V(\lambda)$, $Z(\lambda)$. В целом можно сказать, что при создании алгоритма расчета приближенного отклика от трехмерной среды использовались алгоритмы и элементы полуаналитического «одномерного» математического аппарата. В результате написана и отлажена процедура 3D_CED расчета аномального сигнала от локального прямоугольного объекта.

Для тестирования мы привлекли расчеты по программе GeoPrep [Персова и др., 2011]. В программе используется метод конечных элементов. Сравнительные расчеты по программам 3D_CED и GeoPrep были произведены для следующих условий (рис. 5):

- 1) среда трехслойная: $\rho = 0.3, 2, 1000$ Ом·м, $d = 2000, 3000$ м;
- 2) объект: $\rho = 100$ Ом·м, размер $2000 \times 4000 \times 100$ м, кровля на глубине 4000 м;
- 3) КЭД: радиус 5000 м, ток 1000 А, на поверхности среды (моря), в начале координат;
- 4) наблюдения: E_r и dB_z/dt в 441 точке с шагом 500 м на поверхности.

На рис. 6 приведено сравнение расчетов dB_z/dt (точнее ЭДС с индуктивного датчика 10^6 м²) по программам 3D_CED и GeoPrep. Расчеты приведены в виде площадных изображений сигнала на фиксированном времени становления (20.9 с). Неоднородность (обозначенная в плане прямоугольником) вполне отмечается аномалиями разной полярности.

Видно хорошее качественное и количественное соответствие. Все же этот результат не стоит переоценивать, так как приводится расчет для аномального (оно же полное) магнитного поля, которое образуется за счет горизонтальных токов (ТЕ-поле), и, следовательно, имеются лучшие условия

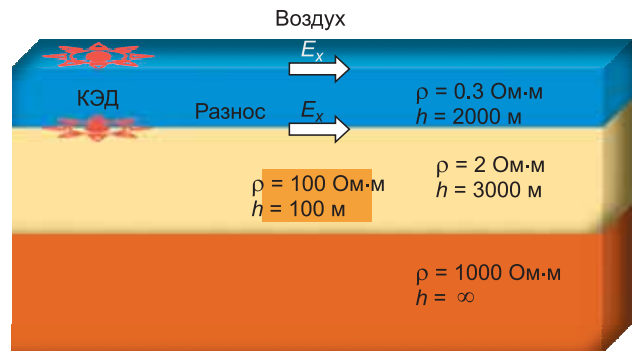


Рис. 5. Модель среды для выполнения расчетов по программам 3D_CED и GeoPrep.

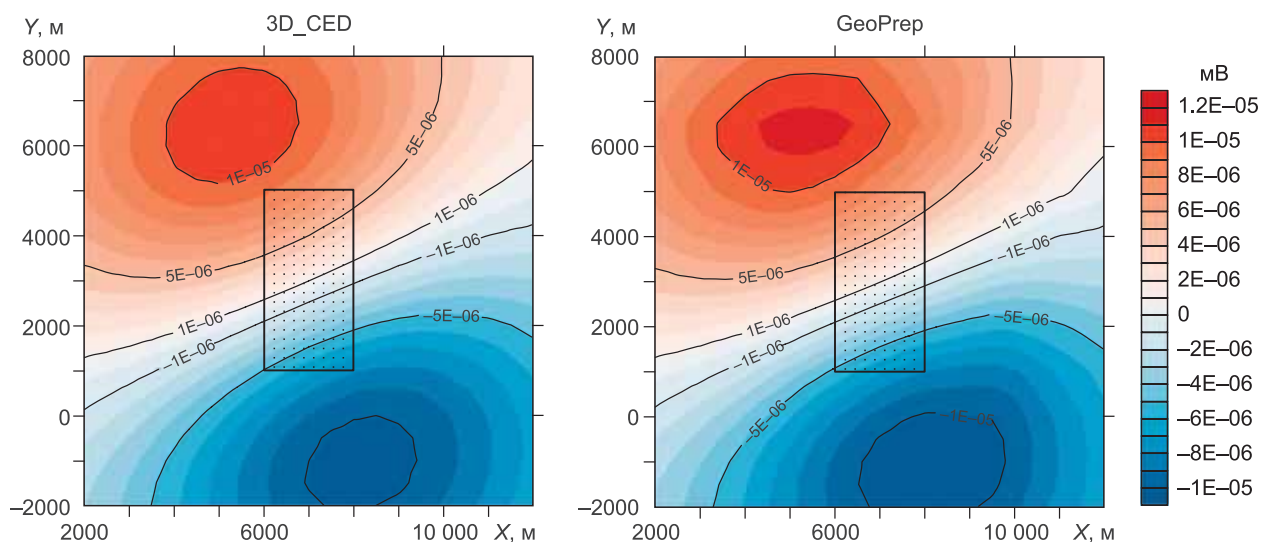


Рис. 6. Сравнение расчетов сигналов в виде карты изолиний ЭДС по программам 3D_CED и GeoPrep в момент времени $t = 20.9$ с.

для борновского приближения. Отметим также, что, несмотря на очень большой момент датчика (но такой все же возможен), сигнал весьма слаб.

Более показательно сравнение аномальных электрических полей. На рисунке 7 дается такое сравнение (точнее ЭДС с радиальной приемной линии 2000 м). С геофизической точки зрения результат вполне удовлетворителен. Наконец, сравним кривые $(dB_z/dt$ и E_r — суммарное и аномальное) становления на рис. 8. Соответственно принципам борновского приближения (низкочастотного), кривые лучше совпадают на поздних временах.

Мы здесь говорим о совпадении, имея в виду условность сравнения точного и приближенного подхода. Впрочем расчет методом конечных элементов имеет свои проблемы на ранних временах. В целом же сравнение показывает работоспособность борновского приближения в режиме становления при

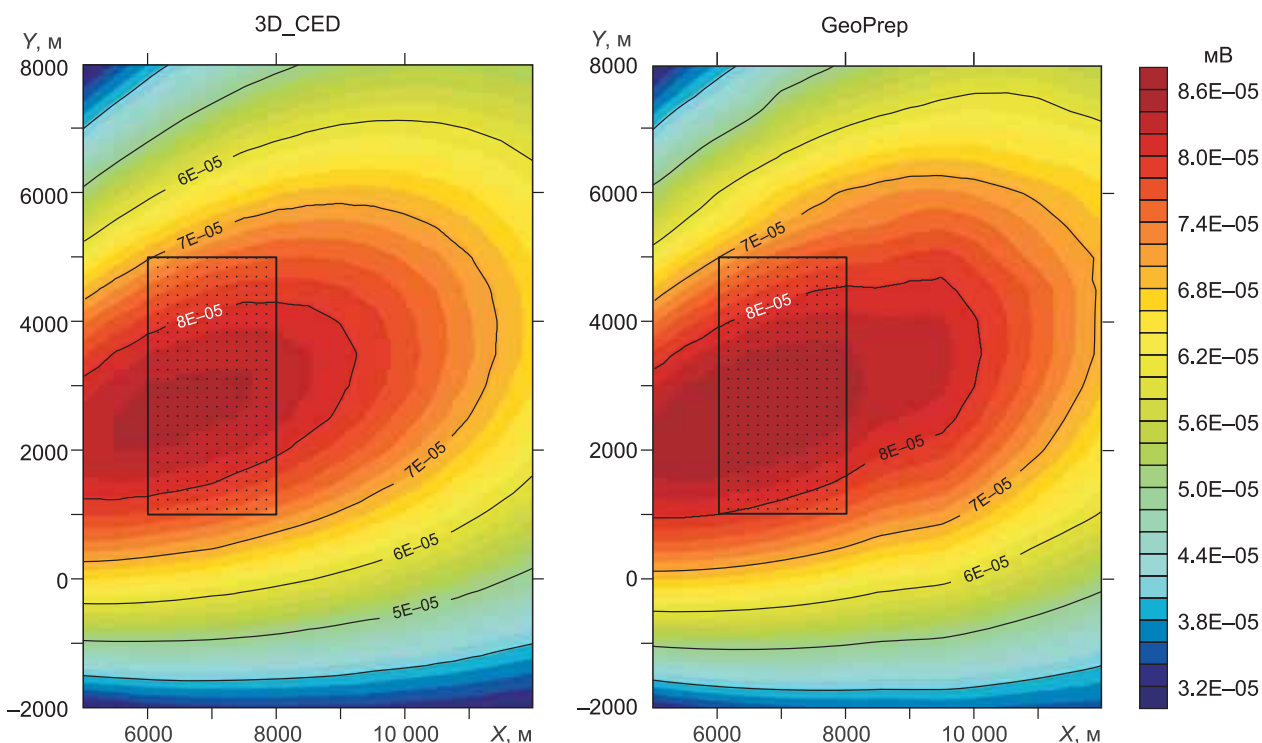
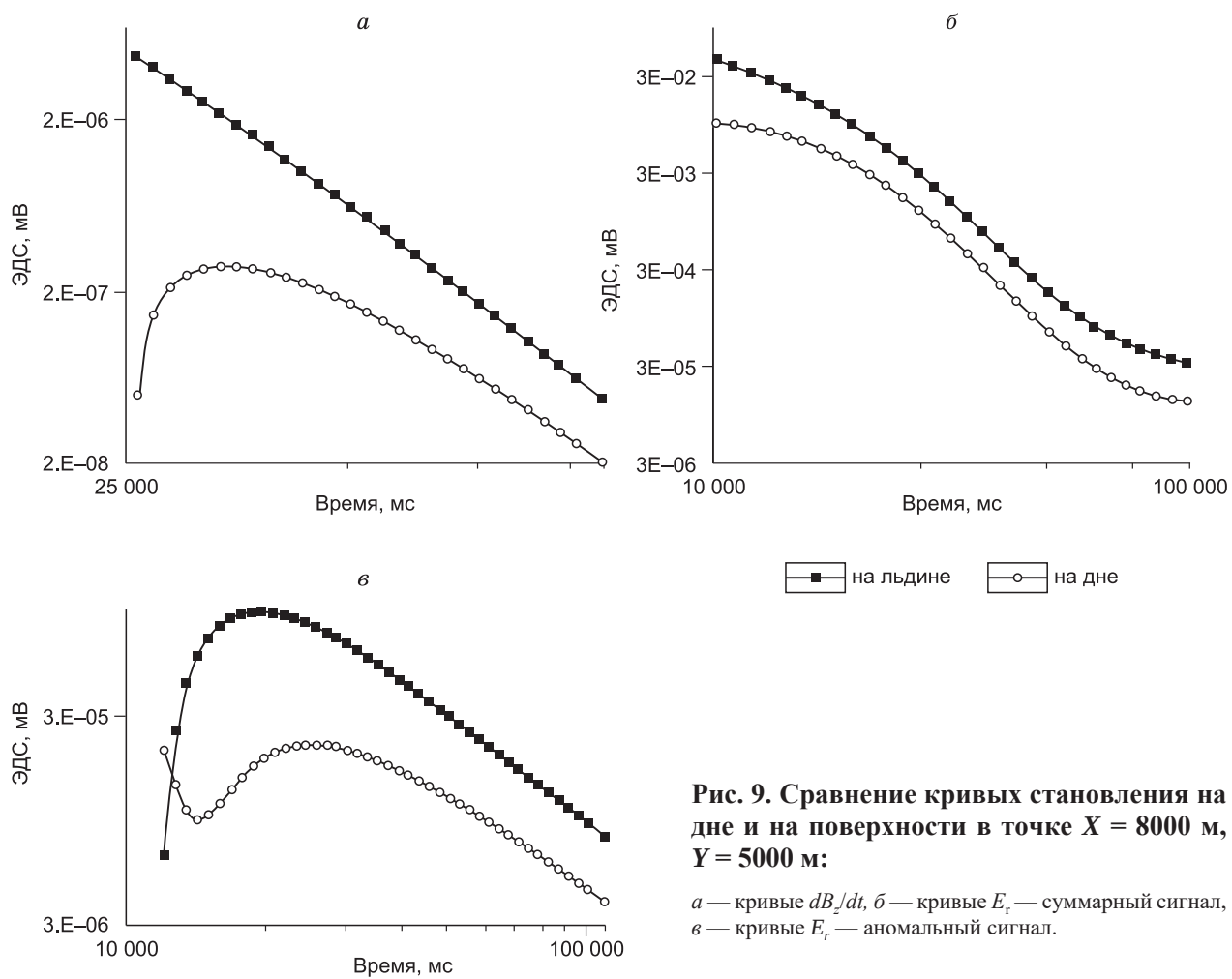
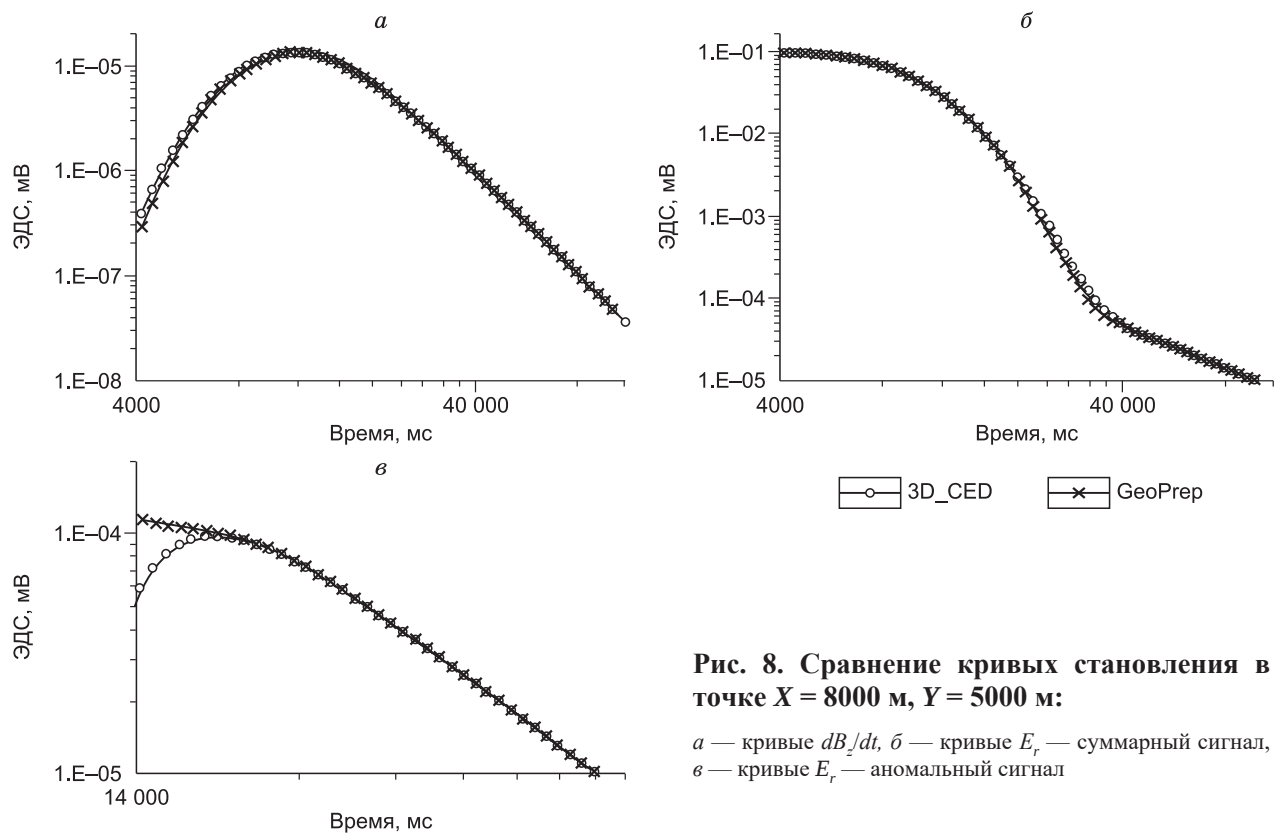


Рис. 7. Сравнение расчетов аномального поля (E_r) по программам 3D_CED и GeoPrep в момент времени $t = 27.3$ с.



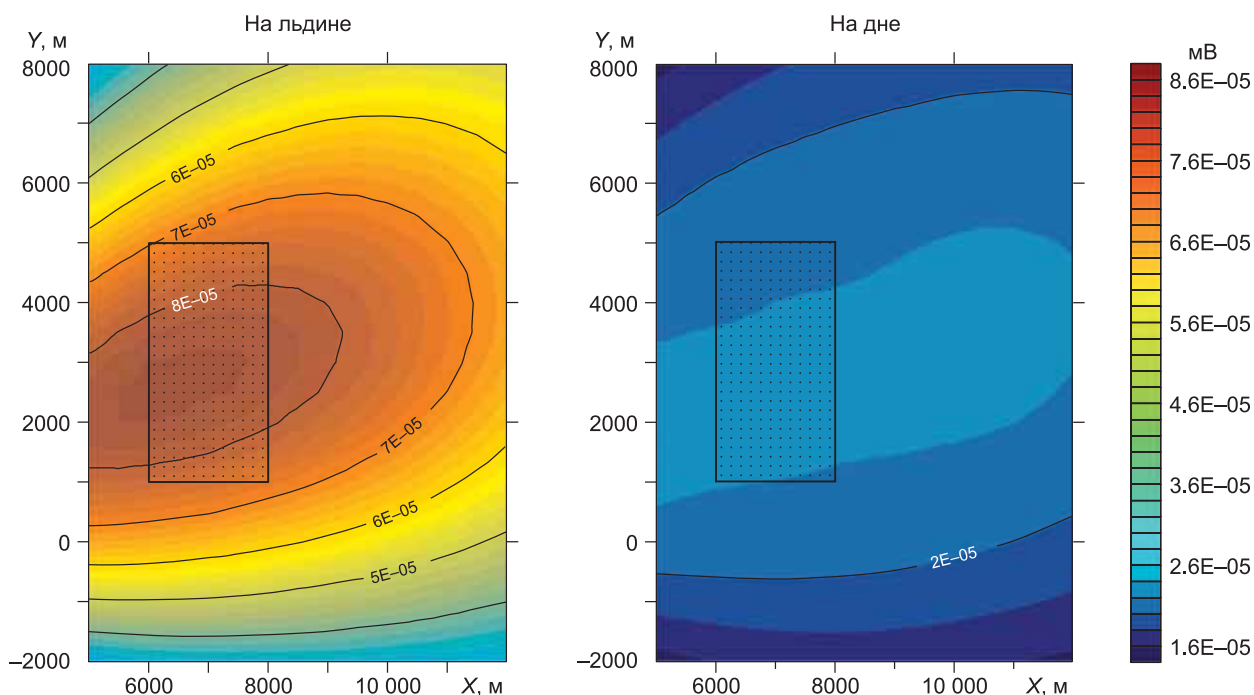


Рис. 10. Аномальное электрическое поле E_r в случае установки на поверхности и на дне в момент времени $t = 27.3$ с.

расчете аномального поля КЭД. Наша модель, вполне актуальная для моделирования зондирований в Арктике с поверхности моря и для выявления неоднородности на большой глубине, конечно же, благоприятна для борновского приближения. Так что мы можем продолжить анализ, пользуясь уже приближенным алгоритмом.

СРАВНЕНИЕ ПОЛЕЙ ПОГРУЖЕННОЙ УСТАНОВКИ КЭД И НА ПОВЕРХНОСТИ

В морской электроразведке есть устоявшееся мнение, что установку надо погружать на дно, приближая к объекту исследования. Конечно, это весьма обоснованно и понятно с физической точки зрения. Однако для предлагаемой методики зондирований с дрейфующего льда донная установка совершенно неприемлема. Нам необходимо показать, что приемно-питающая установка с КЭД не теряет в эффективности при расположении на поверхности моря (на льду). Собственно мы уже выше выяснили, что много мы не теряем, если зондируем с поверхности моря одномерную среду (при применении КЭД,

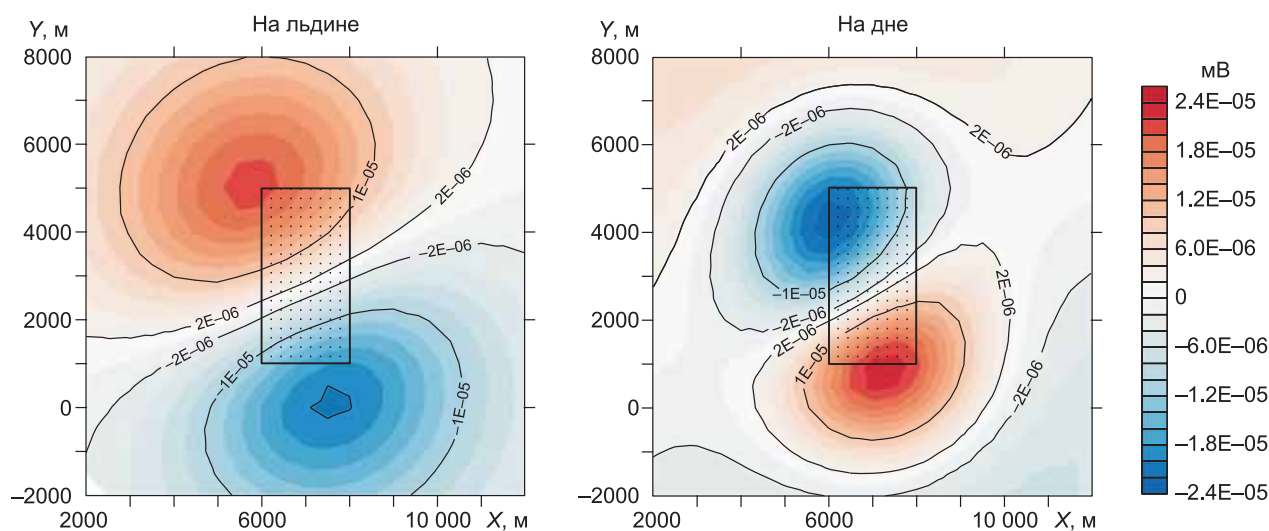


Рис. 11. Сравнение B_z/dt на поверхности и на дне.

разумеется). А что произойдет, если объект локальный? Используем теперь программу 3D_CED и сравним аномальный эффект с погруженной установкой и поверхностной.

На рисунке 9, где приведены кривые становления, можно видеть, что сигналы с донной установки имеют более сложный вид. Это проявление более сложного характера становления поля погруженного КЭД. Дело в том, что поле погруженного КЭД является квадрупольным. Отклик формируется в результате взаимодействия двух тороидальных токовых систем — под КЭД и над КЭД в морском слое. Мы это обсуждали в [Mogilatov et al., 2017]. Между тем из рис. 9 и 10 следует, что уровень сигналов, по меньшей мере, не падает на поверхности. Приведем еще сравнение магнитных измерений (dB_z/dt) на рис. 11. Картины качественно совершенно разные, но уровень сигнала остается общим.

В сущности, мы получили важный, хотя и несколько парадоксальный результат — погружение КЭД только вредит эффективности этого источника. Так что есть все основания без всяких сожалений помещать установку на поверхность моря, что нас крайне устраивает в контексте зондирований с непрерывно дрейфующего льда.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ

Настойчиво предлагая круговой электрический диполь в качестве питающей установки на дрейфующем льду, мы должны также рассмотреть более простой источник в виде вертикальной электрической линии (ВЭЛ). Известно, что КЭД аналог ВЭЛ, и оба являются источниками поля ТМ-поляризации, которая и обеспечивает высокую эффективность зондирований. Эта аналогия обеспечивает даже и количественное совпадение при выполнении определенного соотношения между моментами. Это демонстрируется на рис. 12.

Применение ВЭЛ в море рассматривалось и изучалось. Приведем, например, основательную работу [Barsukov, Fainberg, 2016]. Имеется практический опыт работы с таким источником у фирмы Рет-

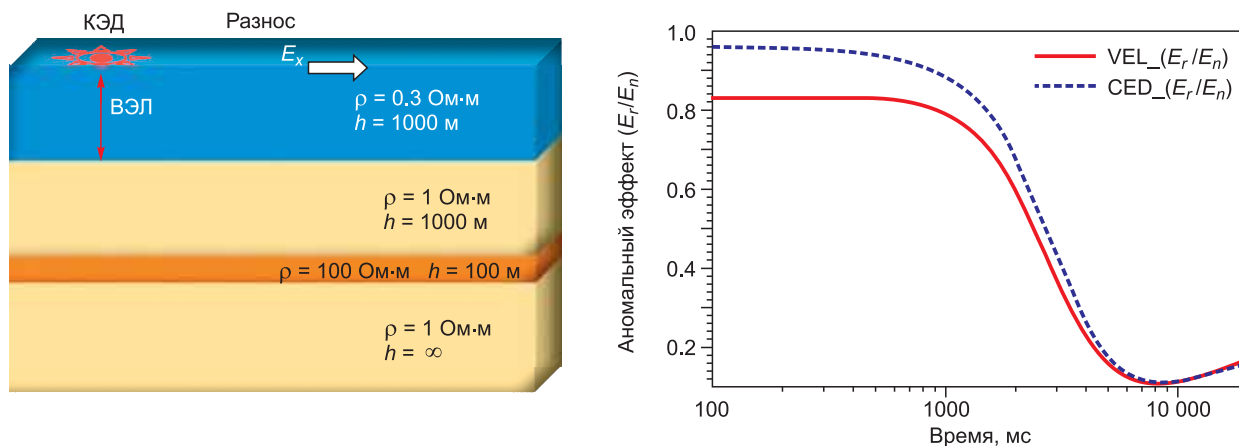


Рис. 12. Сравнение полей ВЭЛ и КЭД в форме аномальных эффектов от слоя повышенного сопротивления.

Радиус КЭД 1441 м, разнос 2000 м.

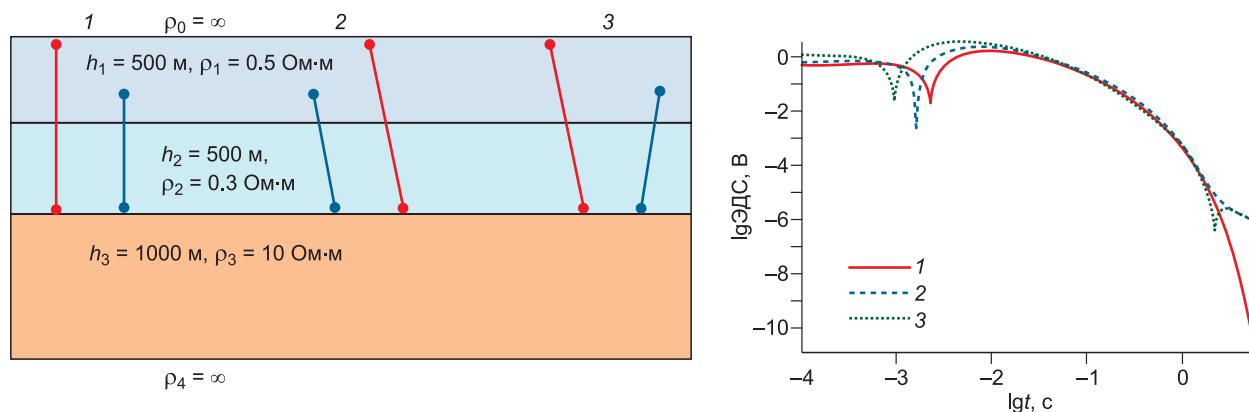


Рис. 13. Влияние наклонов. Модель среды, три ситуации (1—3) с установкой и кривые ЭДС.

гоMarker AS (Норвегия). Тем не менее мы считаем ВЭЛ неподходящим источником. Во-первых, он будет подвержен наклонам и колебаниям, что весьма критично сказывается на качестве ТМ-поля. На рисунке 13 приведены результаты моделирования устанавливающегося поля «почти» вертикальной линии при измерении «почти» вертикальной же линией (длина питающей 1000 м, приемной 600 м, разнос 100 м). Для расчетов использовалась довольно нетривиальная (хотя и одномерного характера) программа EInc2, разработанная нами и позволяющая делать расчет для произвольных наклонных линий в слоистых средах. Итак, даже небольшие наклоны (здесь 2°) приводят к качественному изменению отклика, включая даже смену знака.

Второй явный недостаток состоит в том, что длина ВЭЛ зависит от глубины моря. В процессе дрейфа глубина моря может значительно меняться от нескольких сотен метров до 4000 м. Нам нужен мощный источник, но длина ВЭЛ может быть недостаточной. Все же при проектировании электромагнитного эксперимента на дрейфующем льду следует иметь ВЭЛ «в запасе», на случай дезинтеграции ледовых полей и повреждения КЭД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конечно, в данной работе не рассмотрены еще многие важные и практические проблемы применения масштабной установки КЭД на льду. В первую очередь следовало бы исследовать влияние процессов вызванной поляризации на сигналы от такой сугубо гальванической установки, а также стабильность геометрии установки при закреплении на дрейфующем льду. Тем не менее, в принципе, применение кругового электрического диполя решает основную проблему морской электроразведки — экранирующее влияние слоя морской воды и даже при зондированиях с поверхности моря. Это позволяет предложить КЭД в качестве источника на дрейфующем льду. Метод зондирования становлением в таком формате может занять достойное место в геофизическом комплексе в рамках предполагаемого эксперимента по изучению геологии дна Арктического бассейна в условиях, когда традиционные геофизические методы невозможно применять. Хотя это не касается сути данной работы, но можно указать на еще одно применение КЭД — в качестве приемной установки для регистрации в магнитотеллурических зондированиях, что позволяет регистрировать вертикальную компоненту магнитотеллурического поля на большой глубине. Это серьезная новация и существенное дополнение электромагнитной составляющей геофизического эксперимента на дрейфующем льду в Арктике.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Жданов М.С.** Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М., Научный мир, 2007, 710 с.
- Могилатов В.С.** Импульсная геоэлектрика. Новосибирск, Изд-во НГУ, 2014, 182 с.
- Могилатов В.С., Эпов М.И.** Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Физика Земли, 2000, № 1, с. 78—86.
- Могилатов В.С., Злобинский А.В.** Геоэлектрический эксперимент в Арктике (проект) // Геофизика, 2016, № 1, с. 75—80.
- 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.
- Уэйт Дж. Р.** Геоэлектромагнетизм. Пер. с англ. М., Недра, 1987, 235 с.
- Barsukov P.O., Fainberg E.B.** Marine transient electromagnetic sounding of deep buried hydrocarbon reservoirs: principles, methodologies and limitations // Geophys. Prosp., 2017, v. 65, № 3, p. 840—858.
- Constable S.** Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration // Geophysics, 2010, v. 75, № 5, p. 75A67—75A81.
- Constable S., Srnka L.J.** An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // Geophysics, 2007, v. 72, № 2, p. WA3—WA12.
- Goldman M., Mogilaton V., Levi E., Tezkan B., Haroon A.** Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets // Geophys. Prosp., 2015, v. 63, № 1, p. 192—210.
- Flekkøy E., Haland E., Maløy K.** Comparison of the low-frequency variations of the vertical and horizontal components of the electric background field at the sea bottom // Geophysics, 2012, v. 77, p. E391—E396.
- Mogilaton V.S., Zlobinsky A.V., Balashov B.P.** Transient electromagnetic surveys with unimodal transverse magnetic field: ideas and result // Geophys. Prosp., 2017, v. 65, № 5, p. 1380—1397.