

Технология разведки и разработки полезных ископаемых

УДК 550.834(571.5)

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА МЕЖДУ ПРИЕМНИКАМИ ЗСБ ПОСРЕДСТВОМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

И.К. Семинский¹, А.И. Ильин², Р.Г. Гусейнов³, И.В. Буддо⁴, Ю.А. Агафонов⁵
ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие», 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а.

Метод ЗСБ широко применяется на всех стадиях геологоразведочных работ – от региональных до мониторинговых исследований. Осуществление этих работ в сложных геологических условиях (разломная и соляная тектоника, гетерогенный геологический разрез и пр.) требует оптимизации методики проведения и интерпретации ЗСБ для горизонтально-неоднородной среды. Одной из актуальных проблем является выбор оптимального расстояния между приемниками. Наиболее распространенный подход к интерпретации кривых – одномерная инверсия. Авторами применено трехмерное моделирование.

В мощных галогенно-карбонатных толщах присутствуют тонкие пласты трещиноватых пород, пласты-коллекторы, которые резко контрастируют с перекрывающими и подстилающими горизонтами, что требует выбора оптимального шага наблюдений. В основу расчетов положена геоэлектрическая модель Ковыктинского газоконденсатного месторождения (Восточная Сибирь), включающая десять слоев с сопротивлением от 20 до 2000 Ом·м. Для оценки разрешающей способности были построены разрезы с шагом между приемниками 200, 400, 600 м.

Было установлено, что аномалии с амплитудой 2–3% вполне достаточно для обнаружения пласта-коллектора, а такие аномалии уверенно фиксируются при шаге 400 м.

Таким образом, в результате проведенного трехмерного моделирования выявляются аномалии электромагнитного поля, интенсивность которых напрямую зависит от шага наблюдений. На основе проведенного моделирования установлено, что предложенный способ выбора оптимального шага ЗСБ позволяет обосновать этот шаг для условий Сибирской платформы в 400–500 м.

Библиогр. 4 назв. Ил. 6.

Ключевые слова: электроразведка; ЗСБ; становление; трехмерное моделирование; 3D-неоднородность; шаг исследования.

SELECTING OPTIMAL PITCH BETWEEN TEM RECEIVERS THROUGH 3D-MODELING FOR GEOLOGICAL CONDITIONS OF EASTERN SIBERIA

I.K. Seminskiy, A.I. Ilyin, R.G. Guseinov, I.V. Buddo, Yu.A. Agafonov
“Irkutsk Electroprospecting Enterprise” CJSC, 2a Rabochaya St., Irkutsk, 664074, Russia.

¹Семинский Игорь Константинович, геофизик, аспирант ИрГТУ, тел.: 89500714269, e-mail: iks@ierp.ru

Seminskiy Igor, Geophysicist, ISTU Postgraduate, tel.: 89500714269, e-mail: iks@ierp.ru

²Ильин Антон Игоревич, геофизик 1 категории, аспирант ИрГТУ, тел.: 89149137373, e-mail: iai@ierp.ru

Ilyin Anton, 1 Category Geophysicist, ISTU Postgraduate, tel.: 89149137373, e-mail: iai@ierp.ru

³Гусейнов Роман Гасымович, геофизик 2 категории, аспирант ИрГТУ, тел.: 89246015874, e-mail: grg@ierp.ru

Guseinov Roman, 2 Category Geophysicist, ISTU Postgraduate, tel.: 89246015874, e-mail: grg@ierp.ru

⁴Буддо Игорь Владимирович, ведущий геофизик, кандидат геолого-минералогических наук, тел.: 89149291429, e-mail: biv@ierp.ru

Buddo Igor, Leading Geophysicist, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, tel.: 89149291429, e-mail: biv@ierp.ru

⁵Агафонов Юрий Александрович, генеральный директор ЗАО «ИЭРП», кандидат технических наук, тел.: 780183, e-mail: aqa@ierp.ru

Agafonov Yuri, CEO of IERP CJSC, Candidate of technical sciences, tel.: 780183, e-mail: aqa@ierp.ru

TEM method is widely used at all stages of exploration work – from regional to monitoring studies. Implementation of this works under complex geological conditions (fault and salt tectonics, heterogeneous geological cross-section and others) requires to optimize the procedure of TEM carrying out and interpretation for horizontally inhomogeneous medium. Selection of the optimal distance between the receivers is one of the relevant problems. The most common approach to curve interpretation is one-dimensional inversion. The authors have used three-dimensional modeling.

The presence of thin layers of fractured rock and reservoir beds contrasting sharply with the overlying and underlying horizons in thick halogenic carbonate strata requires to select an optimal pitch of observations. The calculations are based on the geoelectric model of the Kovykta gas condensate field (Eastern Siberia), which includes ten layers of resistance from 20 to 2000 ohm. To estimate the resolving power the cross-sections with the step between the receivers of 200m, 400m and 600m have been constructed.

It has been found that abnormalities of 2-3% amplitude are quite sufficient for reservoir detection. Such abnormalities are clearly detected at 400 m pitch.

The conducted three-dimensional modeling resulted in the detection of electromagnetic field abnormalities. Their intensity is in direct dependence on the observation pitch. Based on the performed modeling it has been determined that the proposed method of selecting TEM optimal pitch allows to justify the pitch of 400-500 m for the conditions of Siberian Platform.

4 sources. 6 figures.

Key words: *electroprospecting; TEM; formation; three-dimensional modeling; 3D-heterogeneity; exploration pitch.*

Введение. Одним из основных методов электроразведки при изучении объектов рудных и нерудных полезных ископаемых в осадочном чехле 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. Приемниками регистрируется сигнал становления электромагнитного поля (ЭДС), который в дальнейшем трансформируется в кривые кажущегося сопротивления и кажущейся проводимости.

Трансформанты используются при инверсии, результатом которой являются карты и разрезы сопротивления и проводимости горных пород.

Более двадцати лет метод ЗСБ активно применяется на всех стадиях геологоразведочных работ: от региональных исследований до мониторинговых наблюдений. Изучение неструктурных месторождений нефти и газа, работа в условиях развития соляной тектоники, валообразных структур и тектонических нарушений требует оптимизации методики исследований ЗСБ в условиях горизонтально-неоднородной среды.

Применение метода ЗСБ. В 70–90-е годы XX века в практике электроразведочных работ, как правило, применялись одноразносные установки ЗСБ, т.е. наблюдения от одного источника осуществлялись на одном приемнике. Приемник при этом практически всегда располагался в центре источника (рис. 1).

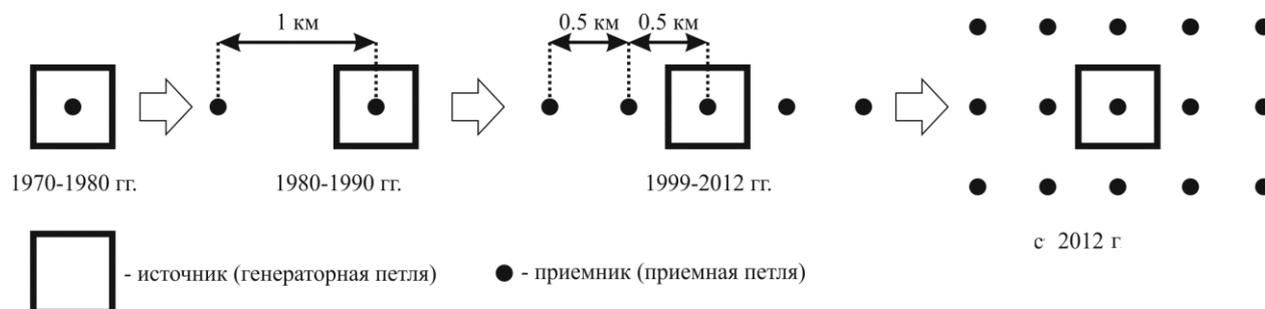


Рис. 1. Эволюция геометрии сети наблюдений ЗСБ с 1970 по 2012 г.

Регистрация сигналов становления поля на разнесенных приемниках, которые располагаются на удалении от центра источника, проводилась в весьма ограниченных объемах.

В 90-е годы XX века в связи с развитием технической базы и математического аппарата электроразведки, активным внедрением ЭВМ встала задача более эффективного использования многоразносных установок. В настоящий момент на один источник электромагнитного поля приходится от 3 до 20 и более приемников. Основными достоинствами работы с многоразносными установками является возможность учета эффектов частотной дисперсии электрического сопротивления и существенно возросшая производительность работ. Сегодня существуют различные типы сетей наблюдения, применяемые в методе ЗСБ: профильные и площадные (регулярные и нерегулярные). Плотность зондирований достигает 12–15 физических наблюдений на 1 м².

Одной из актуальных проблем при постановке работ ЗСБ является выбор оптимального расстояния между приемниками.

Единственно верного и оптимального шага между приемниками не существует, поскольку латеральная разрешающая способность метода, даже при едином шаге и параметрах регистрации полевых данных, напрямую зависит от конкретных геоэлектрических условий, которые могут значительно изменяться даже в пределах одной площади исследования.

Традиционно, при производстве профильных работ (2D) ЗСБ на территории Восточной Сибири и Якутии, шаг между приемниками составляет 500 м. Однако стоящие перед электроразведкой задачи требуют оптимизации методики наблюдений соответственно геологическому строению изучаемой территории. Поэтому актуальной проблемой является определение оптимального шага между приемниками ЗСБ при картировании горизонтов-коллекторов

осадочного чехла. Применение современных программных средств моделирования электромагнитных полей от 3D геоэлектрических моделей позволяет исследовать зависимость латеральной разрешающей способности электроразведочных исследований от расстояния между приемниками.

Методика выбора оптимального шага наблюдений в методе ЗСБ. Наиболее распространенный подход к интерпретации кривых электромагнитных зондирований (ЭМЗ) – одномерная (1D) инверсия [3]. В большинстве случаев она позволяет с достаточной точностью и надежностью определить геоэлектрические параметры среды. Однако зачастую изучаемую среду невозможно аппроксимировать горизонтально-слоистой в силу влияния неоднородностей геологического происхождения: разломные зоны, трапповые интрузии, дайки и т.д. Оценить это влияние позволяет трехмерное (3D) математическое моделирование сигналов становления электромагнитного поля [4]. Моделирование электромагнитных полей от 3D геоэлектрических моделей позволяет получить синтетические данные, на основе которых строятся геоэлектрические разрезы, сопоставление и анализ которых помогают определить оптимальный шаг между приемниками ЗСБ для уверенного картирования объекта исследований.

Для моделирования электромагнитных откликов от заданных эталонных моделей использовался программный комплекс «GeoEM», основанный на методе конечных элементов (МКЭ) [2].

Комплекс «GeoEM» позволяет получить синтетические электромагнитные отклики от заданной среды, сопротивление и мощность слоев которой известны. Необходимо понимать, что результаты трехмерного математического моделирования с использованием упрощенной геологической модели отличаются от реальной геологической ситуации. Основными факторами, влияющими на степень соответствия поле-

вых данных и результатов моделирования, являются:

- эквивалентность геоэлектрических моделей, связанная с погрешностями полевых наблюдений;
- погрешности, возникающие при обработке и интерпретации данных ЗСБ;
- невозможность точной аппроксимации реальной геоэлектрической структуры разреза простыми геометрическими фигурами.

Геоэлектрическая модель. Геологическое строение осадочного чехла юга Сибирской платформы имеет ряд значимых особенностей. В его строении принимают участие мощные толщи галогенно-карбонатных пород. В солевом комплексе присутствуют тонкие пласты трещиноватых известняков и доломитов. По результатам бурения поисково-разведочных скважин тонкие карбонатные пласты-коллекторы в галогенно-карбонатной толще практически всегда характеризуются аномальными значениями барических параметров, т.е. проявляются интенсивным поглощением либо аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД) и высокой минерализацией насыщающих их пластовых вод. В случае заполнения трещин пласта-коллектора минерализованным раствором его электрическое сопротивление существенно снижается, иногда на несколько порядков до единиц Ом·м [1]

относительно вмещающих пород. Таким образом, по электрическим свойствам горизонт-коллектор резко контрастирует с перекрывающими и подстилающими плотными карбонатными породами либо пластами солей. Мощность подобного пласта-коллектора составляет единицы или первые десятки метров, латеральные размеры составляют от сотен метров до нескольких километров. Поэтому выбор оптимального шага наблюдений в методе ЗСБ для уверенного выделения подобных объектов представляет собой весьма актуальную задачу.

В основу расчетов была положена усредненная геоэлектрическая модель, взятая с Ковыктинского газоконденсатного месторождения (КГКМ), являющегося одним из самых крупных и перспективных на юге Сибирской платформы. На КГКМ и прилегающих территориях более 15 лет проводятся исследования методом ЗСБ, имеется значительный фонд пробуренных скважин. КГКМ характеризуется типичными для юга Сибирской платформы геологическими условиями.

Геоэлектрическая модель, принятая фоновой для расчета, состоит из 10 слоев с сопротивлением от 20 до 2000 Ом·м (рис. 2 А). В модель помещен трехмерный объект (рис. 2 Б, рис. 3), эквивалентный тонкому водонасыщен-



Рис. 2. Параметры геоэлектрической модели: А – типичная геоэлектрическая модель для юга Сибирской платформы; Б – трехмерный объект

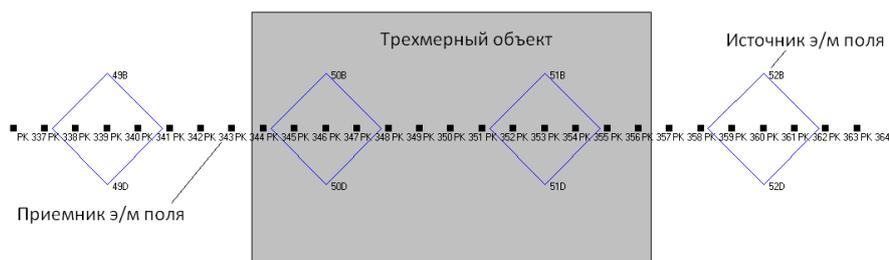


Рис. 3. Расположение трехмерного объекта относительно сети наблюдения 2D (вид сверху)

ному пласту-коллектору сопротивлением 6 Ом·м. Пласт-коллектор размещен на глубине 1100 м и стратиграфически приурочен к подсолевым отложениям мотской свиты.

Методика и результаты 3D моделирования. Математическое моделирование проводилось для профильной системы наблюдений с использованием многоразносных установок (рис. 3).

Профиль наблюдений проходит через центр объекта, шаг между приемниками составляет 200 м (всего 24 пикета).

По результатам расчетов были построены геоэлектрические разрезы процентного расхождения между 1D (сигналом от фоновой модели) и 3D (суммарным сигналом от фоновой модели и объектом), синтетическими сигналами (рис. 4), характеризующими аномальное поле ЭДС от искомого объекта.

Для оценки разрешающей способности, т.е. выбора оптимального шага наблюдений, при котором локальный проводящий объект уверенно выделяется по данным ЗСБ, были построены разрезы с различным шагом между приемниками:

- по каждому пикету (т.е. шаг между ПК – 200 м) (рис. 4 А);
- по каждому второму пикету (т.е. шаг между ПК – 400 м) (рис. 4 Б);
- по каждому третьему пикету (т.е. шаг между ПК – 600 м) (рис. 4 В).

На разрезе (рис. 4 А), построенном для наблюдений с шагом 200 м, аномальный эффект проявляется на приемниках, которые находятся на профиле за

пределами искомого объекта. Интенсивность аномального поля достигает 4% на всех приемниках, находящихся над объектом, и снижается до 3,5–3,8% на расстоянии до 600 м от краев объекта по профилю наблюдений. Латеральное аномальное влияние объекта распространяется в среднем на 3400 м, при этом непосредственно над объектом располагаются 11 приемников э/м поля.

На разрезе, построенном с шагом 400 м между ПК (рис. 4 Б), аномалия, созданная исследуемым объектом, прослеживается хуже, чем при исследованиях с шагом 200 м между ПК. Интенсивность аномального поля составляет 3,6–4% в пределах объекта, на приемниках, находящихся за пределами объекта, уровень аномалии значительно снижается – до значений 3–3,2%. Также латеральное влияние аномалии уменьшается до 2800 м, а над объектом располагается 6 приемников э/м поля.

При шаге между приемниками 600 м (рис. 4 В) объект мощностью 30 м и сопротивлением 6 Ом·м надежно выделить сложнее – зона его проявления на разрезах ЗСБ существенно сокращается. Интенсивность аномалии на приемниках над центром объекта также составляет 4%, однако к границам объекта снижается до 2,6–2,8%. Приемники, расположенные на профиле наблюдений за пределами объекта, в данном случае не испытывают влияния аномального поля. Латеральное распространение аномалии составляет около 2000 м, над объектом располагаются 4 приемника э/м поля.

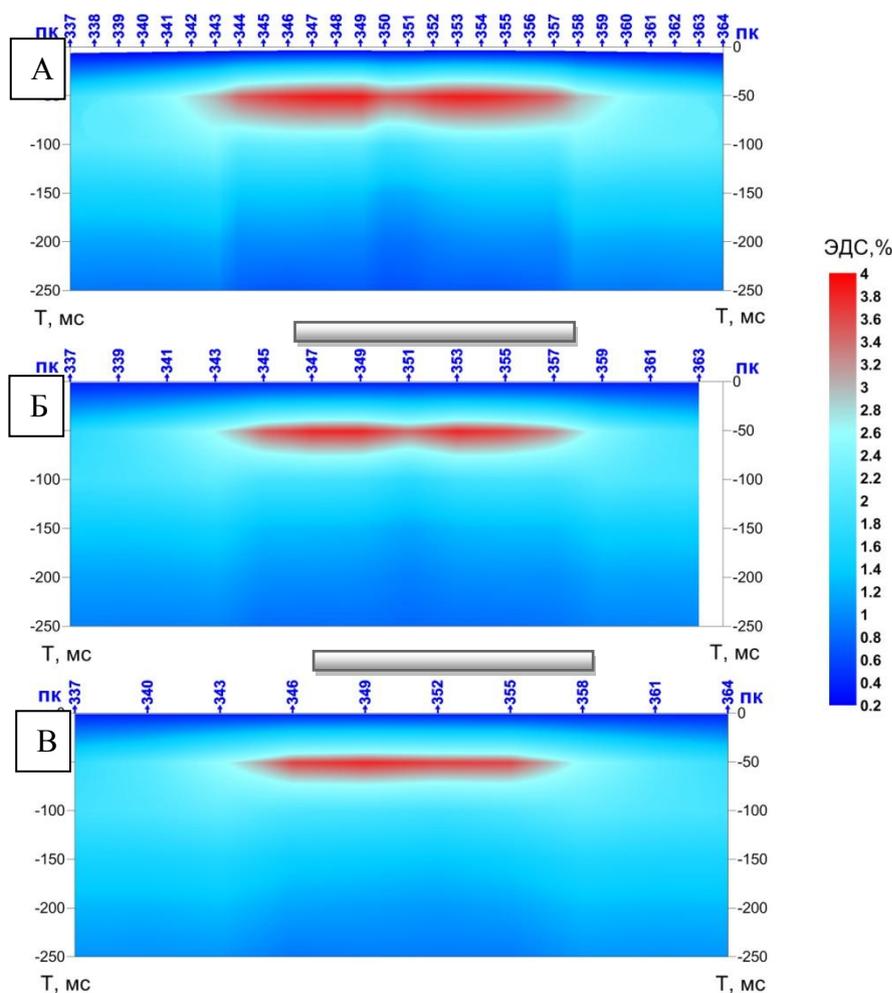


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы аномального поля ЭДС, вызванного исследуемым объектом (над разрезом): А – шаг между ПК 200 м; Б – шаг между ПК 400 м; В – шаг между ПК 600 м

На рис. 5 представлена гистограмма для сравнения амплитуд аномалий, выявленных с каждым шагом исследования. Из рисунка следует, что с шагом между ПК 200 м амплитуда аномалии составляет 4%, с шагом 400 м – 2,5%

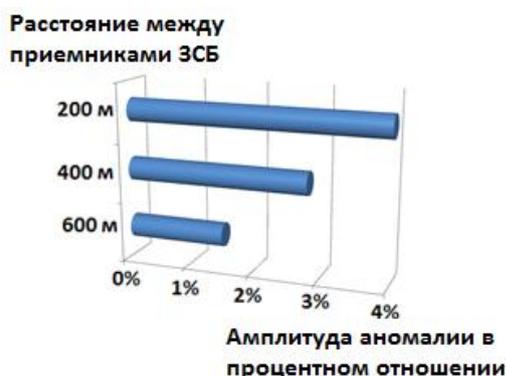


Рис. 5. Гистограмма амплитуды аномалии для каждого шага исследования в процентном отношении

и с шагом 600 м – 1,5%.

На диаграмме чувствительности (рис. 6) четко видно, что при шаге, равном 600 м, аномалия имеет наиболее узкий временной диапазон проявления, в два раза меньший, чем при шаге 400 м, и в три раза меньший, чем при шаге 200 м.

Необходимо отметить, что при любом шаге исследования (от 200 до 600 м) зона проявления объекта на разрезах ЗСБ характеризуется аномалией по ЭДС до 4%, что в принципе позволяет устойчиво выделять тонкий пласт-коллектор на фоне помех (как правило, не более 1%). При этом определить размеры объекта возможно только с максимально частым шагом измерений.

Следовательно, аномалии с амплитудой в 2–3% вполне достаточно для

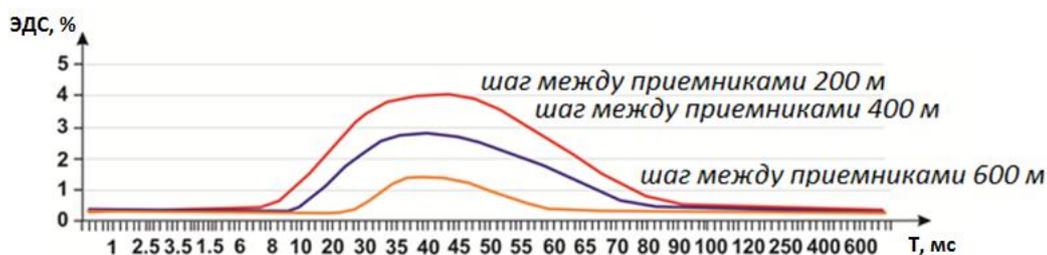


Рис. 6. Диаграмма чувствительности метода ЗСБ к проявлению пласта-коллектора в зависимости от шага исследования

выделения исследуемого объекта (на обычном уровне помех), а обнаружение такой аномалии позволяют проводить исследования с шагом 400 м. Также исследования с данным шагом в результате расчета выявили аномалию, имеющую латеральное распространение на 2800 м, чего вполне достаточно для уверенного выявления искажения одномерного разреза посредством интерпретации. Дальнейшее сгущение шага невыгодно и влечет временные и финансовые затраты.

Возможность выделения тонких горизонтов-коллекторов зависит от конкретных условий: проводимости перекрывающих отложений, контрастности электрических свойств проводника относительно вмещающих слоев, глубины его залегания, уровня э/м помех, т.е. шаг исследований необходимо подбирать индивидуально для каждого района работ.

Выводы. В результате проведенного трехмерного моделирования выявлена аномалия электромагнитного поля, интенсивность проявления которой напрямую зависит от шага исследований.

На основе предложенного способа выбора оптимального шага исследования ЗСБ применительно к геологическим условиям Восточной Сибири установлено, что шаг 400–500 м является

оптимальным для выделения в геологическом разрезе контрастных проводящих объектов.

Библиографический список

1. Агафонов Ю.А., Компаниец С.В. Результаты электроразведочных исследований в Западном Прибайкалье // Доклады Всерос. молодежной конф. «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. С. 248–249.
2. Персова М.Г. Зондирование становлением поля трехмерных сред и проблемы интерпретации // Сибирский журнал индустриальной математики. 2009. Т. XII, № 2 (38). С. 84–86.
3. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. 2010. № 6. С. 47–52.
4. Семинский И.К., Буддо И.В., Суоров Л.В., Агафонов Ю.А. Опыт 3D-моделирования сигналов становления электромагнитного поля в условиях осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. 2012. № 3. С. 49–53.

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук, доцент Иркутского государственного технического университета А.В. Мироманов