



## ОБНАРУЖЕНИЕ КРОВЛИ КОЛЛЕКТОРА ПО СИГНАЛАМ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА В НАКЛОННО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

О.П. Темирбулатов<sup>1,2</sup>, И.В. Михайлов<sup>1,2</sup>, И.В. Суродина<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,  
e-mail: [MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru](mailto:MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru)

Данное исследование направлено на изучение возможностей электромагнитного зонда с тороидальными катушками в задачах геонавигации. Выполнено трехмерное численное конечно-разностное моделирование электромагнитных откликов для зонда с тороидальными катушками, для зондов электромагнитного каротажа и бокового каротажного зондирования в двухслойных моделях с варьирующимся контрастом УЭС и зенитным углом скважины. На основе этих расчетов показаны ключевые особенности сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ), высокочастотного электромагнитного каротажа (ВИКИЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ) при обнаружении границы до ее пересечения. Данные особенности позволяют заблаговременно определять приближение к кровле коллектора по сигналам ЗЭТ, ВИКИЗ и БКЗ.

*Электрокаротаж, тороидальные катушки, геонавигация, численное моделирование, конечные разности, глубина обнаружения*

## RESERVOIR TOP DETECTION BY RESISTIVITY LOGGING SIGNALS IN DEVIATED AND HORIZONTAL WELLS: COMPARATIVE ANALYSIS

O.P. Temirbulatov<sup>1,2</sup>, I.V. Mikhaylov<sup>1,2</sup>, I.V. Surodina<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>3</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,  
Lavrentiev Ave., 6, Novosibirsk, 630090, Russia,  
e-mail: [MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru](mailto:MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru)

This research is aimed at finding out the capabilities of an electromagnetic probe with toroidal coils in geosteering problems. Three-dimensional numerical finite-difference modeling of electromagnetic responses was performed for a probe with toroidal coils, for high-frequency electromagnetic logging probe and side logging sondes in two-layer models with varying resistivity contrast and borehole zenith angle. Based on these calculations, the key features of the toroidal coil electromagnetic sounder (ZET), high-frequency electromagnetic logging (VIKIZ) and side logging (BKZ) signals in detecting the boundary before it is crossed are shown. These features make it possible to determine the approach to the roof of the collector using the signals ZET, VIKIZ and BKZ.

*Resistivity logging, toroidal coils, geosteering, numerical modeling, depth of detection*

## ВВЕДЕНИЕ

В текущей обстановке перед российской нефтепромысловой геофизикой остро стоит вопрос замещения скважинных технологий, в том числе для проведения геонавигации нефтегазовых скважин. В отечественной практике для изучения геоэлектрических свойств нефтегазоносных коллекторов широко используются боковое каротажное зондирование (БКЗ) и высокочастотный электромагнитный каротаж (ВЭМКЗ, ВИКИЗ). Также в последнее время изучаются возможности нового отечественного электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ [Эпов и др., 2019; Михайлов и др., 2021]. На сегодняшний день остаются неизученными способности зонда к обнаружению границ при геонавигации наклонно-горизонтальных скважин. Более того, в международной практике мало внимания уделяется возможностям зондов с тороидальными катушками в задачах геонавигации [Ortenzi et al., 2011]. Следовательно, возникает необходимость изучения возможностей зондов с тороидальными катушками в целом и ЗЭТ в частности в задачах геонавигации наклонно-горизонтальных скважин, а также последующего сравнения сигналов ЗЭТ с распространенными методами ВИКИЗ и БКЗ, что и составляет цель данного исследования.

В ИНГГ СО РАН разработаны программы, позволяющие проводить трехмерное моделирование зондов БКЗ [Суродина 2015; Нечаев и др., 2022], ВИКИЗ, ВЭМКЗ [Шурина и др., 2009; Surodina, 2017], и зондов с тороидальными катушками [Суродина и др., 2020]. В данной работе были использованы программы И.В. Суудиной.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ. КРИТЕРИЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ

Вычисление сигналов проведено для двухслойных геоэлектрических моделей (с одной границей) с варьирующимся контрастом УЭС от 1.2 до 20 при неизменном УЭС верхнего полупространства, равному 5 Ом·м. УЭС нижнего полупространства варьируется от 6 до 100 Ом·м. Данная постановка симулирует приближение зонда к более резистивному углеводородонасыщенному коллектору из глинистой покрышки без учета анизотропии глин. Зенитный угол скважины изменяется от 0 до 90°. В качестве бурового раствора рассматривается довольно распространенный в российской практике на глинистой основе с УЭС, равным 1 Ом·м. Радиус скважины составляет 0.108 м. Обобщая детали, данный сравнительный анализ возможностей в геонавигации был проведен в зависимости от угла наклона скважины и контраста удельного сопротивления на геоэлектрической границе при фиксированном УЭС и радиусе скважины.

Ключевой характеристикой зонда в определенной среде при геонавигации скважин является глубина обнаружения границы («depth of detection» или DOD) [Bittar et al., 2009]. В зарубежной практике численный критерий для определения глубины обнаружения границы раздела сред для зондов электромагнитных и на постоянном токе выбирается в каждой ситуации в индивидуальном порядке. Так, например, микроимиджеры «отмечают» контрастную границу в точке, в которой сигнал отклонился от постоянного значения в среде на два уровня шума [Bittar et al., 2009]. Для «геосигналов» и для электромагнитных зондов как с коаксиальными, так и с наклонными приемными катушками порог значения, на который отклоняется сигнал при обнаружении границы, может задаваться по усмотрению специалиста [Seifert et al., 2011; Li et al., 2020]. Также распространенным способом является выделение глубины обнаружения по отклонению сигнала от асимптоты сигнала, соответствующему текущему полупространству, на заданный процент [Gianzero et al., 1990; Hartmann et al., 2008]. В данном исследовании целесообразно рассмотреть в качестве критерия обнаружения границы отклонение на 10 % от асимптоты в верхнем полупространстве. Отклонение на указанный процент превышает ожидаемые на

практике шумы в сигналах. В текущем исследовании при моделировании сигналов зондов электрокаротажа исходим из предположения, что приборы оборудованы центратором. Это допущение позволяет исключить влияние эксцентриситета зондов.

### Глубина обнаружения по сигналам зонда с тороидальными катушками ЗЭТ

При анализе вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$  выделяются следующие особенности: чем выше частота сигнала, тем на меньшем расстоянии можно отследить приближение к границе (рис. 1, 2). Также мнимая составляющая сигнала  $E_z$  «реагирует» на приближение к целевому пласту на большей дистанции, чем действительная. Например, при частоте 250 кГц и контрасте УЭС, равном 8 (УЭС нижнего полупространства 40 Ом·м), приближение к границе можно отметить на расстоянии 0.54–0.66 и 0.55–1 м для действительной и мнимой компонент соответственно (рис. 1). Глубина обнаружения тем больше, чем меньше зенитный угол скважины: наибольшая глубина обнаружения в субвертикальной скважине, наименьшая – в субгоризонтальной. С уменьшением частоты до 50 кГц глубина обнаружения увеличивается до 0.4–1 и 0.4–1.05 м для действительной и мнимой составляющих поля  $E_z$  соответственно (рис. 2). Наибольшая глубина обнаружения, как при 250 кГц, соответствует субвертикальной скважине, наименьшая – субгоризонтальной.

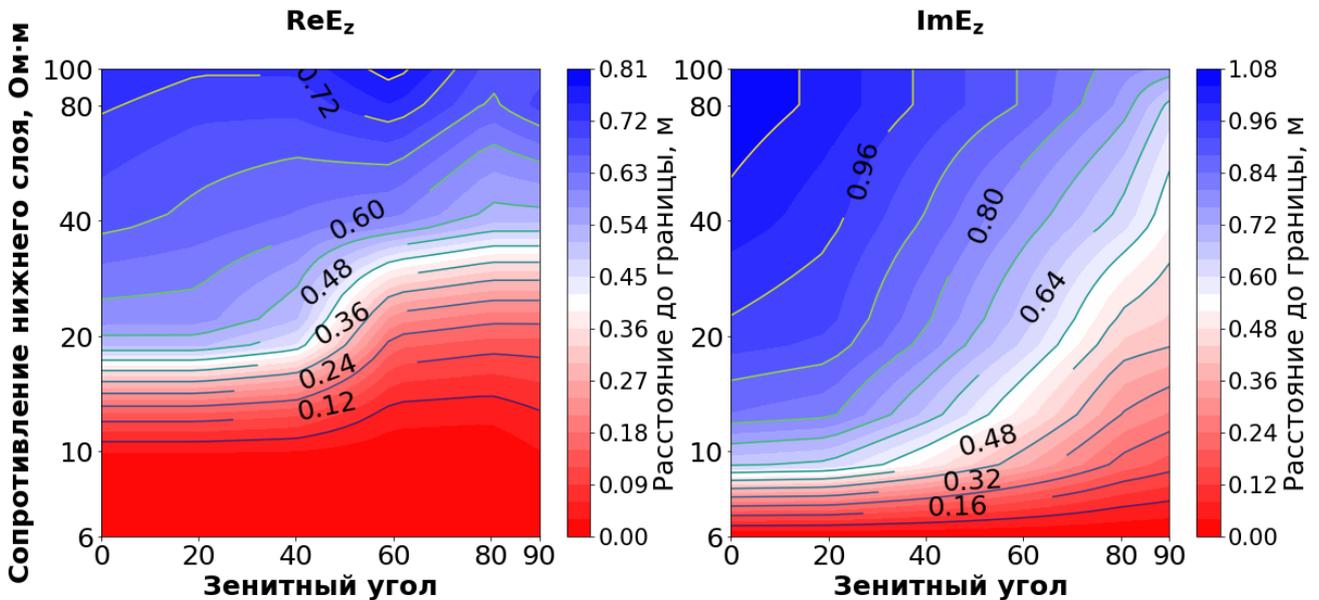


Рис. 1. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $E_z$  при частоте 250 кГц

С увеличением контраста УЭС между двумя полупространствами на границе глубина обнаружения кровли коллектора возрастает. При частоте 250 кГц и малом контрасте УЭС (УЭС коллектора 10 Ом·м) приближение к геоэлектрической границе отмечается на расстоянии, не превышающим 0.05 м для действительной и 0.7 м для мнимой составляющей  $E_z$  (рис. 1). С увеличением контраста УЭС на границе до 20 (при УЭС коллектора, равном 100 Ом·м) глубина обнаружения увеличивается до 0.8 и 1.1 м для  $ReE_z$  и  $ImE_z$  соответственно. При наименьшей частоте сигнала 50 кГц и контрасте УЭС, равном 2 (УЭС коллектора 10 Ом·м), глубина обнаружения достигает 0.64 и 0.7 м для  $ReE_z$  и  $ImE_z$  соответственно. При большем контрасте УЭС (УЭС коллектора 100 Ом·м) глубина обнаружения возрастает до 1.1 м для обеих составляющих  $E_z$  (рис. 2).

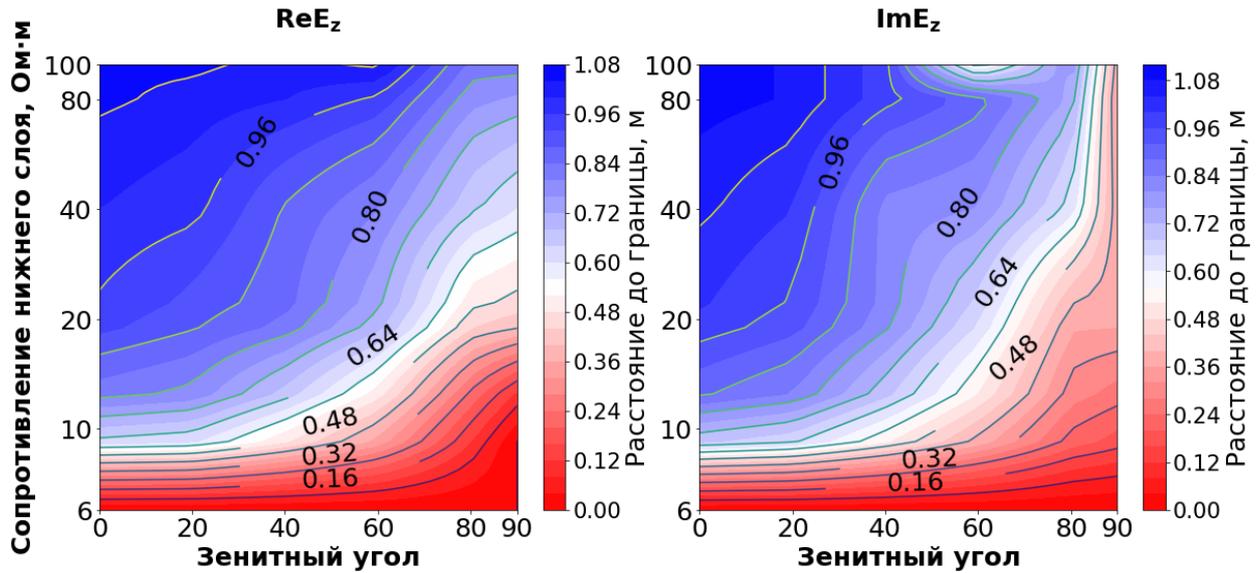


Рис. 2. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $E_z$  при частоте 50 кГц

По тангенциальной компоненте магнитного поля  $H_\phi$  отмечается уменьшение глубины обнаружения границы по мере увеличения частоты сигнала от 50 до 250 кГц (рис. 3, 4). По мнимой составляющей поля  $H_\phi$  можно определить приближение к границе на меньшем расстоянии, чем по действительной. Например, при контрасте УЭС, равном 8 (УЭС коллектора при этом 40 Ом·м), и частоте сигнала 250 кГц глубина обнаружения границы составляет 0.5–1.2 и 0.55–0.9 м для  $ReH_\phi$  и  $ImH_\phi$  соответственно (рис. 3). При частоте сигнала 50 кГц глубина обнаружения равна 0.7–1.4 м для  $ReH_\phi$  и 0.5–1 м для  $ImH_\phi$  (рис. 4). Наибольшая глубина обнаружения, как при анализе поля  $E_z$ , наблюдается в субвертикальной скважине, наименьшая глубина обнаружения – в субгоризонтальной.

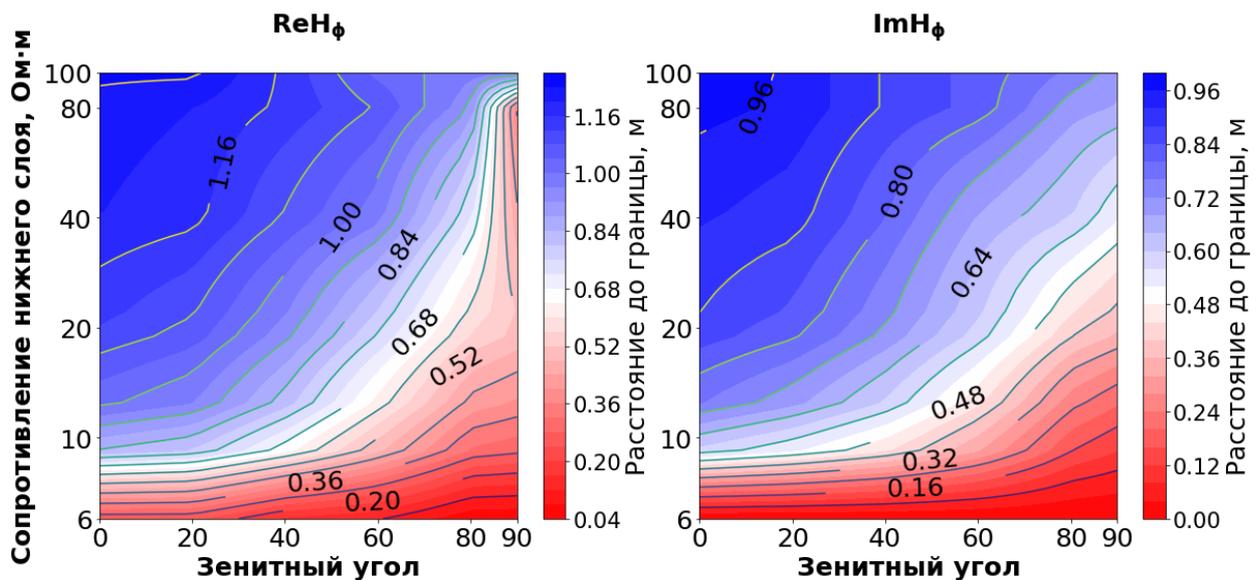


Рис. 3. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $H_\phi$  при частоте 250 кГц

С увеличением контраста УЭС на границе от 1.2 до 20 (с увеличением УЭС нижнего полупространства от 6 до 100 Ом·м) глубина обнаружения увеличивается. При частоте 250 кГц и контрасте

УЭС, не превышающем 2 (УЭС коллектора 10 Ом·м), глубина обнаружения находится в диапазоне до 0.85 и 0.55 м для действительной и мнимой составляющих соответственно (рис. 3). При росте контраста УЭС на границе до 20 (увеличении УЭС коллектора до 100 Ом·м), глубина обнаружения увеличивается до 1.3 м для  $ReH_\phi$  и на 1 м для  $ImH_\phi$ . При операционной частоте 50 кГц и контрасте УЭС на границе, не превышающем 2, зафиксировать приближение к кровле коллектора можно на расстоянии до 1 и 0.65 м для действительной и мнимой составляющей поля  $H_\phi$  соответственно (рис. 4). При наибольшем рассмотренном контрасте УЭС на границе эта величина возрастает до 1.5 м для  $ReH_\phi$  и на 1.1 м для  $ImH_\phi$ .

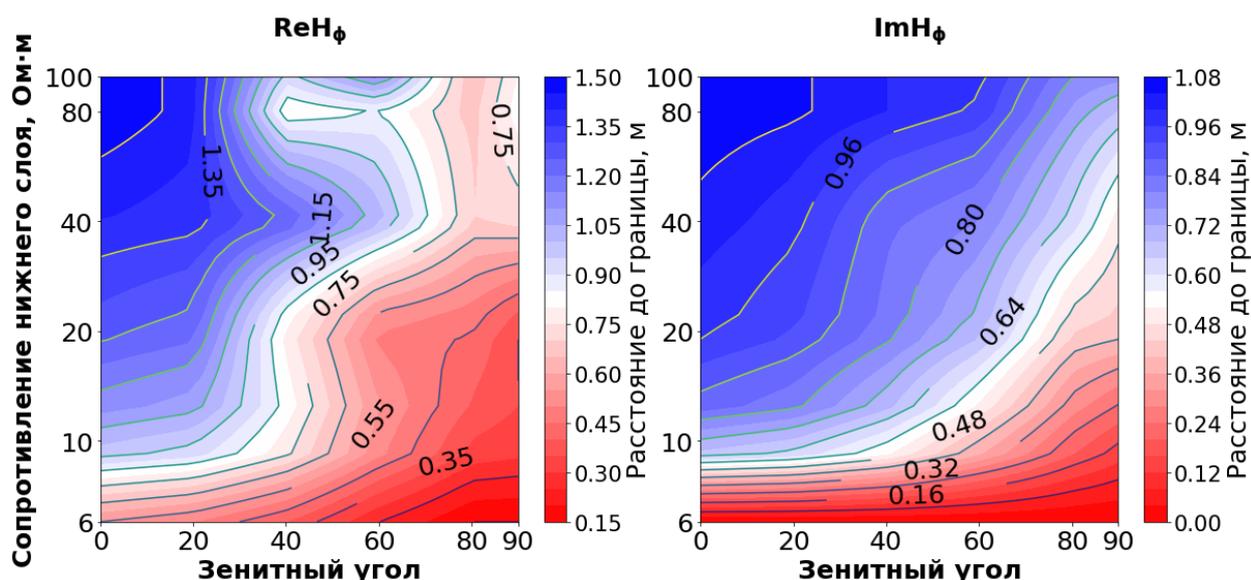


Рис. 4. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $H_\phi$  при частоте 50 кГц

Обобщая вышеприведенный анализ, качественно можно отметить, что при увеличении зенитного угла скважины глубина обнаружения границы по всем сигналам зонда с тороидальными катушками уменьшается. Также она уменьшается при увеличении частоты от 50 до 250 кГц. Анализируя сигналы вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$ , можно сделать вывод о том, что приближение к границе фиксируется на большем расстоянии по мнимой компоненте  $ReE_z$ , чем по действительной  $ImE_z$ . Обратная ситуация наблюдается с тангенциальной компонентой магнитного поля  $H_\phi$ : показания действительной компоненты  $ReH_\phi$  дают информацию о детекции границы на большем расстоянии, чем показания мнимой компоненты  $ImH_\phi$ . Кроме того, глубина обнаружения увеличивается при росте контраста УЭС на границе для всех сигналов.

#### Глубина обнаружения по сигналам высокочастотного электромагнитного каротажа ВИКИЗ

Рассмотрена глубина обнаружения горизонтальной контрастной геоэлектрической границы для сигналов разности фаз ( $\Delta\phi$ ). Для отношения амплитуд глубина обнаружения не приводится, поскольку с используемым критерием обнаружения границы затруднительно зарегистрировать приближение на существенном расстоянии от скважины до границы.

По показаниям разности фаз короткого зонда ВИКИЗ df05 видно, что при любом зенитном угле скважины при контрастности УЭС, равной 2 и меньше (УЭС коллектора при этом не превышает 10 Ом·м), приближение к целевому пласту может быть отмечено практически при пересечении границы – глубина обнаружения границы не достигает и 0.05 м (рис. 5). При контрастности УЭС 8 (УЭС коллектора 40 Ом·м)

и более, в вертикальной скважине целевой пласт начинает влиять на сигнал на расстоянии около 0.08 м. При увеличении зенитного угла скважины заметно увеличение глубины обнаружения границы: так, при зенитном угле  $40^\circ$  она составляет 0.12–0.15 м, при  $60^\circ$  – 0.18 м, при наклоне 80 и  $90^\circ$  глубина обнаружения достигает 0.25 м.

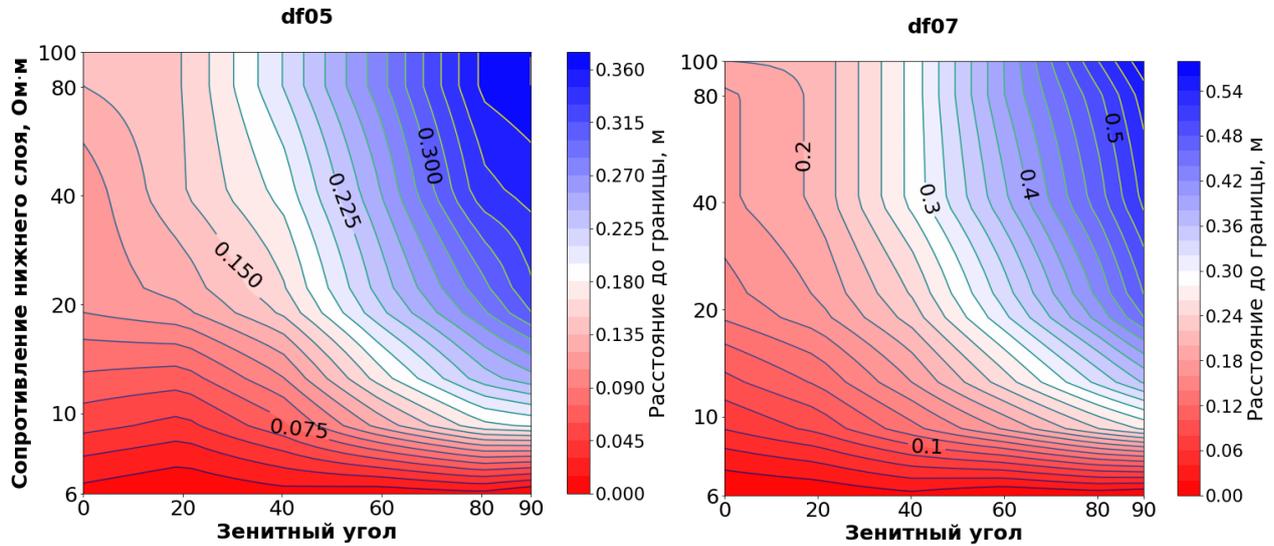


Рис. 5. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $\Delta\phi$  зонда ВИКИЗ df05 (слева) и df07 (справа)

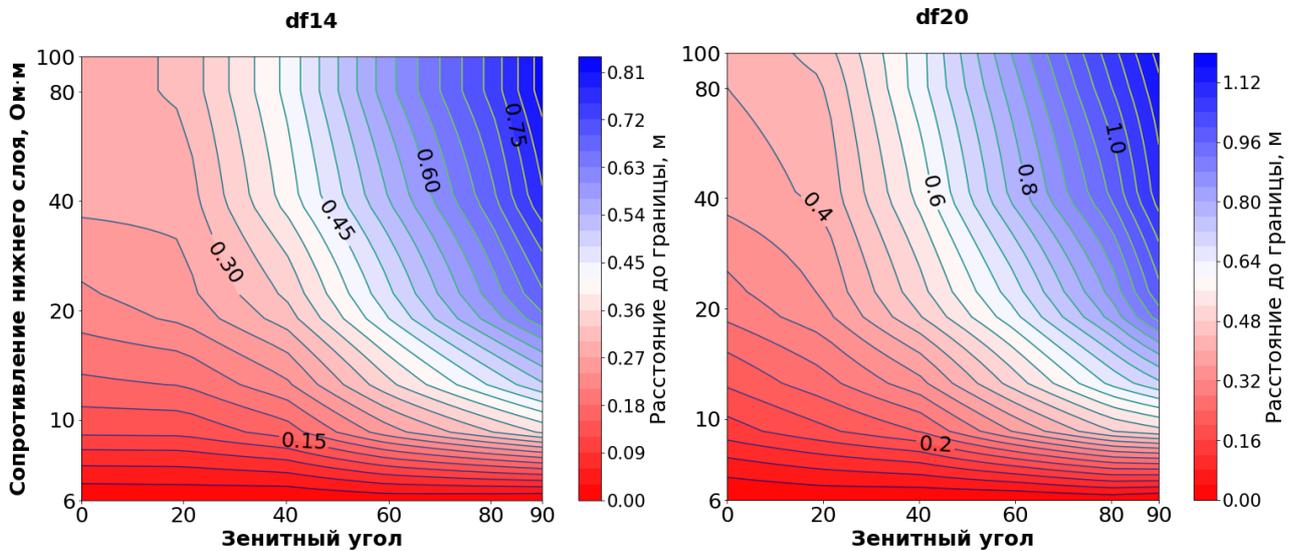


Рис. 6. Глубина обнаружения горизонтальной геоэлектрической границы по сигналам  $\Delta\phi$  зонда ВИКИЗ df14 (слева) и df20 (справа)

Сигналы разности фаз длинного зонда ВИКИЗ df20 при контрастности УЭС 2 и менее (УЭС коллектора не превышает 10 Ом·м) могут «реагировать» на приближение к целевому пласту на расстоянии до 0.4 м (рис. 6) в субгоризонтальных скважинах, в субвертикальных – до 0.2 м. В субвертикальных скважинах (при зенитном угле скважины до  $20^\circ$ ) с ростом контрастности УЭС до 4 (УЭС коллектора при этом 20 Ом·м) геоэлектрическая граница может отмечаться на расстоянии 0.3 м, с увеличением зенитного угла до  $90^\circ$  глубина обнаружения постоянно возрастает и достигает 0.9 м, при

большей контрастности УЭС (до 20, УЭС коллектора 100 Ом·м) глубина обнаружения не превышает 0.45 м в субвертикальных скважинах, в субгоризонтальных достигает 1.1 м.

Исходя из вышеприведенного анализа, можно сделать вывод, что диаграммы разности фаз ВИКИЗ отражают приближение к контрастной геоэлектрической границе на большем расстоянии от скважины при увеличении угла наклона скважины и контраста УЭС на границе.

### Глубина обнаружения по кажущемуся сопротивлению зондов БКЗ

По диаграммам зонда А0.4М0.1N бокового каротажного зондирования можно наблюдать следующее. В модели с субвертикальной скважиной, при контрастности УЭС на границе до 2 (УЭС нижнего слоя 10 Ом·м), кровля целевого пласта отмечается на расстоянии до 0.05 м (рис. 7, слева). Ощутимый прирост глубины обнаружения наблюдается в субгоризонтальной скважине (80–90°) – до 0.2 м. При увеличении контраста УЭС до 16 (УЭС нижнего пласта 80 Ом·м) в модели с субвертикальной скважиной глубина обнаружения возрастает до 0.4 м. Если скважина субгоризонтальная, то глубина обнаружения достигает 0.3 м. В наклонных скважинах (около 60°) глубина обнаружения уменьшается и лежит в пределах до 0.15 м.

Зонд БКЗ А4.0М0.5N с бóльшим расстоянием между измерительными электродами отмечает контрастную границу на расстоянии до 0.15 м при контрастности УЭС 2 и менее, и наклоне скважины до 40° (рис. 7, справа). С увеличением зенитного угла до 80–90° глубина обнаружения возрастает до 1.8 м. При росте контраста УЭС на границе до 20 (УЭС нижнего пласта 100 Ом·м), в субгоризонтальных скважинах глубина обнаружения составляет около 1 м, в наклонных (зенитный угол около 40°) глубина обнаружения границы снижается и не превышает 0.15 м. Таким образом, в субгоризонтальных скважинах глубина обнаружения наибольшая – 3.2 м.

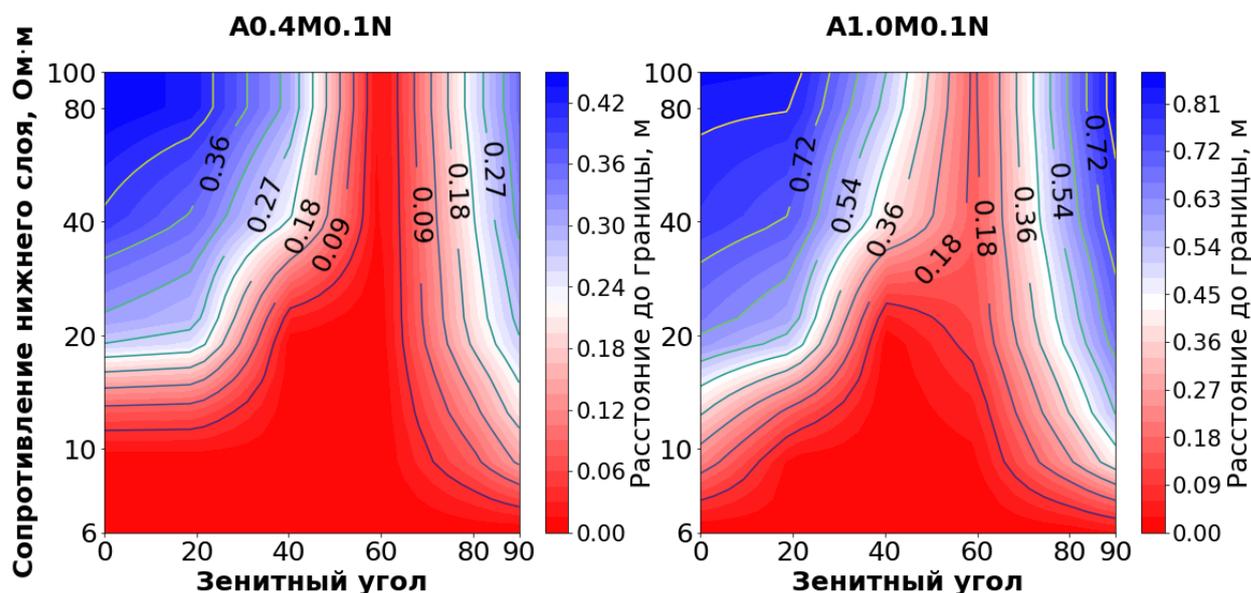


Рис. 7. Глубина обнаружения по данным кажущегося сопротивления зондов БКЗ А0.4М0.1N (слева) и А1.0М0.1N (справа)

Вышеприведенный анализ показывает, что по сигналам кажущегося сопротивления последовательного градиент-зонда А0.4М0.1N можно отметить приближение к контрастной границе на расстоянии до 0.4 м, если скважина вертикальная или горизонтальная. В наклонной скважине глубина

обнаружения границы наименьшая и не превышает 0.05 м. По данным кажущегося сопротивления зонда А4.0М0.5N можно зафиксировать приближение к границе на расстоянии 3.2 м в субгоризонтальных скважинах; в субвертикальных и наклонных скважинах глубина обнаружения существенно ниже – 1 и 0.15 м соответственно.

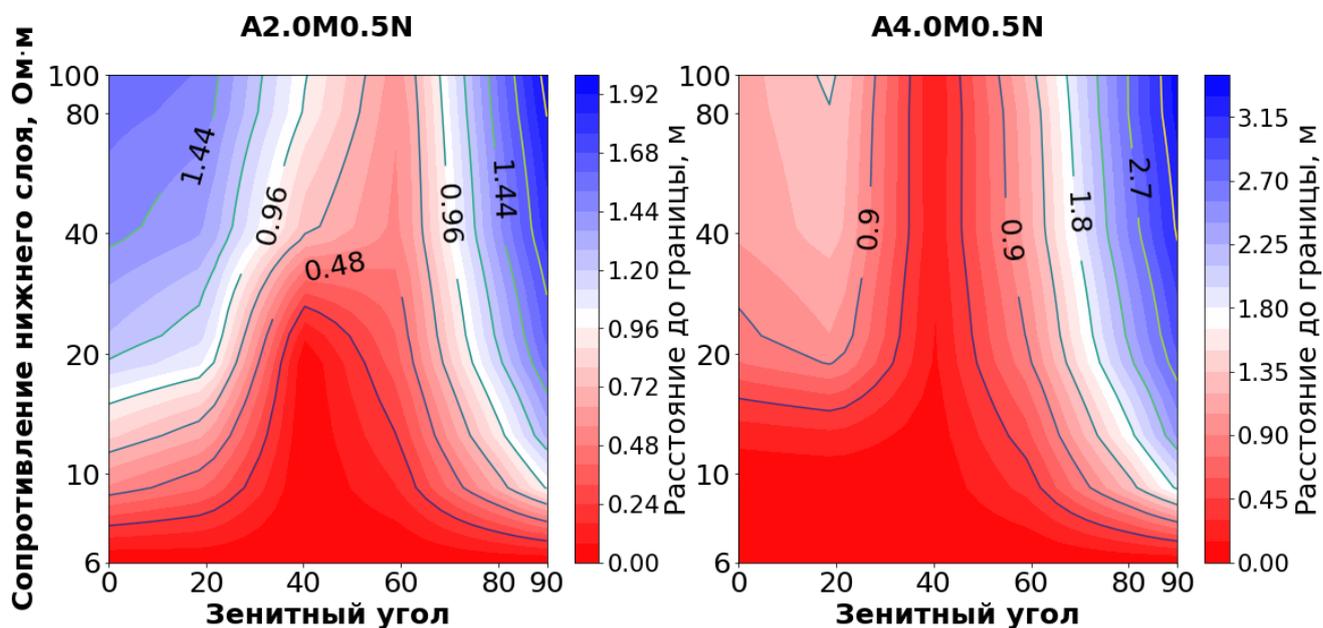


Рис. 8. Глубина обнаружения по данным кажущегося сопротивления зондов БКЗ А2.0М0.5N (слева) и А4.0М0.5N (справа)

### ВЫВОДЫ ПО АНАЛИЗУ ГЛУБИН ОБНАРУЖЕНИЯ КОНТРАСТНОЙ ГРАНИЦЫ

Прибор с тороидальными катушками ЗЭТ регистрирует приближение к контрастной границе на наибольшем расстоянии в субвертикальных скважинах, при этом глубина обнаружения достигает 1.5 м по регистрируемому сигналу  $H_\Phi$  при максимальном контрасте УЭС между глинистой крышкой и коллектором. При больших углах наклона глубина обнаружения уменьшается. Максимальная величина для сигнала  $H_\Phi$  достигает 1 м в субгоризонтальной скважине при максимальном контрасте УЭС.

По сигналам разности фаз зондов ВИКИЗ глубина обнаружения возрастает с увеличением как контраста сопротивлений между крышкой и коллектором, так и с ростом зенитного угла скважины. При максимальном контрасте УЭС глубина обнаружения границы достигает 0.4 м в субвертикальных скважинах и 1.1 м в субгоризонтальных.

Наибольшая глубина обнаружения геоэлектрической границы по показаниям БКЗ наблюдается в субвертикальных и субгоризонтальных скважинах и достигает 3.2 м в субгоризонтальных скважинах по зонду А4.0М0.5N при наибольшем рассмотренном контрасте удельного электрического сопротивления между крышкой и коллектором. При зенитном угле 40–60° глубина обнаружения наименьшая и не превышает 0.15 м для зонда А4.0М0.5N при всех рассмотренных контрастах УЭС.

Для более удобного и детального сравнения глубины обнаружения кровли коллектора по рассмотренным показаниям приборов электрокаротажа, ниже приведены сводные таблицы при контрастах УЭС на границе 2, 8 и 20, УЭС целевого пласта при этом составляет 10, 40 и 100 Ом·м соответственно (табл. 1–3).

Таблица 1

**Глубина обнаружения границы в метрах при контрасте УЭС, равном 2**

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	0.725	0.8	0.825	0	0.07	0.17	0	0.28	1.4
40°	0.55	0.62	0.65	0.05	0.16	0.3	0	0	0
90°	0.15	0.17	0.17	0.14	0.32	0.63	0.17	0.47	2.25

Таблица 2

**Глубина обнаружения границы в метрах при контрасте УЭС, равном 8**

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	0.93	1	1	0.07	0.17	0.38	0.4	0.8	2.625
40°	0.8	0.85	0.85	0.13	0.29	0.57	0.23	0.42	1.6
90°	0.5	0.52	0.55	0.25	0.52	1.1	0.32	0.78	3.5

Таблица 3

**Глубина обнаружения границы в метрах при контрасте УЭС, равном 20**

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	1	1.04	1.07	0.07	0.19	0.4	0.47	0.9	2.9
40°	0.87	0.97	1	0.13	0.29	0.62	0.3	0.55	1.8
90°	0.7	0.77	0.77	0.27	0.57	1.17	0.35	0.88	3.8

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования были использованы алгоритмы трехмерного конечно-разностного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования, электромагнитного каротажа и электромагнитного зонда с тороидальными катушками. Для численного расчета сигналов были задействованы вычислительные ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. По рассчитанным сигналам были сравнены глубины обнаружения границы по откликам трех зондов в двухслойных средах с варьирующимся контрастом УЭС. Разрезы вскрыты скважинами под углами от 0 до 90°.

Результаты исследования показали, что по сигналам БКЗ приближение к границе можно зафиксировать на большем расстоянии в субвертикальных и субгоризонтальных скважинах. Сигналы ВИКИЗ способны детектировать приближение к границе на большем расстоянии в горизонтальных скважинах. Электромагнитные отклики зонда с тороидальными катушками наиболее чувствительны к

границе в вертикальных скважинах. Глубина обнаружения границы возрастает с увеличением контраста УЭС для всех описанных методов каротажа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

## ЛИТЕРАТУРА

**Михайлов И.В., Суродина И.В., Темирбулатов О.П.** Сигналы электромагнитного зонда с тороидальными катушками в наклонных скважинах (по результатам численного моделирования) // Геофизические технологии. – 2021. – № 3. – С. 18–27, doi: 10.18303/2619-1563-2021-3-18.

**Нечаев О.В., Эпов М.И., Глинских В.Н.** Единый подход к трехмерному моделированию процесса каротажа гальваническими и индукционными зондами в анизотропных средах // Геофизические технологии. – 2022. – № 3 – С. 25–33, doi: 10.18303/2619-1563-2022-3-25.

**Суродина И.В.** Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ. – 2015. – № 22 (2). – С. 51–61.

**Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н.** Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12. – С. 131–134, doi: 10.25633/ETN.2020.12.17.

**Шурина Э.П., Эпов М.И., Нечаев О.В.** Трехмерное численное моделирование электромагнитных полей // Геофизический журнал. – 2009. – № 31 (4). – С. 158–162.

**Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В.** Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 330 (6). – С. 187–197, doi: 10.18799/24131830/2019/6/2139.

**Bittar M., Klein J., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J., Golla C., Althoff G., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 2009. – Vol. 12 (2). – P. 270–279, doi: 10.2118/109971-PA.

**Gianzero S., Chemali R., Su S.-M.** Induction, resistivity, and MWD tools in horizontal wells // The Log Analyst. – 1990. – Vol. 5–6. – P. 158–171.

**Hartmann A., Gorek M., Fulda C., Kraft K.** Early bed boundary detection while drilling – testing and application of a bit resistivity device // International Petroleum Technology Conference (December 3–5, 2008). – Kuala Lumpur, Malaysia, 2008 – Paper IPTC 12063, doi: 10.2523/12063-MS.

**Li H., Zhu J., Xiong Y., Liu G., Tian Y., Geng Z., Zhou J.** On the depth of detection of logging-while-drilling resistivity measurements for looking-around and looking-ahead applications // Interpretation. – 2020. – Vol. 8 (3). – P. SL151–SL158, doi: 10.1190/int-2019-0291.1.

**Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y.** New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 197–207.

**Seifert D., Chemali R., Bittar M.** The link between resistivity contrast and successful geosteering // SPWLA 52nd Annual Logging Symposium (May 14–18, 2011). – Colorado Springs, CO, USA, 2011. – Paper SPWLA-2011-VVV.

**Surodina I.** The GPU solvers for high-frequency induction logging // Numerical Analysis and Its Applications. 6th International Conference, NAA 2016 (Lozenetz, Bulgaria, June 15–22, 2016). Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science 10187). – Springer Verlag, 2017. – P. 640–647.

## REFERENCES

**Bittar M., Klein J., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J., Golla C., Althoff G., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 2009. – Vol. 12 (2). – P. 270–279, doi: 10.2118/109971-PA.

**Epov M.I., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V.** Algorithms of data processing and inversion for an electromagnetic tool with toroidal coils when studying macroanisotropic properties of reservoirs // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330 (6). – P. 187–197, doi: 10.18799/24131830/2019/6/2139.

**Gianzero S., Chemali R., Su S.-M.** Induction, resistivity, and MWD tools in horizontal wells // The Log Analyst. – 1990. – Vol. 5–6. – P. 158–171.

**Hartmann A., Gorek M., Fulda C., Kraft K.** Early bed boundary detection while drilling – testing and application of a bit resistivity device // International Petroleum Technology Conference (December 3–5, 2008). – Kuala Lumpur, Malaysia, 2008 – Paper IPTC 12063, doi: 10.2523/12063-MS.

**Li H., Zhu J., Xiong Y., Liu G., Tian Y., Geng Z., Zhou J.** On the depth of detection of logging-while-drilling resistivity measurements for looking-around and looking-ahead applications // Interpretation. – 2020. – Vol. 8 (3). – P. SL151–SL158, doi: 10.1190/int-2019-0291.1.

**Mikhaylov I.V., Surodina I.V., Temirbulatov O.P.** Signals of electromagnetic tool with toroidal coils in deviated wells (following numerical simulation results) // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2021. – No. 3. – P. 18–27, doi: 10.18303/2619-1563-2021-3-18.

**Nechaev O.V., Epov M.I., Glinskikh V.N.** A unified approach to three-dimensional modeling of the logging process by galvanic and induction probes in anisotropic media // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2022. – No. 3. – P. 25–33, doi: 10.18303/2619-1563-2022-3-25.

**Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y.** New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 197–207.

**Seifert D., Chemali R., Bittar M.** The link between resistivity contrast and successful geosteering // SPWLA 52nd Annual Logging Symposium (May 14–18, 2011). – Colorado Springs, CO, USA, 2011. – Paper SPWLA-2011-VVV.

**Shurina E.P., Epov M.I., Nechaev O.V.** Three-dimensional numerical modeling of electromagnetic fields // Geophysical Journal. – 2009. – Vol. 31 (4). – P. 158–162.

**Surodina I.** The GPU solvers for high-frequency induction logging // Numerical Analysis and Its Applications. 6th International Conference, NAA 2016 (Lozenetz, Bulgaria, June 15–22, 2016). Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science 10187). – Springer Verlag, 2017. – P. 640–647.

**Surodina I.V.** Parallel GPU solvers for the solution of direct electric logging problems // Mathematical Notes of NEFU. – 2015. – Vol. 22 (2). – P. 51–61.

**Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N.** Mathematical modeling of toroidal source signals in three-dimensional isotropic earth models // Natural and Technical Sciences. – 2020. – Vol. 12. – P. 131–134, doi: 10.25633/ETN.2020.12.17.

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ТЕМИРБУЛАТОВ Олег Павлович* – магистр геологии, аспирант геолого-геофизического факультета НГУ, инженер лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование данных электрокаротажа.

*МИХАЙЛОВ Игорь Владиславович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование и инверсия данных электрокаротажа, нефтепромысловая геофизика, межскважинное электромагнитное просвечивание.

*СУРОДИНА Ирина Владимировна* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и лаборатории вычислительных задач геофизики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование задач каротажа и наземного зондирования, разработка параллельных алгоритмов и программ для GPU.

*Статья поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.,  
принята к публикации 1 декабря 2023 г.*