

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ В СУБГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ: ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОНАВИГАЦИИ И ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ

А.А. Горбатенко, К.В. Сухорукова

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

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

Работа посвящена развитию методических приемов интерпретации данных высокочастотных электромагнитных зондирований в наклонных и горизонтальных скважинах. По результатам численного моделирования на основе аналитических алгоритмов расчета электромагнитных полей выполнен анализ влияния удельного электрического сопротивления (УЭС) подстилающего слоя на сигналы электромагнитного зонда, находящегося вблизи границы с ним. Показано, что в субгоризонтальных скважинах перекрывающие и подстилающие пласты вносят значительный вклад в данные электромагнитных зондирований. Этот вклад зависит от контраста УЭС пластов и положения каротажного прибора относительно границ и должен учитываться при определении истинных значений сопротивления вскрытых скважиной коллекторов.

На основе полученных результатов авторами разработаны методические приемы, позволяющие при помощи инверсии данных электромагнитного каротажа определить параметры осадочных отложений, пересеченных субгоризонтальной скважиной.

Приводится пример интерпретации данных электромагнитного каротажа в интервалах нефтеводонасыщенных коллекторов месторождений Западной Сибири. Интервалы осложнены непроницаемыми прослоями с высоким УЭС, влияние которых приводит к сильному завышению значений кажущегося сопротивления. Показано, что учет влияния этих прослоев при инверсии данных электромагнитного каротажа позволяет более точно оценить УЭС проницаемых частей коллектора.

*Электромагнитный каротаж, геонавигация, геоэлектрическая модель, удельное электрическое сопротивление, разность фаз, отношение амплитуд.*

## HIGH-FREQUENCY INDUCTION LOGGING IN DEVIATED AND HORIZONTAL WELLS: GEOSTEERING AND INVERSION

A.A. Gorbatenko and K.V. Sukhorukova

The study focuses on processing methods for high-frequency induction data from deviated and horizontal wells. Simulation of electromagnetic fields with analytical algorithms is used to study how the resistivity of rocks above and below the well influences the acquired data. The simulations show that the contribution of under- and overlying layers into the recorded responses is considerable and depends on resistivity contrasts between the layers and on the position of logging arrays relative to the layer boundaries. This fact has to be taken into account when estimating true resistivity of reservoirs and when inverting induction logs from horizontal wells for reservoir characterization. The method is applied to oil- and water-saturated reservoirs in West Siberia, which contain high-resistivity impermeable layers leading to overestimation of apparent resistivity. Due regard for the effect of these layers in inversion of induction logs provides high-quality resistivity estimates.

*Induction logging, geosteering, resistivity model, resistivity, phase difference, amplitude ratio*

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с изучением нефтяных коллекторов усложненного строения повышение эффективности их разработки обеспечивается развитием новых технологий вскрытия продуктивных интервалов. К таким технологиям в первую очередь относится бурение скважин с горизонтальным завершением. По данным за 2014 г., в России объемы такого высокотехнологичного бурения существенно возросли при общем снижении эксплуатационной проходки. Так, по сравнению с 2013 г. объемы проходки горизонтальных скважин в компании «Лукойл» возросли на 22.3 %, а в компании «Газпром» увеличились в 4.8 раза [От количества..., 2014]. Истощение запасов в традиционных коллекторах обуславливает дальнейшее развитие и расширение применения технологий горизонтальной проходки.

Бурение горизонтальных скважин и выбор интервалов перфорации — сложная техническая задача, поэтому для ее успешного выполнения требуется достоверная информация о свойствах вскрытых отложений. Геофизические методы исследования в скважинах служат одним из основных источников этой информации как во время бурения, так и при последующем каротаже в открытом стволе. Важное место в комплексе геофизических исследований занимают методы изучения удельного электрического сопротивления (УЭС) пород с использованием как постоянного, так и переменного токов. К последним относится высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование (ВЭМКЗ), зарекомендовавшее себя как надежный и высокоинформативный метод (с 1997 г. в варианте ВИКИЗ метод включен в основную комплекс ГИС при изучении терригенных разрезов Западной Сибири).

ВЭМКЗ, как и большинство методов скважинной электротометрии, был изначально разработан для применения в субвертикальных скважинах [Технология..., 2000]. В связи с этим стандартные методики интерпретации его данных не учитывают эффекты, влияющие на результаты измерений в горизонтальных и наклонных стволах, но отсутствующие в вертикальных. Эти эффекты, прежде всего, связаны с тем, что сильнонаклонные и горизонтальные скважины параллельны границам контрастных по УЭС пластов или пересекают их под острым углом. Поэтому на показания прибора большое влияние оказывает УЭС вмещающих пород, находящихся в зоне, формирующей измеряемый зондом отклик. Кроме того, при наклонном положении прибора силовые линии электрического поля, возбуждаемого в среде генераторной катушкой, пересекают границы контрастных по УЭС пластов. Это приводит к образованию на них электрических зарядов, влияющих на регистрируемый отклик, их плотность пропорциональна величине нормальной к границе компоненты электрического поля, которая, в свою очередь, зависит от угла между вектором электрического поля и плоскостью напластования. Следовательно, диаграммы данных ВЭМКЗ для одной и той же геоэлектрической модели имеют различный вид при разных зенитных углах ее пересечения [Горбатенко, Сухорукова, 2014].

Для корректного вычисления показаний электромагнитного каротажа в наклонной или горизонтальной скважине используются специально разработанные для этого алгоритмы решения прямых задач [Табаровский, 1975; Эпов, 1979; Cheryauka et al., 1996; Эпов и др., 2007; Суродина, Эпов, 2012; Глинских и др., 2013а, б; Labutin, Surodina, 2013]. Опыт применения этих программных средств показал, что численная интерпретация данных ВЭМКЗ обеспечивает высокую достоверность результатов в горизонтальных стволах. Корректное применение этих средств обеспечивается специальными алгоритмическими и методическими приемами, которые разрабатываются на основе анализа особенностей сигналов ВЭМКЗ в наклонных и горизонтальных скважинах [Эпов и др., 2014а, 2015; Nikitenko et al., 2014; Горбатенко, Сухорукова, 2014].

В статье приводится анализ результатов моделирования сигналов ВЭМКЗ в наклонных и горизонтальных скважинах, а также примеры интерпретации практических данных. Расчеты сигналов ВЭМКЗ выполнены при помощи решения прямой задачи для наклонного зонда численно-аналитическим методом [Эпов и др., 2014б] в типичных для коллекторов Западной Сибири моделях горизонтально-слоистой среды. Расчеты проведены для зондов длиной 1.4 и 2.0 м без учета влияния УЭС скважины и зоны проникновения, поскольку при бурении горизонтальных скважин часто используются биополимерные буровые растворы, в результате чего возникает понижающая зона небольшого радиуса, влияющая только на сигналы коротких зондов [Горбатенко, Сухорукова, 2014]. Последнее доказано результатами расчетов в моделях с учетом скважины и зоны проникновения с применением алгоритмов на основе конечно-разностного и конечно-элементного вычислительных подходов [Эпов и др., 2007; Суродина, Эпов, 2012; Labutin, Surodina, 2013]. Сигналы коротких зондов используются при расчленении разреза на пласты и оценке строения прискважинной зоны (выделение интервалов коллекторов) [Ельцов и др., 2014].

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ

В последнее время при бурении горизонтальных скважин все чаще вскрываются коллекторы не большой мощности. В этом случае для успешной навигации и корректной оценки флюидонасыщения коллектора по значению его УЭС необходима информация о близости границы с вмещающими породами. Следовательно, одна из задач электромагнитного каротажа — установить, на каком максимальном расстоянии от границы пласта до точки записи зонда в горизонтальной скважине будет заметно влияние перекрывающих или подстилающих пород [Эпов и др., 2015].

Приближение электромагнитного зонда к электрически контрастной горизонтальной границе выражается в устойчивом изменении разности фаз и отношения амплитуд вдоль скважины. Расстояние, на котором начинается это изменение, пропорционально длине зондов и также зависит от угла между скважиной и границей (сигналы длинных зондов начинают изменяться на большем удалении от границы, чем коротких; изменение сигналов вдоль скважины тем медленнее, чем ближе к прямому зенитный угол). Выберем величину  $0.5^\circ$  в качестве надежно фиксируемого изменения разности фаз при абсолют-

ной погрешности измерения 0.2—0.3°. Данные ВЭМКЗ в горизонтальных стволах часто осложнены квазипериодическими колебаниями, вызванными локальными неоднородностями горных пород или неровностями стенки скважины, но для этих колебаний характерен существенно меньший период вдоль скважины, определяемый технологическими особенностями процесса бурения [Горбатенко и др., 2013]. Поэтому при анализе практических данных признак приближения к границе — это изменение среднего уровня сигнала.

Рассмотрим двухслойную модель при различных значениях  $\rho_1$  и  $\rho_2$  УЭС верхнего и нижнего полупространств и расстояниях  $Z$  от точки записи до границы пластов (рис. 1, слева). Приращение разности фаз для длинного зонда (DF20, длина 2 м, частота 0.875 МГц), ориентированного параллельно напластованию, рассчитывается относительно разности фаз в однородной среде с УЭС верхнего полупространства  $\rho_1$ , в котором находится скважина. При моделировании значения  $\rho_1$  выбраны равными 5 и 50 Ом·м, что соответствует типичным значениям УЭС пластов Западной Сибири. Значения  $\rho_2$  выбираются таким образом, чтобы соотношение  $\rho_2/\rho_1$  было в пределах от 0.1 до 100, поэтому в разных моделях  $\rho_2$  равняется от 0.5 до 5000 Ом·м. По горизонтальной оси отложено значение  $\rho_2/\rho_1$ , по вертикальной оси — расстояние  $Z$  от точки измерения до подошвы верхнего полупространства.

При низком УЭС верхнего полупространства (5 Ом·м) влияние нижнего на сигнал превышает 0.5° на расстоянии до границы 1.0—1.4 м при значении  $\rho_2/\rho_1 > 1.1$  ( $\rho_2$  больше 5.5 Ом·м), а также при 1.8 м  $< Z < 2.3$  м при  $\rho_2/\rho_1 > 7$ —8. При значениях  $\rho_2/\rho_1 < 0.45$  влияние нижнего полупространства, проявляющееся в виде уменьшения разности фаз, становится заметным на расстоянии до границы не более 0.5 м, при этом на больших расстояниях до границы наблюдается область увеличения разности фаз — при 0.2 м  $< Z < 0.9$ —1.1 м. В области 0.5  $< \rho_2/\rho_1 < 0.9$  и 0.0 м  $< Z < 0.6$ —0.8 м разность фаз также увеличивается более чем на 0.5° по сравнению с однородной средой. При значениях  $\rho_2/\rho_1$  от 0.9 до 5.5 Ом·м из-за малого контраста сопротивлений пластов разность фаз изменяется на величину, не превышающую погрешности измерения.

В области  $\rho_2/\rho_1 > 10$  наблюдаются два интервала  $Z$ , по которым можно определить приближение к границе, и эти интервалы медленно расширяются с увеличением электрического контраста. В областях 0.1  $< \rho_2/\rho_1 < 1.0$  и 1.0  $< \rho_2/\rho_1 < 10.0$  модуль приращения разности фаз превышает 0.5° примерно в одинаковых интервалах расстояния до границы, но в первой из областей изменение знакопеременно и меньше, чем во второй.

Нельзя не отметить, что по мере приближения скважины к границе прибор может попасть в зону, где значение разности фаз в двухслойной среде не отличается от значений в однородной среде. Такие области при  $\rho_1 = 5$  Ом·м наблюдаются, например, на расстоянии от 1.1 м до 1.4 м при  $\rho_2/\rho_1 < 1$  и от 1.3 м до 1.7 м при 1.0  $< \rho_2/\rho_1 < 100.0$ . Поэтому в процессе интерпретации следует обращать внимание в первую очередь на изменение сигнала при изменении глубины положения прибора, а не на абсолютные значения измеряемых прибором величин.

Если УЭС верхнего полупространства равно 50 Ом·м (см. рис. 1), приращение сигнала вблизи границы становится много меньше (не превышает 4°) по сравнению с предыдущей моделью. При  $\rho_2/\rho_1 > 3$  уменьшение разности фаз более чем на 0.5° начинается на большем расстоянии до границы, чем в первой модели — 1.3 м по сравнению с 1.2 м при  $\rho_2/\rho_1 = 3.0$ , 1.7 м по сравнению с 1.4 м при  $\rho_2/\rho_1 = 10.0$ , и 1.9 м по сравнению с 1.5 м при  $\rho_2/\rho_1 = 100.0$ ; область положительного приращения отсутствует. При  $\rho_2/\rho_1 < 0.6$  по сравнению с первой моделью также наблюдается увеличение расстояний до границы:  $Z = 1.5$  м при  $\rho_2/\rho_1 = 0.1$  и  $Z = 1.0$  м при  $\rho_2/\rho_1 = 0.4$ . При этом расширяется область значений  $\rho_2/\rho_1$ , при которых изменение разности фаз меньше выбранного уровня — 0.6  $< \rho_2/\rho_1 < 1.4$ .

Если на границе полупространств расположен тонкий высокоомный прослой (см. рис. 1, справа), что часто наблюдается в разрезах нефтегазовых месторождений, он может существенно повлиять на результат интерпретации, если нет априорных сведений о его наличии и параметрах.

При  $\rho_1 = 5$  Ом·м влияние высокоомного пропластка (УЭС = 100 Ом·м, мощность 0.2 м) становится приблизительно одинаковым на одном расстоянии до его кровли при любых значениях УЭС нижнего полупространства. Изменение разности фаз превышает 0.5° при расстоянии до кровли пропластка около 1.5 м при  $\rho_2/\rho_1 = 0.1$ , 1.3 м при  $\rho_2/\rho_1 = 1.0$ , 1.4 м при  $\rho_2/\rho_1 = 10.0$ , 1.5 м при  $\rho_2/\rho_1 = 100.0$ . Исчезает область небольших приращений при слабом контрасте сопротивлений. В то же время, если бы вклад в сигнал нижнего полупространства полностью отсутствовал, изолинии изменения были бы прямыми, и их положение соответствовало бы модели  $\rho_1 = 5.0$  Ом·м,  $\rho_2 = 100.0$  Ом·м. Влияние нижнего полупространства проявляется в изменении изолиний в зависимости от отношения  $\rho_2/\rho_1$ . Вероятно, в этом случае при инверсии будет подбираться эквивалентная двухслойная модель с высоким УЭС нижнего полупространства, но изменение изолиний по мере уменьшения значения  $\rho_2/\rho_1$ , скорее всего, приведет к необходимости введения прослоя, если профиль включает точки скважины, расположенные как далеко от границы, так и близко к ней.

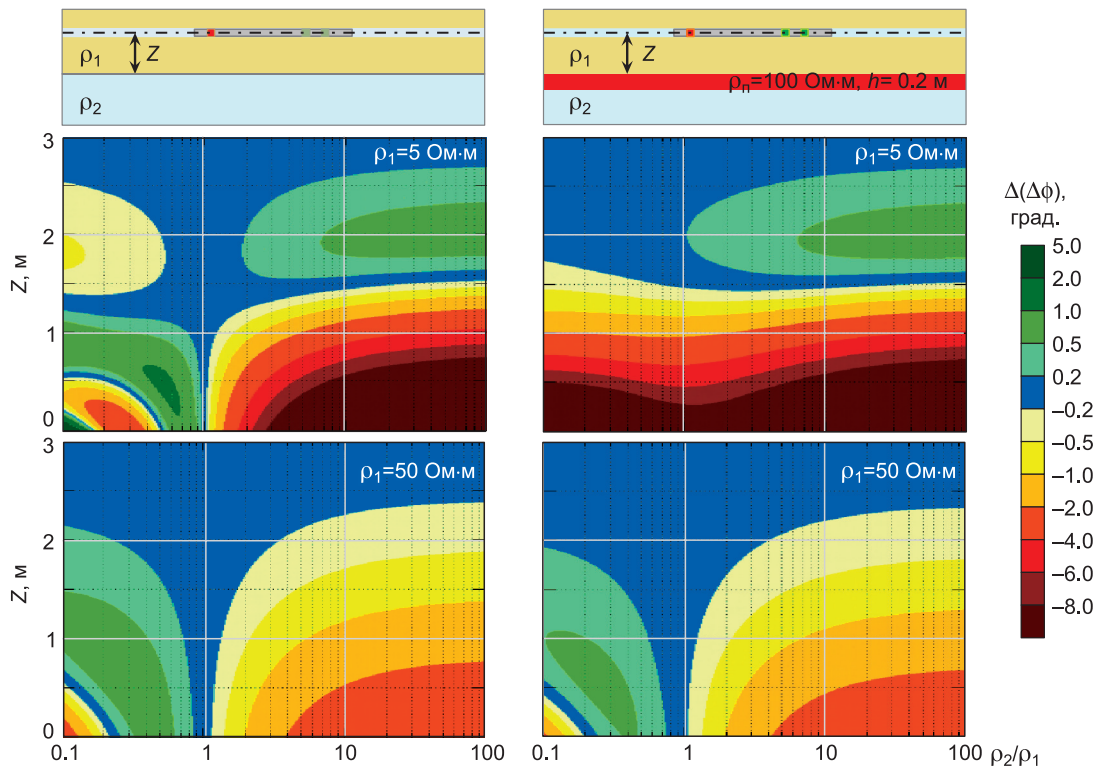


Рис. 1. Приращение разности фаз (зонд DF20) в двухслойной среде в зависимости от расстояния до границы  $Z$  и контраста сопротивлений  $\rho_2/\rho_1$ .

Вверху — геоэлектрические модели.

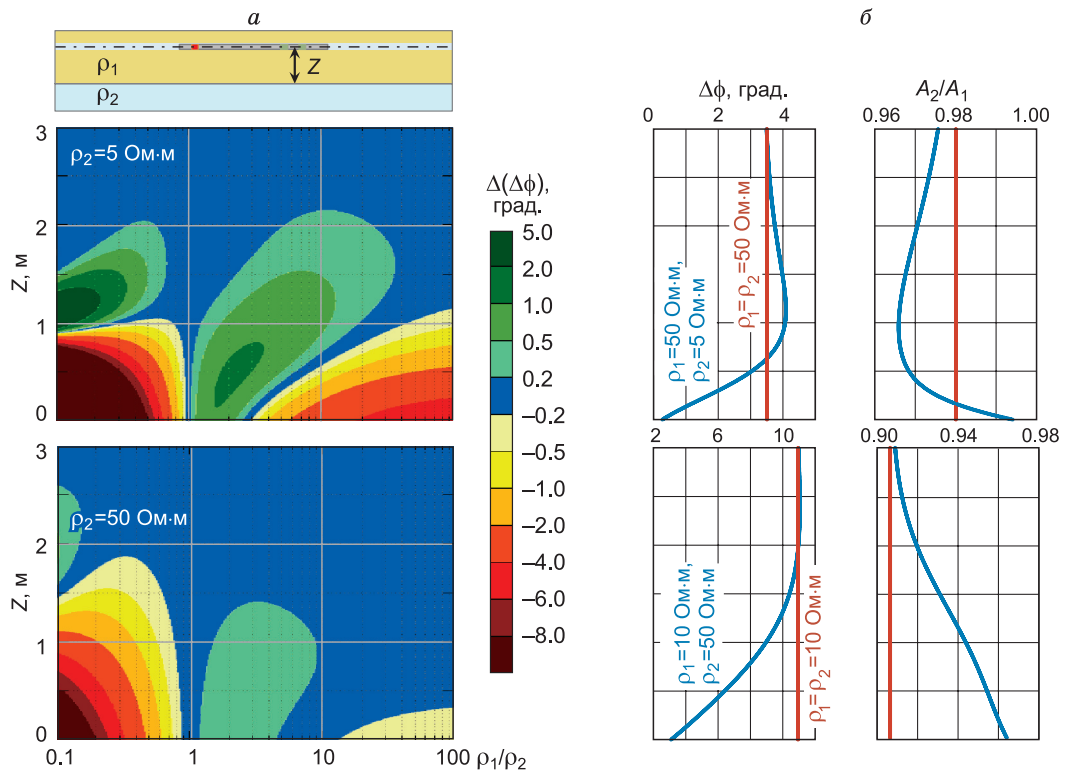


Рис. 2. *a* — приращение разности фаз (зонд DF20) в двухслойной среде в зависимости от расстояния до границы  $Z$  и контраста сопротивлений  $\rho_2/\rho_1$  при  $\rho_2 = 5.0$  и  $50$  Ом·м, *б* — разность фаз и отношение амплитуд в зависимости от расстояния до границы  $Z$  в сравнении с их значениями в однородном пространстве.

При  $\rho_1 = 50$  Ом·м сигналы в модели с тонким изолирующим пропластком оказываются очень похожими на сигналы в модели без него. В области  $\rho_2/\rho_1 > 1$  наличие пропластка приводит к небольшому уменьшению изменения разности фаз и, таким образом, к небольшому уменьшению расстояния от изолиний до границы. В этой области значение  $Z$  для изолиний  $\Delta(\Delta\phi)$  уменьшается примерно на 0.05—0.10 м по сравнению с двухслойной моделью. В области  $\rho_2/\rho_1 < 1$  значения  $\Delta(\Delta\phi)$  уменьшаются сильнее, и область превышения  $0.5^\circ$  становится меньше:  $Z \approx 1.0$  м даже для  $0.1 < \rho_2/\rho_1 < 0.2$  и быстро снижается до 0.0 м к  $\rho_2/\rho_1 = 0.5$ .

Рассмотрим теперь приращение разности фаз (относительно значения в однородной среде с сопротивлением  $\rho_1$ ) в зависимости от УЭС  $\rho_1$  пласта, в котором находится скважина (рис. 2, а), при фиксированном значении сопротивления подстилающего полупространства.

При  $\rho_2 = 5$  Ом·м максимальное расстояние, на котором разность фаз увеличивается более чем на  $0.5^\circ$ , составляет от 1.5 до 1.7 м в области значений  $\rho_1/\rho_2 < 0.5$  и от 1.0 до 1.5 м в области  $1.2 < \rho_1/\rho_2 < 10.5$ . При дальнейшем приближении к границе в интервалах  $\rho_1/\rho_2 < 0.5$  и  $3.0 < \rho_1/\rho_2 < 10.5$  приращение меняет знак, достигая больших величин при дальнейшем приближении к границе. Такое поведение разности фаз показано на графике справа. В области  $0.5 < \rho_1/\rho_2 < 3.0$  достаточное изменение сигнала будет одного знака и на расстоянии до границы около 1 м (за исключением области малоконтрастных моделей  $0.9 < \rho_1/\rho_2 < 1.1$ ).

При  $\rho_2 = 50$  Ом·м подстилающий пласт существенно влияет на сигнал только если  $\rho_1/\rho_2 < 0.7$ . Это влияние становится заметным на расстоянии до границы 1.0—1.5 м при  $\rho_1/\rho_2 < 0.6$ . При значениях  $\rho_1/\rho_2 > 0.75$  сигнал определяется верхним полупространством.

В рассмотренных случаях скважина находится в верхнем полупространстве с УЭС  $\rho_1$  и исследуется влияние нижнего полупространства с УЭС  $\rho_2$ . Однако эти модели эквивалентны моделям со скважиной, расположенной в нижнем полупространстве, если его УЭС равно  $\rho_1$ , а УЭС верхнего полупространства —  $\rho_2$  (при практически горизонтальном положении зонда асимметрия его строения не влияет на сигнал, в отличие от вертикального положения). Поэтому полученные результаты применимы для определения расстояния как до подошвы пласта, так и до его кровли.

Отметим, что разные измеряемые характеристики ЭДС — разность фаз и отношение амплитуд  $A_2/A_1$  (см. рис. 2, б) — по-разному зависят от расстояния  $Z$ . Отношение амплитуд начинает изменяться дальше от границы, чем разность фаз, и его приращение переходит через ноль при разных значениях  $Z$ . Следовательно, использование обеих характеристик может повысить надежность оценки приближения границы.

Кроме этого, расстояние до границы, на котором наблюдаются изменения сигналов, пропорционально длине зонда. Поэтому на участке профиля с нулевым приращением сигнала основного зонда приращение сигнала зонда другой длины отличны от нуля. Это означает, что в области влияния границы сигналы этих зондов не будут равны между собой, как вдали от границы. Сигналы другого длинного зонда DF14 (длина 1.4 м, частота 1.75 МГц) также практически не зависят от параметров скважины и зоны проникновения. Использование данных зондов разных длин позволяет включить в инверсию участок профиля с нулевым приращением сигнала основного зонда и тем самым повысить надежность результата инверсии.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ДАННЫМ, ИЗМЕРЕННЫМ В СКВАЖИНЕ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЗАВЕРШЕНИЕМ

Возможности численной интерпретации данных ВЭМКЗ рассмотрены на примерах практических данных, измеренных в скважинах с горизонтальным завершением, вскрывших терригенные коллекторы на территории нефтяных месторождений Западной Сибири.

**Тонкослойный песчано-карбонатный разрез с высоким контрастом УЭС, наклонная скважина.** Одна из наиболее сложных задач геофизических исследований горизонтальных стволов — интерпретация диаграмм ВЭМКЗ в интервалах пересечения контрастных по УЭС пластов небольшой мощности. В примере на рис. 3 скважина вскрывает кровлю коллектора ЮС<sub>2</sub> и проходит в верхней его части. Приведенные диаграммы отражают практические данные в зависимости от расстояния по скважине: разности фаз ВЭМКЗ, кажущегося сопротивления  $\rho_k$  по боковому каротажу (БК) и боковому каротажному зондированию (БКЗ), нейтронного каротажа (НК), гамма-каротажа (ГК), глубины точек измерения и зенитного угла. УЭС бурового раствора в момент измерений составляло 0.04 Ом·м. На рис. 3, б приведены значения разности фаз, измеренные и сглаженные для исключения влияния периодической помехи, обусловленной спиральной нарезкой на стенке скважины.

Кровля пласта пересекается в точке 13 м по скважине. Коллектор перекрыт мощной, достаточно однородной покрывкой. УЭС покрывки, определенное на расстоянии 2 м над ее подошвой, составляет около 16 Ом·м.

В интервале 0.7—18 м наблюдается монотонное уменьшение значений разности фаз ВЭМКЗ и увеличение значений  $\rho_k$  по БКЗ и БК. Такое изменение данных электрометрии связано не с изменением свойств пород, а с тем, что скважина пересекает границу контрастных по УЭС пластов под острым углом. Признаком подхода к кровле коллектора служит то, что данные длинных зондов начинают уменьшаться на большем расстоянии от границы, чем коротких: значения разности фаз зонда длиной 2 м уменьшаются, начиная с отметки 0.2 м, а значения зонда длиной 0.5 м — с отметки 13.5 м. В интервале 17—18 м пересекается уплотненный пропласток, что видно по увеличению данных НК и  $\rho_k$  по БК и БКЗ, уменьшению гамма-активности и разности фаз длинных зондов ВЭМКЗ (до  $1.0^\circ$ ).

В интервале 18—50 м наблюдаются поочередные уменьшения и увеличения значений разности фаз ВЭМКЗ, что соответствует чередованию пластов с высокими и низкими УЭС. При этом средний уровень разностей фаз длинных зондов очень низкий, до единиц градусов, местами отрицательный, что типично для измерений в интервалах пород с очень высоким сопротивлением (сотни—тысячи Ом·м). Значение  $\rho_k$  по методам постоянного тока достигает сотен Ом·м, и на диаграммах нет явных экстремумов, как при пересечении высокоомных прослоев в вертикальных скважинах. Это объясняется тем, что при пересечении сильнонаклонной скважиной горизонтального тонкого изолирующего пласта электрический ток обтекает его по породам с низким УЭС и проводящей скважине. По этой же причине в наклонных скважинах не наблюдается характерных для вертикального пересечения экстремумов на границах.

В интервале 40—50 м наблюдается уменьшение разности фаз по данным ВЭМКЗ, некоторое уменьшение, а затем резкое увеличение значений  $\rho_k$  по БК и резкое увеличение уровня показаний по НК. Это говорит о присутствии в этом интервале плотного непроводящего пропластка с высоким УЭС. Ниже залегает мощный однородный по составу пласт с высоким УЭС.

Для определения УЭС пластов была применена процедура инверсии данных ВЭМКЗ, учитывающая зенитный угол, в результате чего была построена геоэлектрическая модель. При таких низких ( $1—2^\circ$ ) значениях разности фаз традиционно определяемая относительная погрешность измерения становится слишком высока, поэтому считается, что определить значения УЭС пород с приемлемой точностью невозможно. Тем не менее на основе анализа изменения разности фаз в области границ можно оценить значения УЭС пород вдоль скважины даже при их низкой проводимости. Небольшая абсолютная погрешность измерения ( $0.2—0.3^\circ$ ), удлинение интервала пересечения границ пластов (следовательно, большое число точек измерения), разная частота и длина зондов, на разном расстоянии «чувствующих» приближение к границе, обеспечивают возможность определения на основе численной инверсии положения границ пластов и значения их УЭС.

На рис. 3, б представлен результат инверсии данных зонда ВЭМКЗ длиной 1.4 м. Желтым цветом показаны измеренные значения разности фаз, синим — эти же данные, сглаженные методом Гаусса для ширины окна 3 м, красным — рассчитанные для полученной в результате подбора модели. Зеленым цветом показаны значения УЭС пластов, полученные в результате инверсии.

Подбор модели выполняется поэтапно. Исследуемый тонкослоистый интервал разбивается на участки, на каждом из которых скважина пересекает не более 2—3 границ контрастных по УЭС пластов. Участки выбирают таким образом, чтобы в каждом из них скважина, предположительно, пересекала высокоомный пропласток (на участке есть минимум разности фаз). Таким образом, интервал скважины 0—60 м был разбит на пять участков: 0—24, 24—33, 33—41, 41—52 и 52—60 м.

Подбор начинается с первого участка, в его верхней части залегает мощный однородный пласт с УЭС 16 Ом·м. Плавное постепенное уменьшение разности фаз, которое начинается с отметки по скважине 06.5 м и заканчивается на 18.0 м, говорит о том, что скважина приближается под острым углом к кровле пласта с высоким УЭС. Разность фаз достигает своего минимума на отметке 18.5 м, следовательно, мощность пласта с высоким УЭС не превышает 0.2 м. С отметки 18.5 м разность фаз возрастает, что свидетельствует о том, что ниже находится зона повышенной проводимости. По результатам инверсии на рассмотренном участке располагается пласт-изолятор мощностью 0.2 м, под которым залегает проводящий пропласток, а вмещающие породы представлены пластами с УЭС 16 и 10 Ом·м.

В процессе решения обратной задачи к исследованному участку добавляется следующий за ним, а модель увеличивается на необходимое число пластов. Параметры пластов изученного участка фиксируются. Они изменяются только в том случае, если без этого плохо совпадают сглаженные измеренные данные и рассчитанные в постинверсионной модели соседнего участка. После того, как это совпадение достигнуто, добавляют следующий участок и процесс повторяется. Общая по интервалу относительная невязка между рассчитанными и измеренными данными составляет 2.4.

Такая схема работы определяется небольшой мощностью пластов в исследуемом интервале, не превышающей 0.8 м. В подобных тонкослоистых разрезах подбор для каждого участка по отдельности не проводится, так как необходимо учитывать влияние УЭС всех пластов из соседних участков. В случае, когда максимальная мощность пластов в интервале превышает 1.5 м, участки могут подвергаться инверсии без учета соседних.

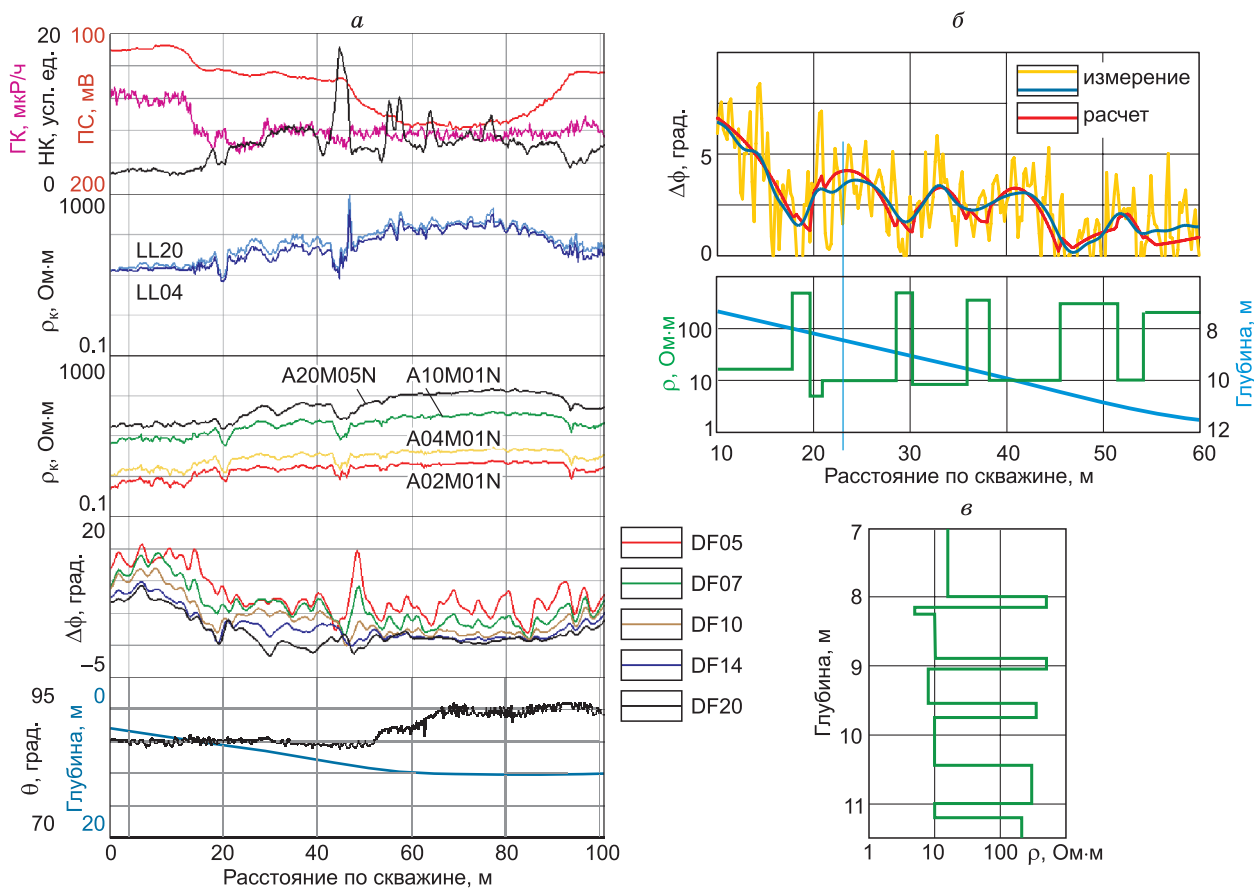


Рис. 3.

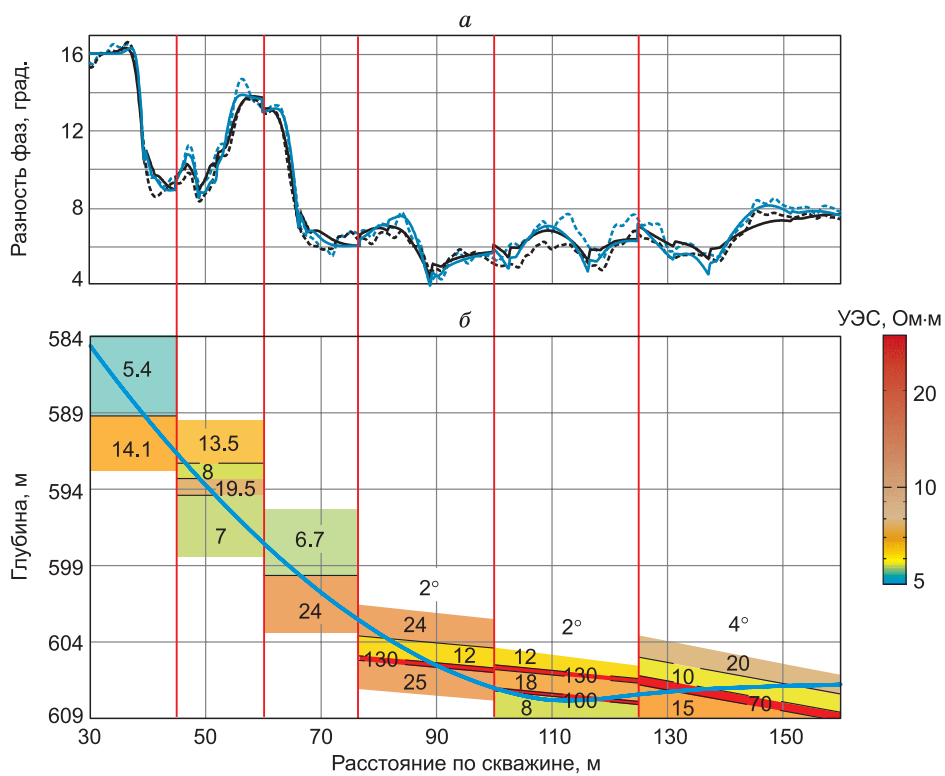


Рис. 4.

### Рис. 3. Практические данные на интервале пласта ЮС<sub>2</sub> и результаты инверсии:

*a* — сверху вниз: ГК, НКТ, ПС; БК; БКЗ; ВЭМКЗ; зенитный угол  $\theta$  и относительная глубина точек измерения  $Z$ ; *b* — диаграммы измеренного, сглаженного и рассчитанного в постинверсионной модели сигнала; подобранные УЭС пластов; *в* — подобранные УЭС пластов в зависимости от глубины. Зонды электрометрии: LL20, LL04 — зонды бокового каротажа длиной 2.0 и 0.4 м соответственно; А02М01N-А20М05N — градиент-зонды, где между А и М указано расстояние между токовым электродом и ближним измерительным, а между М и N — расстояние между измерительными электродами (дм); DF05—DF20 — зонды ВЭМКЗ длиной 0.5—2.0 м.

### Рис. 4. Результаты решения обратной задачи для сигналов ВЭМКЗ в терригенном разрезе.

Сопоставление измеренных и рассчитанных разностей фаз для зондов длиной 1.4 и 2.0 м (*a*). Траектория скважины и геоэлектрические модели — значения УЭС и угол падения границ (*b*).

По результатам инверсии в исследуемом интервале разрез представлен сверху вниз мощным аргиллитовым пластом с УЭС 16 Ом·м, о чем свидетельствуют высокие значения ГК в интервале. Под ним залегают песчано-глинистые нефтеводонасыщенные породы с УЭС около 10 Ом·м. Эти породы вмещают три тонких (0.1—0.2 м толщиной) карбонатных пласта-изолятора с УЭС 300—600 Ом·м. Толщина этих прослоев недостаточна для того, чтобы при сильнонаклонном пересечении каждый из прослоев отдельно проявлялся в показаниях радиоактивного каротажа, их влияние приводит к повышению среднего уровня НК в интервале 20—40 м по скважине. В интервале 45—60 м УЭС пластов карбонатизированного песчаника снижается до 200—400 Ом·м при мощности более 0.5 м, что достаточно для проявления этих пластов в сигнале НК; карбонатные пласты разделены небольшим пропластком с УЭС 10 Ом·м. Если, согласно привычной методике, проводить оценку коллекторских свойств по значению кажущегося сопротивления, то УЭС песчаных прослоев будет взято около 50—100 Ом·м и выше, что соответствует насыщению только нефтью. Но инверсия с учетом наклона скважины показывает, что такой высокий уровень определяется влиянием карбонатизированных прослоев, а истинное значение УЭС флюидонасыщенных участков составляет около 10 Ом·м и соответствует смешанному насыщению.

**Песчаный коллектор с тонкими карбонатными прослоями в подошвенной части, скважина с горизонтальным завершением.** Скважина с горизонтальным завершением может пересекать одну и ту же геоэлектрическую границу несколько раз в силу криволинейности траектории и неровности слоев горных пород, при этом УЭС пластов может изменяться в латеральном направлении. В разрезе могут присутствовать локальные неоднородности (глинистые или карбонатные линзы, разломы). Поэтому для описания среды вместо единой для всей скважины горизонтально-слоистой модели целесообразно вводить набор геоэлектрических моделей, каждая из которых описывает определенный участок разреза по ходу скважины. На основе сопоставления этих моделей определяется положение геоэлектрических границ и распределение УЭС пластов.

В рассматриваемом примере (рис. 4) вскрывается пачка терригенных пластов БС<sub>18—20</sub>. Зенитный угол в этом интервале изменяется от 58.0 до 92.5°. По данным электромагнитного каротажа, верхняя часть разреза представлена преимущественно породами с низкими (не более 15 Ом·м) значениями УЭС, при этом по данным ГК отмечается высокая глинистость пород. Исключение представляет лишь пласт в интервале вдоль скважины 40—50 м, в котором значения ГК соответствуют песчаным породам. На отметке 66 м скважина вскрывает коллектор с более высоким, чем в верхней части разреза, значением УЭС. Из анализа данных ВЭМКЗ, ГК и НК следует, что этот пласт неоднороден по составу: в его нижней части значение кажущегося сопротивления, по данным ВЭМКЗ, более высокое, однако, по данным ГК, в этом пласте с глубиной увеличивается глинистость, что обычно приводит к понижению значений УЭС пласта. Данные НК указывают на наличие плотных, предположительно карбонатных, пропластков с высоким УЭС.

Интерпретация данных ВЭМКЗ двух длинных зондов выполняется в несколько этапов. Сначала исследуемый интервал делится на участки таким образом, чтобы в каждом из них скважина пересекала не более двух границ пластов. Оптимально, когда края каждого окна располагаются в средней части мощного пласта. Затем в каждом окне строится стартовая горизонтально-слоистая геоэлектрическая модель, на основе которой выполняется инверсия данных. Если измеренные и рассчитанные после инверсии значения разности фаз не совпадают, стартовая модель уточняется с коррекцией числа пластов, после чего повторяется инверсия. При этом задача инверсии состоит не только в том, чтобы найти решение с наименьшей невязкой, но и наиболее точно подобрать изменение сигналов в участках пересечения границ. Это обусловлено тем, что наклон кривой в таких местах определяется одновременно и углом пересечения скважиной границы пластов, и значениями их УЭС.



Результат решения обратной задачи, полученный таким способом, приведен на рис. 4. В его верхней части (см. рис. 4, а) сравниваются разности фаз зондов DF14 и DF20, измеренные и рассчитанные в полученных в результате инверсии моделях для всех участков. В нижней части (см. рис. 4, б) показана относительная глубина точек скважины, границы и УЭС пластов. Скважина разделена на участки, для каждого из которых найдена своя геоэлектрическая модель. Границы окон показаны красными вертикальными линиями. Общая невязка измеренных и рассчитанных данных по всему исследуемому интервалу составляет 2.5.

На участке 30—45 м разрез описывается двухслойной моделью. Здесь скважина пересекает подошву глинистой покрывки с УЭС 5.4 Ом·м и попадает в глинистый песчаник с УЭС 14.1—13.5 Ом·м. Ниже расположен мощный глинистый прослой с УЭС 7—8 Ом·м, в верхней части которого встречается уплотненный участок с УЭС 19.5 Ом·м (участок 45—60 м). На участке 60—75 м под глинистым пластом вскрывается нефтенасыщенный песчаный коллектор, УЭС которого равно 24 Ом·м. С отметки 080 м повышается глинистость песчаника, что приводит к понижению УЭС (12 Ом·м). Ниже залегает тонкий карбонатный пропласток (УЭС 130 Ом·м), под которым находится еще один слой песчаника (УЭС 18—25 Ом·м). В интервале 100—125 м скважина пересекает еще один карбонатный пропласток (УЭС около 100 Ом·м), спускается в подстилающий глинистый пласт (УЭС 8 Ом·м), и поднимаясь возвращается в песчаник. При дальнейшем движении вверх скважина проходит через верхний карбонатный пропласток, частично глинизированный песчаник и оказывается в высокоомном песчанике, пересеченном на участке 60—75 м. Значению УЭС, равному 24 Ом·м, в этом коллекторе соответствует нефтенасыщение 65—70 %.

Наилучшее совпадение синтетических и измеренных данных при инверсии достигается при подборе зенитного угла. Максимальный кажущийся угол падения в исследуемом разрезе достигает 4°. В полученных моделях наблюдается понижение УЭС песчаников в сторону падения пластов, что может быть вызвано повышением водонасыщенности с увеличением глубины. Высокая степень совпадения измеренных и синтетических диаграмм, а также то, что приведенная геологическая трактовка хорошо согласуется с данными радиоактивных методов, говорит в пользу корректности построенной модели разреза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного моделирования установлено, что в горизонтальных скважинах выше- и нижележащие отложения оказывают значительное влияние на показания зондов ВЭМКЗ, находящихся на сравнимом с длиной зонда расстоянии от границы с ними. Это влияние тем больше, чем выше контраст значений УЭС пластов. При низком контрасте показания прибора изменяются слишком слабо, чтобы обнаружить границу пластов. Предельное расстояние, на котором можно обнаружить наличие границы пластов, также зависит от УЭС пласта, в котором находится скважина.

Пропластки с высоким УЭС обладают экранирующим эффектом. Когда скважина проходит параллельно такому пропластку, разность фаз слабо зависит от УЭС пород, которые расположены под ним.

При инверсии данных электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах особое внимание должно быть направлено на подбор сигналов в местах пересечения границ пластов или подхода к ним на близкое расстояние. На участке перехода границы сигналы сильно зависят от значений УЭС граничащих пластов и угла между зондом и границей.

Применение алгоритмов решения обратной задачи для данных ВЭМКЗ в наклонной скважине позволяет восстанавливать параметры геоэлектрической модели отложений. Разделение скважины на участки для инверсии и поиск геоэлектрических моделей для каждого из них позволяет выявить латеральные изменения удельного электрического сопротивления пластов и угла наклона их границ.

## ЛИТЕРАТУРА

**Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И.** Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в пластах конечной мощности, вскрытых на биополимерных и нефтяных буровых растворах // Геология и геофизика, 2013а, т. 54 (11), с. 1803—1813.

**Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И.** Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика, 2013б, т. 54 (12), с. 1942—1951.

**Горбатенко А.А., Сухорукова К.В.** Особенности сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах // Каротажник, 2014, № 11 (245), с. 42—55.

**Горбатенко А.А., Вологдин Ф.В., Сухорукова К.В.** Моделирование влияния неровностей стенки скважины и эксцентриситета каротажного зонда на показания высокочастотного электромагнитного ка-

ротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором // Каротажник, 2013, № 2 (224), с. 54—64.

**Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Эпов М.И.** Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбуриваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 978—990.

**От количества к качеству.** Редакционная статья // Нефтесервис, 2014, № 3 (27), с. 14—21. <http://www.indpg.ru/nefteservis/2014/03/80738.html>.

**Суродина И.В., Эпов М.И.** Влияние биополимерных буровых растворов на диаграммы высокочастотного электромагнитного каротажа // Геология и геофизика, 2012, т. 54 (8), с. 1062—1069.

**Табаровский Л.А.** Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск, Наука, 1975, 144 с.

**Технология** исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ: методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ СО РАН, 2000, 121 с.

**Эпов М.И.** Электромагнитное поле горизонтального магнитного диполя в горизонтально-слоистой анизотропной среде с двумя плоскими границами // Электромагнитные методы исследования скважин. Новосибирск, Наука, 1979, с. 129—141 (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 442).

**Эпов М.И., Шурина Э.П., Нечаев О.В.** Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (9), с. 989—995.

**Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В.** Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник, 2014а, № 11 (245), с. 29—42.

**Эпов М.И., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Горбатенко А.А., Павлова М.А.** Сигналы электромагнитного каротажа в процессе бурения и их численная инверсия // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2014б, № 3 (19), с. 49—55.

**Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н.** Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (8), с. 1520—1529.

**Cheryauka A.B.** High-frequency electromagnetic soundings for boreholes with horizontal completion / Eds. A.B. Cheryauka, M.I. Epov, M.N. Nikitenko // 58th EAGE Conf. and Techn. Exhib., Amsterdam, 3—7 June, 1996: Extend. Abstr. Book. v. 1, Zeist, 1996, p. P170.

**Labutin I.B., Surodina I.V.** Algorithm for sparse approximate inverse preconditioners in the conjugate gradient method. 15th GAMM-IMACS International symposium on scientific computing, computer arithmetic and verified numerical computations // Reliable Computing, 2013, p. 120—126 (abstract).

**Nikitenko M.N., Epov M.I., Glinskikh V.N., Suhorukova K.V., Eremin V.N.** Development of LWD high-frequency resistivity tool. EAGE 6th Saint Petersburg International conference & exhibition «Geosciences — Investing in the Future», Extended abstract, ThD05. 2014.

*Рекомендована к печати 24 сентября 2015 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
4 июня 2015 г.*