

Оригинальная статья / Original article  
УДК: 550.834.05

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕТОДЕ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НЕПСКОГО СВОДА ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

© И.К. Семинский<sup>1</sup>, В.С. Емельянов<sup>2</sup>, Р.Г. Гусейнов<sup>3</sup>, И.В. Буддо<sup>4</sup>,  
А.А. Макаров<sup>5</sup>, Ю.А. Агафонов<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>1,2,4-6</sup>АО «Иркутское электроразведочное предприятие»,  
Российская Федерация, 664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а.

<sup>3</sup>Иркутский научный центр СО РАН,  
Российская Федерация, 664054, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

**РЕЗЮМЕ. Цель.** Ввиду усложнения задач, стоящих перед современной электроразведкой и, в частности, перед методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), необходима оптимизация методики зондирования. Целью данного исследования является оптимизация методики ЗСБ на предполевом этапе путем выбора оптимального размера источника электромагнитного поля. **Метод ЗСБ.** Одним из наиболее распространенных методов индуктивной электроразведки при изучении нефтегазоносности осадочного чехла юга Сибирской платформы является метод ЗСБ. В статье рассматривается новая методика выбора оптимального размера источника электромагнитного поля, основанная на трехмерном моделировании и зашумлении сигналов, применительно к конкретным геологическим условиям. Известно, что размер источника электромагнитного поля установки ЗСБ напрямую влияет на горизонтальную разрешающую способность метода, а точнее, на отношение сигнал/помеха. Однако работа с большими источниками электромагнитного поля, обеспечивающими высокое отношение сигнал/помеха, не всегда выгодна с производственной точки зрения. Известно, что для подготовки к работе на местности установки с большей длиной стороны источника требуется больше производственных ресурсов, среди которых время, количество техники и персонала. Существуют стандарты для выбора геометрических параметров установки, однако со времени их написания прошло более тридцати лет и необходима более современная методика, основанная на численных критериях. Применение предложенной методики позволяет решить геологическую задачу (картировать аномалию от объекта исследования на заданном уровне помех) при оптимальных производственных и финансовых затратах. **Результаты.** В качестве примера выбран оптимальный размер источника электромагнитного поля для геологических условий Непского свода. Непский свод, располагающийся в центральной части

---

<sup>1</sup>Семинский Игорь Константинович, аспирант ИРНТУ, геофизик АО ИЭРП, e-mail: iks@ierp.ru  
Igor K. Seminskiy, INRTU Postgraduate, Geophysicist of Irkutsk Electroprospecting Company JSC, e-mail: iks@ierp.ru

<sup>2</sup>Емельянов Вячеслав Сергеевич, аспирант ИРНТУ, геофизик АО ИЭРП, e-mail: evs@ierp.ru  
Vyacheslav S. Yemelianov, INRTU Postgraduate, Geophysicist of Irkutsk Electroprospecting Company JSC, e-mail: evs@ierp.ru

<sup>3</sup>Гусейнов Роман Гасымович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер отдела энергетики и минеральных ресурсов, e-mail: grg@ierp.ru  
Roman G. Guseinov, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Leading Engineer of the Department of Power Engineering and Mineral Resources, e-mail: grg@ierp.ru

<sup>4</sup>Буддо Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель главного геофизика, e-mail: biv@ierp.ru  
Igor V. Buddo, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Deputy Chief Geophysicist, e-mail: biv@ierp.ru

<sup>5</sup>Макаров Антон Анатольевич, геофизик, e-mail: maa@ierp.ru  
Anton A. Makarov, Geophysicist, e-mail: maa@ierp.ru

<sup>6</sup>Агафонов Юрий Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: aua@ierp.ru  
Yury A. Agafonov, Candidate of technical sciences, CEO, e-mail: aua@ierp.ru

Непско-Ботубинской антеклизы, был выбран ввиду его высокой изученности съемкой ЗСБ. Также в рамках Непского свода имеется большой фонд пробуренных скважин. Задачей, на решение которой были направлены трехмерные расчеты, являлась оценка чувствительности сигналов от источников с разной длиной стороны к верхней и нижней частям геологического разреза. **Выводы.** На основе численной оценки аномалий от рассматриваемых объектов произведен выбор длины стороны источника электромагнитного поля. Установлено, что источник с длиной стороны 500 м наилучшим образом подходит для изучения верхней части геологического разреза, однако ввиду небольшого отношения сигнал/помеха не информативен для изучения нижней части разреза. Сигналы, сгенерированные от источника с длиной стороны 1000 м, напротив, имеют достаточное отношение сигнал/помеха, что позволяет на заданном уровне помех изучать нижнюю часть разреза. Тем не менее ввиду инерционности большой установки изучать верхнюю часть разреза затруднительно. Между аномалиями по сигналам от источников со сторонами 600 и 800 м принципиальной разницы не выявлено, но известно, что с производственной точки зрения источник с длиной стороны 600 м удобнее, следовательно, источник электромагнитного поля с длиной стороны 600 м можно считать оптимальным. Результаты данного исследования могут быть применены при планировании методики работ ЗСБ в Восточной Сибири.

*Ключевые слова:* зондирования становлением поля в ближней зоне, 3D-моделирование, зашумление, сигнал/шум, Непский свод, 3D-неоднородность.

**Формат цитирования:** Семинский И.К., Емельянов В.С., Гуссейнов Р.Г., Будо И.В., Макаров А.А., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального размера источника электромагнитного поля в методе зондирования становлением поля в ближней зоне для геологических условий Непского свода Иркутской области // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 75–87.

## SELECTING OPTIMAL SIZE OF EM FIELD SOURCE IN NEAR FIELD SOUNDING METHOD FOR GEOLOGICAL CONDITIONS OF NEPA ARCH IN IRKUTSK REGION

**I.K. Seminskiy, V.S. Yemelianov, R.G. Guseinov, I.V. Buddo, A.A. Makarov, Yu.A. Agafonov**

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.  
Irkutsk Electroprospecting Company JSC,  
2a, Rabochaya St., Irkutsk, 664011, Russian Federation.  
Irkutsk Scientific Center SB RAS,  
128, Lermontov St., Irkutsk, 664054, Russian Federation.

**ABSTRACT. Purpose.** Complication of tasks that modern electrical exploration and, in particular, the method of near field transient EM sounding (NTES) are facing today requires the optimization of sounding methods. The purpose of this study is to optimize NTES methods at the pre-survey stage by choosing an optimum size of the electromagnetic field source. **Method.** One of the most common methods of inductive electrical prospecting when studying the sedimentary cover of the south of the Siberian platform is the NTES method. The article considers a new methodology for choosing the optimal size of the EM source based on three-dimensional modeling and signal noise as applied to specific geological conditions. It is known that the size of the EM field source of the NTES installation directly affects the horizontal resolving power of the method, namely, the signal-to-noise ratio. However, the work with large EM field sources that provide a high signal-to-noise ratio is not always profitable from the production point of view since the preparation for the in-site operation of the installation with a bigger side length of the source requires more production resources including time, quantity of equipment and personnel. There are selection standards for the geometric parameters of the installation, but they are outdated (they were written more than thirty years ago). Modern methods based on numerical criteria are needed. Application of the proposed methods allows to solve the geological problem (of mapping anomaly from the object of research at a given level of interference) under optimal production and financial costs. **Results.** An optimal size of the EM field source was chosen as an example for the geological conditions of the Nepa arch. The Nepa arch located in the central part of the Nepa-Botuoba anticline was chosen because of its high exploration degree by NTES. Also, within the Nepa Arch, there are a lot of drilled wells. The problem three-dimensional calculations were aimed at was to estimate the sensitivity of signals from sources with different side lengths to the upper and lower parts of the geological section. **Conclusions.** Based on the numerical evaluation of anomalies from the objects under consideration the length of the source side of the

EM field has been selected. It is determined that a source with a side length of 500 m is most suitable for studying the upper part of the geological section, but it is not informative for studying the lower part of the section due to a small signal-to-noise ratio. On the other side, the signals generated from the source with a side length of 1000 m have a sufficient signal-to-noise ratio which allows to study the lower part of the section at a given level of interference. However, it is difficult to study the upper part of the section due to the response delay of a large installation. There is no fundamental difference between the anomalies by the signals from sources with the sides of 600 and 800 m but the source with a side length of 600 m is more convenient from a production point of view. Therefore, the EM field source with a side length of 600 m can be considered optimal. The results of the study will find application in planning the methodology of NTES in Eastern Siberia.

*Keywords: near field transient EM sounding (NTES), 3D-modeling, noise, signal/noise, the Nepa Arch, 3D-non-uniformity*

**For citation:** Seminskiy I.K., Yemelianov V.S., Guseinov R.G., Buddo I.V., Makarov A.A., Agafonov Yu.A. Selecting optimal size of EM field source in near field sounding method for geological conditions of Nepa arch in Irkutsk region. Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017, vol. 40, no. 2, pp. 75–87. (In Russian).

### Введение

Одним из наиболее распространенных методов электроразведки при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Основой метода ЗСБ является изучение характера установления электромагнитного поля в земле при резком изменении тока в источнике. Резкое выключение тока в генераторной петле вызывает появление индукционных токов, которые с уменьшением плотности токовых линий распространяются от дневной поверхности на глубину.

Одним из важных методических аспектов при планировании работ методом ЗСБ является правильный выбор площади источника электромагнитного поля, а точнее, длины стороны генераторной петли (ГП). Площадь ГП влияет на мощность сигнала, качество данных и, соответственно, на глубину зондирования [1].

Задачей данного исследования является выбор длины стороны источника электромагнитного поля, сигналы от которого будут обладать достаточной чувствительностью как к верхней, так и к нижней частям геологического разреза.

Критерием оптимальности выбора источника электромагнитного поля в данном случае является точность картирования всего осадочного чехла исследуемой территории.

В рамках решения поставленной задачи предлагается:

- произвести трехмерное моделирование сигналов ЗСБ с учетом влияния трехмерной неоднородности, которую необходимо оконтурить;
- зашумление (и инверсия) полученных кривых;
- анализ результатов.

### Методика моделирования сигналов ЗСБ

Наиболее распространенный подход к интерпретации кривых электромагнитных зондирований – одномерная (1D) инверсия. В большинстве случаев она позволяет с достаточной точностью определить геоэлектрические параметры среды, однако в некоторых случаях изучаемую среду невозможно аппроксимировать горизонтально-слоистой моделью в силу влияния различных неоднородностей геологического происхождения: разломные зоны, трапповые интрузии, дайки и т.д. Оценить это влияние позволяет трехмерное (3D) математическое моделирование сигналов ЗСБ. Моделирование электромагнитных полей от 3D-геоэлектрических моделей позволяет получить синтетические данные, на основе которых строятся геоэлектрические разрезы и графики. В ходе сопоставления и анализа полученных результатов можно определить оптимальный размер источника электромагнитного поля, позволяю-

щего получить сигналы достаточной мощности для уверенного картирования геологической среды.

Для моделирования электромагнитных откликов от заданных моделей использовался программный комплекс GeoEM, основанный на алгоритме конечных элементов [2]. Данный комплекс позволяет получить теоретические сигналы от заданной среды, сопротивление и мощность слоев которой известны. Программирование и визуализация результатов производились в программе Model3 – части комплекса программ SGS-TEM [3].

В результате моделирования получены синтетические сигналы ЗСБ и проведен анализ чувствительности сигналов к влиянию геологических объектов, залегающих на глубинах 450 и 1700 м. Расчеты производились для двух вариантов моделей, чтобы оценить чувствительность сигналов, зарегистрированных от источников с разной длиной стороны ГП (500, 600, 800 и 1000 м), к верхней и нижней частям разреза.

Трехмерное моделирование сигналов ЗСБ начинается с формирования стартовой (фоновой) геолого-геоэлектрической модели, которая составляется на

основе априорной информации о строении осадочного чехла исследуемой территории, приблизительной глубине залегания объекта исследования и фундамента.

Стартовая геоэлектрическая модель, составленная на основе типичных геологических условий для Непского свода (юг Сибирской платформы), состоит из 10 слоев со средним удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от 20 до 2000 Ом·м. В фоновую модель помещен трехмерный объект (для расчета № 1 – на глубине 450 м, для расчета № 2 – на глубине 1700 м), эквивалентный тонкому водонасыщенному пласту-коллектору с сопротивлением 6 Ом·м. Математическое моделирование проводилось для профильной системы наблюдений ЗСБ. Профиль наблюдений проходит через центр объекта, шаг между приемниками ЗСБ составляет 200 м, всего – 28 приемников электромагнитного поля (рис. 1).

Необходимо учесть, что расчетные 3D-сигналы полностью лишены влияния электромагнитных помех, поэтому выбирать оптимальный размер источника электромагнитного поля на основе «чистых» модельных данных некорректно.

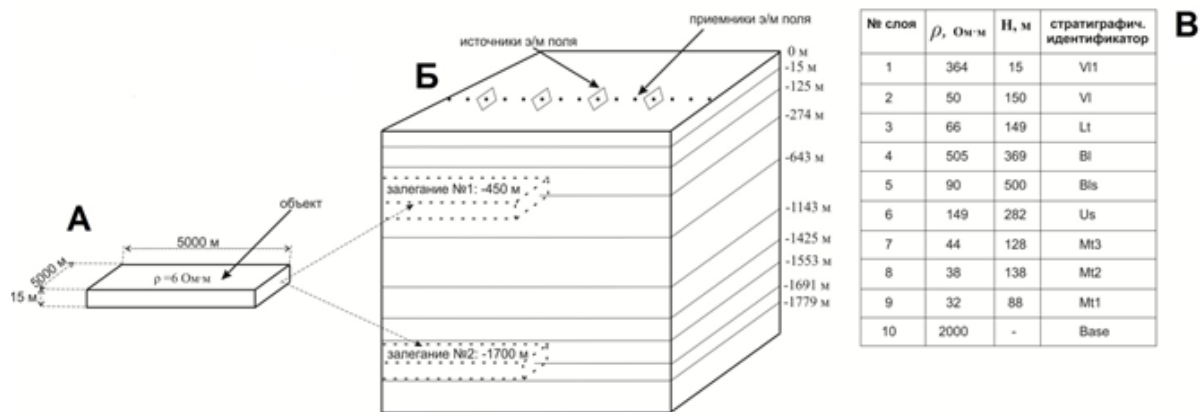


Рис. 1. Варианты расположения объекта исследования (А) во вмещающей среде относительно сети наблюдения (Б), а также сводная геоэлектрическая модель для Непского свода (В)  
Fig. 1. Location variants of the research object (A) in host environment relative to the observation network (B) and the composite geoelectric model for the Nepa arch (B)

### Зашумление синтетических сигналов ЗСБ

Сигналы становления, как правило, осложнены помехами различного происхождения (геологическими, природными негеологическими, техногенными, инструментальными). На рассчитанные сигналы ЗСБ была наложена электромагнитная помеха. Выбор уровня помехи при проведении математического моделирования выполнен на основе анализа практических данных. Амплитуда шума может быть оценена по стандартному отклонению электродвижущей силы (ЭДС) помехи на основе анализа полевых записей, зарегистрированных при выключенном источнике электромагнитного поля. Объем данных для территории Иркутской области составил более 54000 серий измерений (использованы материалы хранилища данных АО «Иркутское электро-разведочное предприятие») [4]. Значение стандартного отклонения ЭДС нормировано на площадь приемного контура и усиление канала. Амплитуда шума и, соответственно, величина стандартного отклонения помехи, определенного в рамках данного исследования, больше либо равна соответствующему значению для 80% наблюдений электромагнитных помех.

Одной из особенностей современных телеметрических систем наблюдений [5] является регистрация сигналов становления с арифметическим шагом дискретизации по времени. Инверсия, как правило, выполняется на основе кривых с геометрическим шагом. Таким образом, на этапе первичной обработки производится интерполяция данных. Следствием этого является зависимость среднеквадратического отклонения ЭДС на каждом отсчете итоговой кривой от времени становления. Для получения синтетических кривых величина дисперсии  $\sigma_0^2$  изменялась пропорционально силе тока в источнике, эффективной площади генераторной петли, объему накоплений. Для

моделирования сигналов, близких к практическим, с учетом влияния процедуры интерполяции применялась следующая функция [6]:

$$f_{\sigma}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \approx \frac{1.027}{\sqrt{t}},$$

где  $t$  – время становления в мс,  $\sigma(t)$  – стандартное отклонение ЭДС на временном отсчете  $t$  кривой ЗСБ.

Таким образом, зашумление сигналов выполняется путем добавления случайных чисел с нормальным распределением ( $\mu = 0$ ;  $\sigma = f_{\sigma}(t)$ ) на каждом отсчете итоговой кривой ЗСБ.

### Инверсия синтетических сигналов ЗСБ

Следующим этапом в выборе длины стороны ГП после зашумления синтетических сигналов ЗСБ является их интерпретация и визуализация результата. Процесс определения геометрических и физических параметров объектов по наблюдаемым аномалиям от этих объектов носит название обратной задачи (инверсии данных).

Алгоритмы, направленные на поиск истинных значений сопротивлений (мощностей или параметров поляризации) модели, называются методами минимизации целевой функции.

Для реализации инверсии использовалась одномерная прямая задача ЗСБ и простой функционал минимизации – невязка практической и теоретической кривых. Невязка рассчитывалась для времен от 10 до 200 мс, так как отклик кривой на изменение значений сопротивления слоев находится в этом диапазоне. В качестве практической кривой для каждого пикета применялся набор предварительно зашумленных синтетических кривых.

Вне зависимости от размера генераторной петли стартовая модель для всех пикетов была единой. При автоматической инверсии использовались типичные настройки расчета, направленные на восстановление значений УЭС

нижней части разреза (НЧР) – детальный расчет обратной задачи был направлен на восстановление значений УЭС именно этого интервала глубин. Диапазон поиска значений УЭС выбран соответствующим для данных геофизических условий.

### Результаты

Мерой оценки чувствительности сигналов ЗСБ к 3D-объекту принимается амплитуда аномалии (поле, созданное трехмерным объектом, пересчитанное в процентном отношении относительно фоновой модели). Для неоднородности, залегающей в верхней части разреза (ВЧР) ( $H = 450$  м), были получены значения амплитуды аномалии, выявленной по данным от источников с различной длиной стороны ГП (табл. 1). Геоэлектрический разрез, построенный по результатам инверсии кривых, искаженных влиянием неоднородности в ВЧР, не позволяет корректно оценить ошибку инверсии данных в силу недипольности установок с большей длиной стороны ГП.

На графиках аномального поля (расхождения ЭДС<sub>1D</sub> и ЭДС<sub>3D-шум</sub> кривых) для всех ГП прослеживается четкая аномалия, уменьшающаяся с увеличением

стороны ГП (рис. 2, А). Данный факт обусловлен меньшей чувствительностью сигналов от источников с большей стороной ГП к неоднородностям в ВЧР.

Для расчетов с объектом, залегающим на глубине 1700 м, увеличение амплитуды аномалии (табл. 2) с уменьшением стороны ГП обусловлено меньшей мощностью сигнала для ГП с меньшей длиной стороны, следовательно, худшим отношением сигнал/шум (см. рис. 2, Б). На графиках видно, что наибольшее отличие от аномалии, зафиксированной по незашумленным сигналам (красный пунктир), имеют аномалии, построенные по сигналам от источников электромагнитного поля с меньшей стороной ГП. Шум на поздних временах маскирует аномальное влияние объекта исследования, что делает невозможным его выделение и оконтуривание. При увеличении стороны ГП отношение сигнал/шум увеличивается и графики аномального поля имеют наибольшую корреляцию с графиками, построенными по незашумленным данным, что говорит о большей информативности сигналов ГП 800 и ГП 1000.

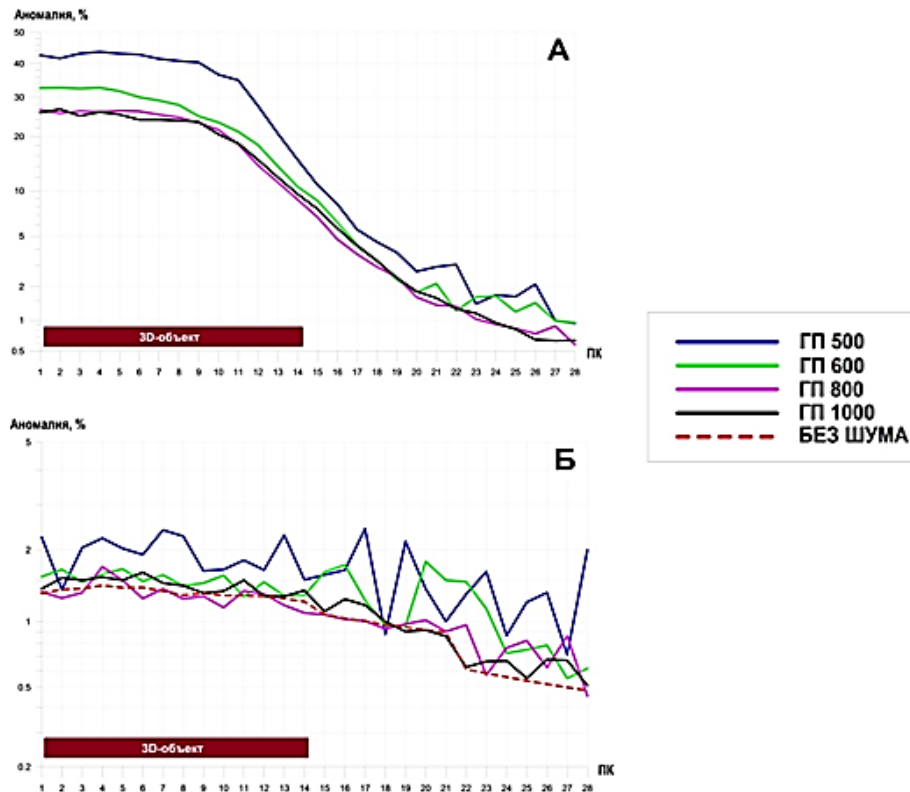
**Таблица 1**

**Амплитуды аномалий, создаваемых объектом на глубине 450 м, от источников с разной стороной ГП**

**Table 1**

**Anomaly amplitudes created by the object at a depth of 450 m from the sources with a different side of the transmitter loop (TL)**

Размер стороны ГП, м / TL side dimension, m	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии, % / (ЭДС <sub>3D-шум</sub> - ЭДС <sub>1D</sub> ) Anomaly amplitude, % / (EMF <sub>3D-noise</sub> - EMF <sub>1D</sub> )	20,2	13,2	12	11,9
Истинная амплитуда аномалии, % / (ЭДС <sub>3D</sub> - ЭДС <sub>1D</sub> ) True anomaly amplitude, % / (EMF <sub>3D</sub> - EMF <sub>1D</sub> )	19,6	13	11,8	11,8



**Рис. 2. Графики аномального поля, построенные по сигналам ЗСБ источников со стороны ГП 500, 600, 800, 1000 м для объекта (над разрезами показана проекция 3D-объекта) с залеганием: А – 450 м; Б – 1700 м**

**Fig. 2. Graphs of the anomalous field built on the basis of signals from NTES sources with the TL side of 500, 600, 800, 1000 m for the object (the projection of the 3D object is shown above the sections) with the occurrence at: А – 450 m; Б – 1700 m**

**Таблица 2**

**Амплитуды аномалий, создаваемых объектом на глубине 1700 м, от источников с разной стороной ГП**

**Table 2**

**Anomaly amplitudes created by the object at a depth of 1700 m from the sources with a different TL side**

Размер стороны ГП, м / TL side dimension, m	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии, % ( $ЭДС_{3D-шум} - ЭДС_{1D}$ ) / Anomaly amplitude, % ( $EMF_{3D-noise} - EMF_{1D}$ )	2,5	2,1	1,8	1,6
Истинная амплитуда аномалии, % ( $ЭДС_{3D} - ЭДС_{1D}$ ) / True anomaly amplitude, % ( $EMF_{3D} - EMF_{1D}$ )	1,4	1,4	1,4	1,4



Наименьшая амплитуда аномалии прослеживается для ГП 1000 – данный факт обусловлен меньшей подверженностью паразитическому влиянию электромагнитных помех, чем сигналов от ГП с меньшей стороны. Известно, что истинная амплитуда аномалии составляет 1,1 % ( $\text{ЭДС}_{3D} - \text{ЭДС}_{1D}$ ), поэтому большее приближение зарегистрированной аномалии к этому значению говорит о большей точности оконтуривания исследуемой аномалии.

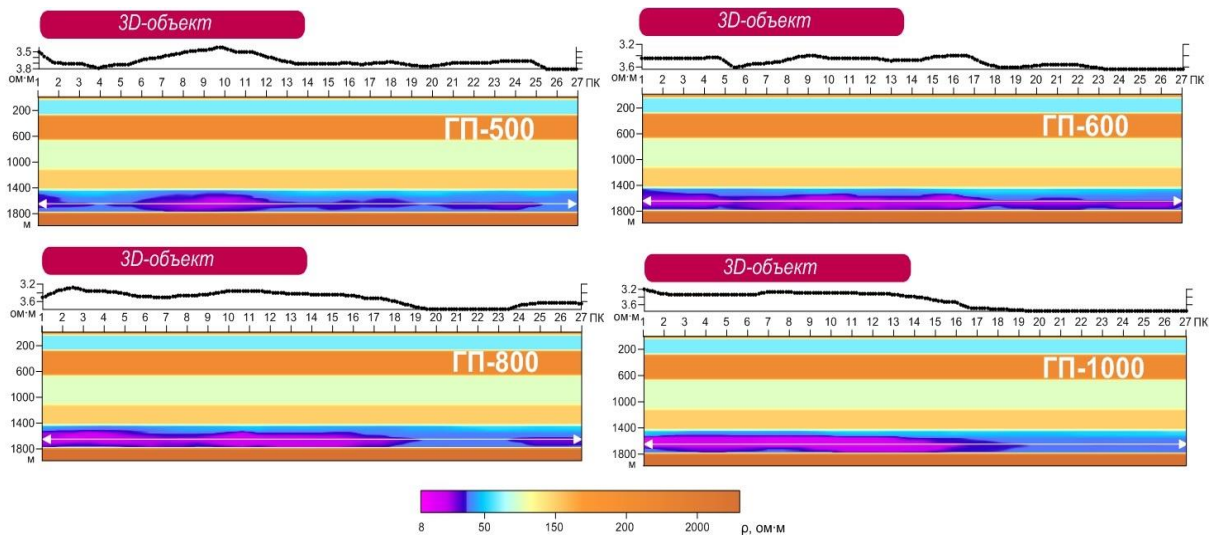
По синтетическим 3D-сигналам для расчетов с залеганием объекта 1700 м была произведена автоинверсия, на основе результатов которой были построены геоэлектрические разрезы (рис. 3).

Безусловно, производить одномерную инверсию 3D-данных некорректно, однако выявить аномалию и проследить ее амплитуду вполне реально. На основе результатов ошибки подбора модели и самих геоэлектрических разрезов видно, что наименьшей амплитудой обладает аномалия ГП 500 (аномальные значения

теряются на фоне заданного шума), следовательно, наибольшей – ГП 1000. По сигналам ГП 1000 аномалия четко прослеживается на разрезе, что теоретически соответствует истинному положению объекта.

Для неоднородности, залегающей в НЧР ( $H = 1700$  м), значения ошибки восстановления модели, выявленной по данным от источников с различной длиной стороны ГП, представлены в табл. 3.

На территории Восточной Сибири распространены трехмерные неоднородности, залегающие в ВЧР, которые вносят искажающее влияние в сигнал. На фоне этого влияния задача выявления пласта-коллектора нефтегазоносных площадей в подсолевом комплексе усложняется. Рассмотрим степень искажения амплитуды аномалии (создаваемой пластом-коллектором) влиянием перекрывающих локальных неоднородностей для сигналов ГП 500, ГП 600, ГП 800 и ГП 1000 (рис. 4).



**Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, построенные в результате автоинверсии сигналов с учетом влияния объекта на глубине 1700 м, зарегистрированных от источников со стороны ГП 500, 600, 800, 1000 м**  
Над разрезами представлен график УЭС для среза глубины 1700 м, прямоугольником обозначена проекция 3D-объекта

**Fig. 3. Geo-electric sections built as a result of auto-inversion of signals taking into account the object influence at the depth of 1700 m registered from the sources with the TL side of 500, 600, 800, 1000 m**  
The graph of specific electrical resistance for the cutting depth of 1700 m is shown above the sections, a rectangular stands for the projection of the 3D object



Таблица 3

Погрешность инверсии для объекта с залеганием 1700 м  
для кривых от источников с разной длиной стороны

Table 3

Inversion error for the object at a depth of 1700 m  
for the curves from the sources with different side lengths

Размер стороны ГП, м / TL side dimension (TL), m	500	600	800	1000
Ошибка восстановления модели, % / Model recovery error, %	11,2	9,1	7,7	6,9

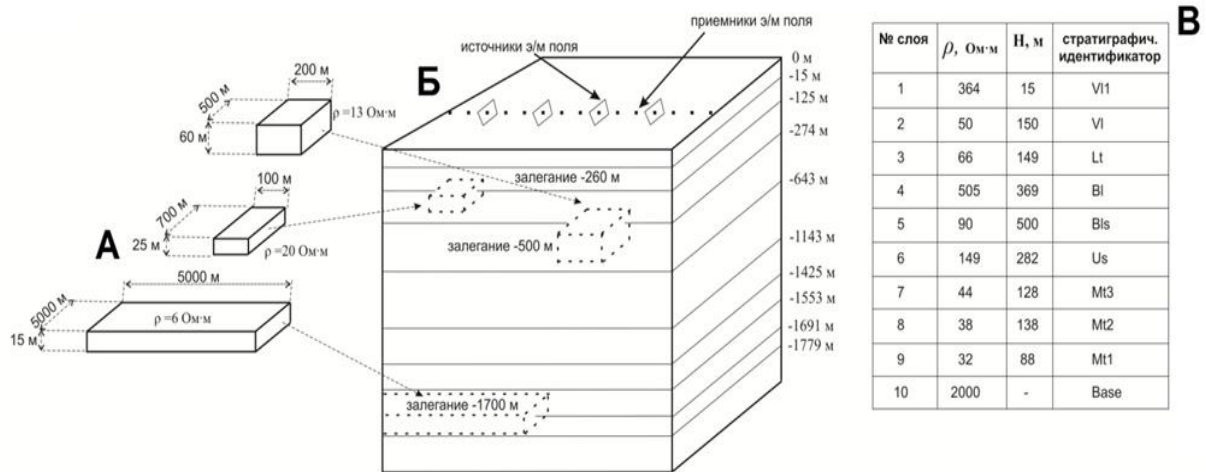


Рис. 4. Расположение 3D-объектов (А) во вмещающей среде относительно сети наблюдения (Б), а также сводная геоэлектрическая модель для Непского свода (В)

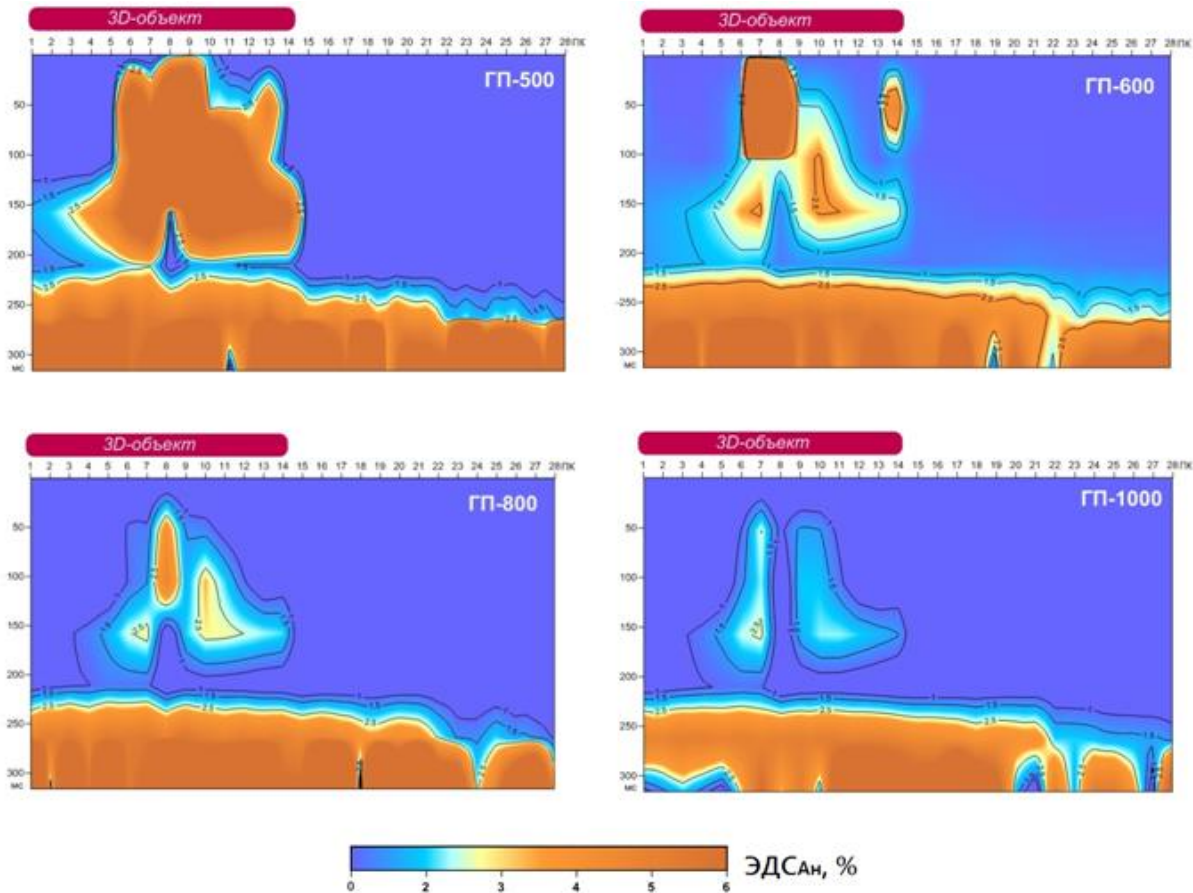
Fig. 4. Location of 3D objects (A) in the host environment relative to the observation network (B) and a composite geoelectric model for the Nepa arch (B)

На рис. 5 представлены разрезы аномального поля, создаваемого пластом-коллектором и перекрывающимися его неоднородностями.

Анализ результатов позволяет сделать вывод (см. рис. 5), что сигналы ГП 500 наиболее подвержены влиянию неоднородностей в ВЧР, что подтверждают результаты расчетов для неоднородности с залеганием 450 м. Четко прослеживается маскирующий эффект от перекрывающих неоднородностей, и на фоне шума аномалию от объекта исследования выделить проблематично. С увеличением стороны ГП паразитическое влияние в случае оконтуривания нижележащего объекта приповерхностных неоднородностей нивелируется, отношение сиг-

нал/шум растет, вследствие чего аномалия от исследуемого объекта проявляется на разрезе. Данный факт подтверждают графики аномального поля – аномалия, зафиксированная по сигналам ГП 1000, повторяет аномалию от исследуемого объекта (без влияния неоднородностей в ВЧР и шума) (рис. 6).

Источник со стороной 1000 м сглаживает влияние неоднородностей в ВЧР, и сигналы, полученные от него, наиболее восприимчивы к неоднородностям в НЧР в силу большего отношения сигнал/шум. Сигналы ГП 600 и ГП 800 для данного расчета не обладают большим отличием друг от друга в плане чувствительности как к верхней, так и к нижней частям разреза.



**Рис. 5.** Разрезы аномального поля объекта на глубине 1700 м (над разрезами показана проекция 3D-объекта), перекрытого проводящими неоднородностями, построенные по сигналам от источников ГП-500, ГП-600, ГП-800 и ГП-1000  
**Fig. 5.** Sections of the anomalous field of the object at the depth of 1700 m (the projection of the 3D object is shown above the sections) overlapped by the conductive inhomogeneities constructed on the basis of signals from the sources TL-500, TL -600, TL -800 and TL-1000

Меньшую чувствительность сигналов от источников с меньшей стороной ГП подтверждает таблица статистических характеристик аномалии (табл. 4), из которой следует, что наибольшее сходство с истинной амплитудой аномалии (1,1%) имеют сигналы с большей стороной ГП.

### Выводы

1. В ходе анализа полученных в результате 3D-моделирования геоэлектрических разрезов можно сделать вывод, что выбирать оптимальный размер источника электромагнитного поля необходимо исходя из характера решаемых геологических задач, поскольку проявление

аномалии напрямую зависит от размера источника электромагнитного поля.

2. Наиболее восприимчивы к неоднородности в НЧР сигналы, полученные с использованием источника электромагнитного поля со стороной 1000 м. Это объясняется тем, что сигнал от такого источника наиболее мощный и отношение сигнал/шум больше, что подтверждает низкий уровень дисперсии ЭДС. Однако сигналы от источника со стороной 1000 м имеют наихудшие показатели при картировании ВЧР. Влияние приповерхностных неоднородностей сглаживается вследствие большого магнитного момента источника. На ранних временах

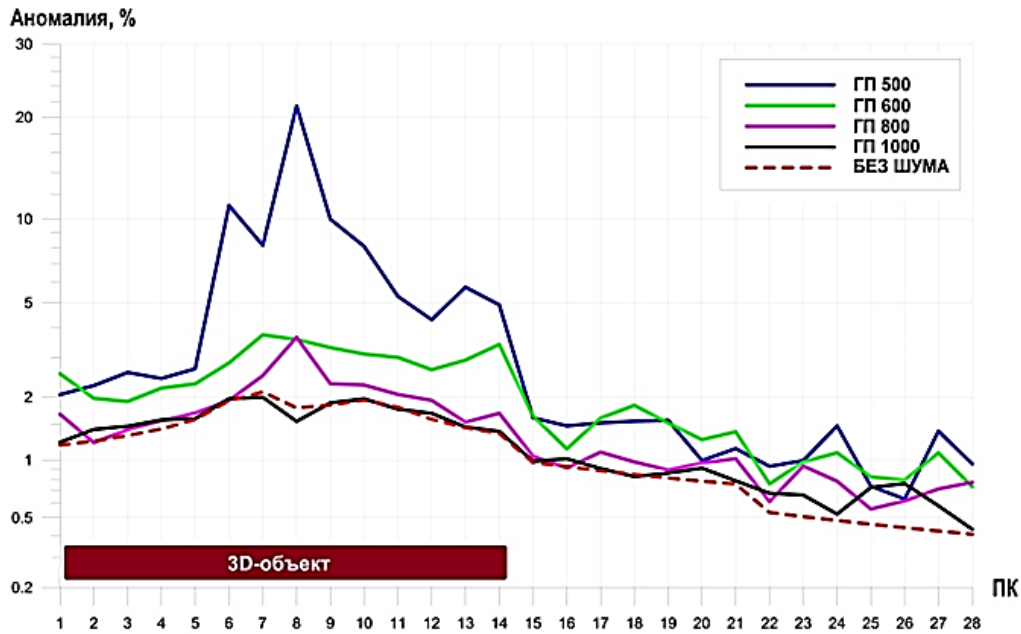


Рис. 6. Графики аномального поля, построенные по сигналам источников со стороны ГП 500, 600, 800, 1000 м для объекта с залеганием 1700 м (прямоугольником обозначена проекция 3D-объекта), перекрытого трехмерными неоднородностями  
Fig. 6. Graphs of the anomalous field constructed on the basis of signals from the sources with the TL side of 500, 600, 800, 1000 m for the object with the depth of 1700 m (the rectangle stands for the projection of the 3D object) overlapped by three-dimensional inhomogeneities

Таблица 4

Амплитуды аномалий, создаваемых объектом на глубине 1700 м, с учетом влияния перекрывающих неоднородностей, от источников с разной стороной ГП.

Table 4

Anomaly amplitudes created by the object at a depth of 1700 m taking into account the effect of overlapping inhomogeneities from the sources with different TL sides

Размер стороны ГП, м / TL side dimension, m	500	600	800	1000
Амплитуда аномалии (коллектор + перекрывающие объекты), % ( $ЭДС_{3D-шум} - ЭДС_{1D}$ ) / Anomaly amplitude (collector + overlapping objects), % ( $EMF_{3D-noise} - EMF_{1D}$ )	3,2	2,4	2,1	1,9
Истинная амплитуда аномалии (без перекрывающих объектов), % ( $ЭДС_{3D} - ЭДС_{1D}$ ) / True anomaly amplitude (without overlapping objects), % ( $EMF_{3D} - EMF_{1D}$ )	1,4	1,4	1,4	1,4

сигнал неинформативен в силу недипольности. Причем, чем источник больше, тем недипольность значительнее, следовательно, с большей глубины начинается полезный сигнал и, соответственно, ниже точность восстановления параметров ВЧР.

3. В плане большей чувствительности к неоднородностям в ВЧР следует отметить источник электромагнитного поля со стороной 500 м. Данный факт объясняется опять же недипольностью (у источников с большей стороной ГП картирование разреза начинается на десятки метров ниже). Тем не менее на поздних временах сигналы от источника с длиной стороны 500 м подвержены сильной дисперсии в силу меньшей мощности сигнала, что значительно снижает информативность кривых ЗСБ.

4. При сравнении значений аномалий, выявленных по сигналам от источников с длиной стороны 600 и 800 м, можно

сделать вывод, что аномалии, выделяемые с использованием упомянутых источников, схожи и отличие незначительно.

5. Можно сделать вывод, что источник со стороной 600 м является наиболее подходящим для картирования осадочного чехла Непского свода в силу высокой детальности и чувствительности к ВЧР и НЧР и высокой устойчивости к воздействию электромагнитных помех. Также немаловажно отметить тот факт, что использование источника с длиной стороны 600 м с производственной точки зрения наиболее удобно и менее трудозатратно, чем использование источника с большей длиной стороны. Однако при работах, направленных на картирование или оконтуривание конкретных глубин и горизонтов, необходимо выбирать источник, сигналы от которого наиболее чувствительны к данной части разреза.

#### Библиографический список

1. А.А. Кауфман. Введение в теорию геофизических методов. М.: Недра, 2000. Ч. 1. 520 с. Ч. 2. 483 с.

2. 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.

3. Агафонов Ю.А., Суров Л.В., Шарлов М.В. Принцип работы и основные компоненты аппаратно-программного комплекса цифровой телеметрической электроразведочной станции «Пикет» // Российский геофизический журнал. 2006. № 43. С. 98–102.

#### References

1. Kaufman A.A. *Vvedenie v teoriyu geofizicheskikh metodov* [Introduction to the theory of geophysical methods]. Moscow, Nedra Publ., 2000. Part. 1, 520 p. Part. 2, 483 p.

2. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Trigubovich G.M. *Komp'yuternoe modelirovanie geoelektromagnitnykh polei v trekhmernykh sredakh metodom konechnykh elementov* [Computer simulation of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method]. *Fizika zemli* [Earth physics], 2011, no. 2, pp. 3–14. (In Russian).

3. Agafonov Yu.A., Surov L.V., Sharlov M.V. *Printsip raboty i osnovnye komponenty apparaturno-programmnogo kompleksa tsifrovoi telemektricheskoi elektrorazvedochnoi stantsii «Piket»* [Operation principle and main components of the hardware and software complex of digital telemetric electroprospecting station

4. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Шарлов М.В. Интеграция оперативной системы обработки и хранилища данных электромагнитных зондирований // Вестник ИрГТУ. 2014. № 4 (87). С. 18–23.

5. М.Ю. Секачев, Б.П. Балашов, Г.В. Саченко, О.П. Вечкапов, А.К. Захаркин, Н.Н. Тарло, В.С. Могилатов, А.В. Злобинский Аппаратурный электроразведочный комплекс «Цикл-7» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 10. С. 44–46.

6. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник ИрГТУ. 2015. № 5 (100). С. 53–60.

"Piket"]. *Rossiiskii geofizicheskii zhurnal* [Russian geophysical journal], 2006, no. 43, pp. 98–102. (In Russian).

4. Guseinov R.G., Petrov A.V., Sharlov M.V. *Integratsiya operativnoi sistemy obrabotki i khranilishcha dannykh elektromagnitnykh zondirovaniy* [Integration of operational system of EM sounding data processing and warehousing]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 4 (87), pp. 18–23. (In Russian).

5. Sekachev M.Yu., Balashov B.P., Sachenko G.V., Vechkapov O.P., Zakharkin A.K., Tarlo N.N., Mogilatov V.S., Zlobinskii A.V. *Apparaturnyi elektrorazvedochnyi kompleks "Tsikl-7"* [Hardware electrical exploration complex "Cycle-7"]. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* [Instruments and systems of exploration geophysics], 2006, no. 7, pp. 44–46. (In Russian).

6. Guseinov R.G., Petrov A.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Buddo I.V., Gomul'skii V.V. *Sistema otsenki kachestva signalov nestatsionarnykh elektromagnitnykh zondirovaniy* [Quality control system for transient electromagnetic soundings]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5 (100), pp. 53–60. (In Russian).

Статья поступила 13.02.2017 г.  
The article was received 13.02.2017.