но, сформировалась в ранний период океанического раскрытия (в конце средней — начале поздней юры) и наращивалась на юг в ходе дивергенции африканской и антарктической плит до середины нижнего мела.

Расхождение Восточной и Западной Гондваны (Южная Америка-Африка) и Восточной (Антарктида-о. Мадагаскар, Индия-Австралия-Новая Зеландия) происходило до раннемелового времени (около 135–130 млн. лет назад), когда в результате реорганизации движения литосферных плит в Южном океане возникло тройное сочленение, связанное с раскрытием южной Атлантики и образованием Антарктической, Африканской и Южно-американской плит (рис. 4, правая врезка).

Формирование океанической коры в условиях продолжавшегося апвеллинга горячей мантии (действия плюма Кару) сопровождалось более активным вулканизмом в пределах СОХ и внутриплитным магматизмом, следствием которого явилось образование океанических поднятий: плато Анденес и банки Поларштерн в море Уэдделла, поднятия Мод в море Лазарева, северной части хребта Астрид в море Рисер-Ларсена, а также Мозамбикского хребта и плато Агульяс вблизи юго-восточной Африки. Поднятие Мод, имеющее преимущественную СВ-ЮЗ ориентировку образовалось так же, как и северная часть хребта Астрид [9] при растяжении океанической коры в трансформном разломе (транстенсионный режим) под влиянием продолжавшего действовать мантийного плюма Кару.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Barker P., Kennett J.* Proceedings of the Ocean Drilling Program Initial Reports. 113. Ocean Drilling Program. — College Station, Texas, 1988. — 774 P.

2. Duncan R.A., Hooper P.R., Rehacek J., etc. The Timing and Duration of the Karoo Igneous Event, Southern Gondwana // Journal of Geophysical Research, 1997. — Vol. 102. — PP. 18127–18138.

3. *Geoffroy L*. Volcanic passive margins. C.R. // Geoscience, 2005. — Vol. 337. — PP. 1395–1408.

4. *Grikurov G., Leytchenkov G.L.* Tectonic Map of Antarctica. Commission for Geological Map of the World, Paris, 2012.

5. *Hinz K., Krause W.* The continental margin of Queen Maud Land / Antarctica: Seismic sequences, structural elements and geological development. Geologisches Jahrbuch E23, 1982. — PP. 17–41.

6. *Hinz K., Neben S., Guseva Yu.B., Kudryavtsev G.A.* A compilation of geophysical data from the Lazarev Sea and the Riser-Larsen Sea, Antarctica, 2005 // Marine Geophysical Research 25, PP. 233–245.

7. *Jokat W., Boebel T., Konig M., Meyer U.* Timing and geometry of early Gondwana breakup // Journal of Geophysical Research, 2003. — Vol. 108 (B9). — doi: 10.1029/2002JB001802.

8. *Leytchenkov G.L., Miller H., Zatzepin E.* Structure and Mesozoic evolution of the Eastern Weddell Sea, Antarctica: History of early Gondwana Break-up. Weddell Sea Tectonics and Gondwana break-up. 1996. In: Storey B.C., King E.C., Livermore R.A. (eds.). / Geological Society, Special Publication, London. — Vol. 108. — PP. 175–190.

9. *Leytchenkov G., Guseva J., Gandyukhin V., etc.* Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies. // Marine Geophysical Reseach, 2008. — Vol. 29. — PP. 135–158.

10. *Planke S., Symonds P., Alvestad E., Skogseid J.* Seismic volcanostratigraphy of large basaltic extrusive complexes on rifted margins. // Journal of Geophysical Reseach, 2000. — Vol. 105. — PP. 19355–19351.

11. Sandwell D.T. & Smith W. H. F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. // Journal of Geophysical Research, 2009. — Vol. 114. — B01411, doi:10.1029/2008JB006008.

© Лейченков Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., 2016

Лейченков Герман Леонидович // german_l@mail.ru Гусева Юлия Борисовна // antarctida@polarex.spb.ru Гандюхин Виктор Всеволодович // antarctida@polarex.spb.ru Великин А.Б., Великин А.А. (ФГУНПП «Геологоразведка»)

НОВЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛА-МИ СТЕМ

Представлены новый корреляционный метод импульсной электроразведки со специальными шумоподобными сигналами (ШПС), а также экспериментальный образец программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1 с повышенной глубинностью и разрешающей способностью для поисков углеводородного сырья, опробованные в полевых условиях в Калужской области, Красноярском крае и Иркутской области в 2012–2014 гг. Рассмотрены результаты физического и математического моделирования. Сформулированы основные геологические результаты, полученные при опробовании комплекса СТЕМ-1 в Иркутской области. Ключевые слова: импульсная электроразведка, шумоподобные сигналы, псевдослучайная бинарная последовательность (ПСБП).

Velikin A.B., Velikin A.A. (Geologorazvedka) A NEW CORRELATION TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD WITH NOISE-TYPE SIGNALS CTEM

A new correlation transient electromagnetic method with special noise-like signals and a prototype system CTEM-1 for more resolution and depth penetration in oil and gas prospecting are presented after field testing in Kaluga, Krasnoyarsk and Irkutsk regions. The physical and mathematical modeling results are reviewed and the main geological results of the testing in Irkutsk region are indicated. **Key words:** transient electromagnetic, noise-type signals, pseudo random binary sequence (PRBS).

За последние десятилетия индукционная импульсная электроразведка прочно вошла в комплекс региональных исследований при поисках нефти и газа для изучения геоэлектрического строения осадочного чехла, выделения зон коллекторов с высокоминерализованными водами, а также поиска и картирования водонефтяного контакта в зонах развития проводящих коллекторов. Кроме того, она давно и успешно применяется для поисков рудных месторождений, а также подземных вод [9].

Основной проблемой метода является его низкая устойчивость к широкополосному шуму, которая ограничивает глубинность исследований. Современные технологии измерения ЭМ полей позволяют существенно подавлять помехи, сосредоточенные в узких промежутках времени (импульсные помехи) или в узкой полосе частот (промышленные помехи) или в узкой полосе частот (промышленные помехи на частоте 50 Гц и ее гармоники). Широкополосный или «белый» шум можно уменьшить только путем накопления сигнала или увеличения мощности источника ЭМ поля, что связано с многократными затратами времени и энергии.

Низкая помехоустойчивость импульсной электроразведки является следствием присущего ей технического противоречия между точностью измерения сигнала и шириной полосы частот пропускания. Действительно, процесс измерения переходной характеристики электрического разреза заключается в определении средних значений сигнала на заданных интервалах времени. Чем меньше временной интервал, тем точнее среднее значение соответствует значению сигнала в центре интервала, но и тем шире полоса частот пропускания и выше уровень помех, ухудшающих точность измерений.

Для преодоления этого противоречия в новом методе СТЕМ определяется максимизирующая отношение сигнал/шум взаимная корреляционная функция псевдослучайных (шумоподобных) возбуждающих и принимаемых электромагнитное поле сигналов [2]. Эта функция пропорциональна импульсной характеристике геоэлектрического разреза в частотном окне. СТЕМ — принятое нами обозначение корреляционного метода импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами (ШПС) наряду с широко распространенным ТЕМ, получившим это наименование после экспорта однопетлевого варианта метода переходных процессов МПП и российской аппаратуры МППО-1 в Австралию в конце 1960-х и начале 1970-х годов [4,8].

Шумоподобные псевдослучайные сигналы успешно применяются в системах радиолокации, гидролокации, радиосвязи и передачи информации [1]. Попытки использования этих сигналов применительно к электроразведке предпринимались с начала 1970-х годов, но первые значимые результаты применения псевдослучайных бинарных последовательностей тока в геоэлектроразведке были опубликованы только в 1980 г. С помощью этих последовательностей было произведено глубокое электромагнитное зондирование в Канаде [7]. Конечным результатом полевых наблюдений были частотные характеристики геоэлектрического разреза.

В 2008 г. были продемонстрированы результаты успешного использования псевдослучайных бинарных последовательностей тока при поисках нефтяных месторождений в море [10]. Импульсные характеристики геоэлектрического разреза были получены путем обратной свертки непосредственно измеренных псевдослучайных напряжений и тока без корреляционной обработки, которая обеспечивает повышение отношения сигнал/шум. Поэтому обратная свертка производилась только после накопления сигнала, достаточного для получения отношения сигнал/шум не менее 30.

В 2010—2011 г. проводились численные исследования по применению шумоподобных сигналов в электромагнитных зондированиях с использованием алгоритма их обработки без корреляционной фильтрации [6]. Полученное при этом увеличение отношения сигнал/шум, как указано в этой работе, существенно меньше того, что можно получить при корреляционной обработке.

В 2011—2013 гг. проведены математические исследования шумоподавления при возбуждении и корреляционной обработке шумоподобных сигналов и начальный полевой эксперимент измерения и корреляционной обработки этих сигналов с малой генераторной петлей 50×50 м на временах до 10 мс [5] без выделения полезного сигнала, непосредственно характеризующего геоэлектрический разрез. Авторы понизили уровень корреляционных шумов путем отбрасывания первой и последней реализаций периодически повторяемых взаимно-корреляционных функций псевдослучайных сигналов.

В настоящей работе представлены метод СТЕМ и экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1 для поисков углеводородного сырья (результат НИР по базовому проекту Роснедр в 2009—2011 гг.) после опробования в полевых условиях на полигоне МГУ в Калужской области и на двух полигонах Восточной Сибири в 2012—2014 гг. Кроме того, рассмотрены результаты физического и математического моделирования и сформулированы основные геологические результаты, полученные при опробовании комплекса СТЕМ-1 в Иркутской области.

Физические основы метода

Комплекс СТЕМ создает в генераторной петле специальную троичную, шумоподобную псевдослучайную последовательность пакетов полусинусоидальных импульсов тока (рис. 1а). В заземленной генераторной линии можно использовать аналогичную последовательность прямоугольных импульсов тока (рис. 16).

Одновременно с возбуждением импульсов тока комплексом СТЕМ регистрируется: временной ряд значений тока *I* в генераторном контуре и соответствующий ему ряд значений напряжения *V* в приемном контуре. В качестве приемного контура могут использоваться одновитковые или многовитковые петли (рамки).

По измеренным массивам напряжения V и тока I определяется взаимная корреляционная функция $R_{V,I}$ этих массивов и линейно связанная с ней импульсная характеристика h_F геоэлектрического разреза в частотном окне:

$$h_F = R_{V,I} / K, \tag{1}$$

где К — постоянная величина.

Троичная последовательность (рис. 1а, б) образуется путем преобразования известной (библиотечной) псевдослучайной бинарной последовательности импульсов



Рис. 1. Псевдослучайные последовательности импульсов тока и их автокорреляционные функции: а — псевдослучайная последовательность пакетов полусинусоидальных периодических импульсов тока PRTS; б — псевдослучайная последовательность пакетов прямоугольных периодических импульсов тока PRTS; в — псевдослучайная последовательность импульсов тока PRBS; г — их автокорреляционная функция



тока (рис. 1в), определяемой, например, путем моделирования работы п-разрядного сдвигового регистра с обратной связью через логический элемент «исключающее или»

[7], в псевдослучайную последовательность пакетов регулярных импульсов тока. Рассматриваемая троичная псевдослучайная последовательность обеспечивает одинаковую степень искажения каждого пакета импульсов тока индуктивностью генераторного контура, а полусинусоидальная форма позволяет, используя резонансные свойства генераторного контура, уменьшить эти искажения. Все это обеспечивает минимизацию собственных шумов в импульсной характеристике. Важную роль играет форма автокорреляционной функции (АКФ) используемых последовательностей импульсов тока, которая при шаге, равном периоду импульсов тока, совпадает с треугольной б-образной формой АКФ (рис. 1г) бинарной последовательности импульсов тока (рис.1в). Основание треугольной формы численно равно удвоенной длительности пакета импульсов тока. Под длительностью пакета понимается длительность минимального набора импульсов тока одной полярности.

Рассмотрим физический смысл импульсной характеристики (1). Известно, что для системы, состоящей из генераторного и приемного контуров, напряжение Vв приемном контуре есть свертка импульсной характеристики h разреза с током I в генераторной петле:

$$V=h\otimes I,\tag{2}$$

где знак ⊗ обозначает операцию свертки.

Известно также, что взаимная корреляционная функция $R_{X,Y}$ входного X и выходного Y сигналов в линейной системе есть свертка импульсной характеристики h этой системы с автокорреляционной функцией входного сигнала $R_{X,X}$. Для индукционной электроразведки входным сигналом является ток I в генераторной петле, а выходным сигналом — напряжение V в приемной петле. Таким образом, взаимная корреляционная функция имеет вид:

$$R_{V,I} = h \otimes R_{I,I}, \tag{3}$$

Величины $R_{V,I}$, $R_{I,I}$ и *h* являются временными массивами. Сравнение уравнений (2) и (3) показывает, что для линейной системы, которой является земля, автокорреляционную функцию $R_{I,I}$ можно считать входным возбуждающим сигналом в такой же мере, как ток *I*, а взаимно-корреляционную функцию $R_{V,I}$ — выходным сигналом этой системы в такой же мере, как напряжение *V*. Поскольку $R_{I,I}$ является треугольной δ-образной функцией (рис. 1г), то для достаточно малой длительности пакета импульсов тока она будет отличаться от δ-функции Дирака только множителем *K*, равным площади треугольной формы $R_{I,I}$;

$$R_{V,I} = h \otimes K \delta. \tag{4}$$

В этом случае знак \otimes свертки в уравнении (4) можно заменить знаком умножения, поскольку свертка произвольной функции f(t) с δ -функцией по определению равна f(t). Отсюда получим отношение:

$$=R_{V,I}/K,$$
 (5)

где *h* — классическая импульсная характеристика геоэлектрического разреза.

h

Таким образом, для пренебрежимо малой длительности пакета импульсов тока импульсная характеристика геоэлектрического разреза в частотном окне h_F , определенная по формуле (1), будет соответствовать классической импульсной характеристике h. Для произвольной длительности пакета импульсов тока h_F является откликом геоэлектрического разреза на треугольный импульс тока, конгруэнтный треугольной форме $R_{I,I}$ с квазипрямоугольным спектром (частотным окном) в полосе частот от $F_1 = 1/T$ до $F_2 = 1/(2 T_p)$, где T — длина псевдослучайной последовательности:

$$T = (2^n - 1) T_p, (6)$$

а T_p — длительность пакета импульсов тока:

$$T_p = 2 (T_i + T_0) \times N_i,$$
 (7)

где T_i — длительность импульса тока, T_0 — длительность паузы, а N_i — число импульсов тока в пакете. Таким образом, определяемые методом СТЕМ величины h_F действительно можно считать импульсными характеристиками разреза в частотном окне ($F_1 - F_2$).

Электромагнитное зондирование осуществляется путем измерений и корреляционной обработки временных массивов I и V, производимых при последовательно увеличивающейся длительности пакета импульсов тока (от $N_i = 1$ до $N_i = 90$). При этом в соответствии с формулой (6) пропорционально увеличивается длина последовательности T, а спектр возбуждения сдвигается в область низких частот без уменьшения интенсивности низкочастотных составляющих. Величина n выбирается от 14 до 10 для длительностей импульсов тока 0.5 - 0.1 мс и от 8 до 5 для длительностей импульсов тока 0.5 - 7.5 мс.

Увеличение длины последовательности только за счет увеличения ее порядка *n* при неизменной длительности пакета увеличивает число гармонических компонент (в том числе и низкочастотных), но их интенсивность уменьшается обратно пропорционально *T*. Это существенно ограничивает глубинность зондирования.

Таким образом, физически можно представить описываемый процесс измерения и определения h_F в частотном окне как зондирование треугольным импульсом виртуального тока путем последовательного увеличения его длительности. При этом амплитуда треугольного импульса тока зависит от длины псевдослучайной последовательности импульсов тока. В этом случае становится понятным, что при возбуждении глубокой части разреза влияние верхней части разреза, которое искажает результаты глубокого зондирования в импульсной традиционной электроразведке ЗСБ, ослабляется из-за отсутствия в спектре АКФ R_{1.1}частот $F \ge F_2$. При этом h_F можно рассматривать как результат свертки классической импульсной характеристики h с треугольной формой $R_{I,I}$. Следует отметить, что в соответствии с формулой (2) при вычислении R_{VI} массив I играет роль согласованного фильтра, максимизирующего отношение сигнал/шум.

Фактически измеряются не один, а два ряда значений напряжения в приемном контуре V_1 (синхронного с импульсами тока) и V_2 (в паузах между импульсами тока). По измеренным массивам V_1 , V_2 и *I* определяются функции взаимной корреляции R_{V_1I} и R_{V_2I} и и линейно связанные с ними две характеристики h_{F_1} и h_{F_2} геоэлектрического разреза. Первая соответствует измерениям значений V_1 , синхронным с импульсами тока, вторая — измерениям значений V_2 в паузах между ними. В паузах измеряются сигналы только вторичного поля, что позволяет повысить точность измерений.

Метод СТЕМ реализован с помощью экспериментального образца комплекса СТЕМ-1.

Программно-аппаратный комплекс СТЕМ-1

Комплекс СТЕМ -1 содержит генератор полусинусоидальных импульсов тока 1 и измеритель напряжения 2, управляемые полевым компьютером 3, систему *GPS* с антенной 4 и коммутационное входное устройство 5, к которому подключаются генераторная и приемная петли блока питания генератора 6 и измерителя 7 (рис. 2).

Основные технические характеристики экспериментального образца СТЕМ-1

Измеряемые параметры: напряжение	
и ток ШПС в петлях, м:	$100 \times 100 - 800 \times 800$
Длительность синусоидальных	
импульсов тока, мкс:	50-10000
Амплитуда импульсов тока, А:	0.5-20
Диапазон времени регистрации	
<i>I</i> и <i>V</i> , с:	0.000005 - 20



Рис. 2. Экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1: 1 — генератор импульсов тока; 2 — измеритель; 3 — полевой компьютер; 4 — устройство синхронизации *GPS* с антенной; 5 — коммутационный блок; 6 — блок питания генератора; 7 — блок питания измерителя

Максимальное измеряемое напряжение, В:	10
Динамический диапазон измерения	
напряжения, дБ:	120
Максимальное напряжение в генераторной	
петле, В:	600
Среднеквадратическая погрешность	
определения $h_F, \%$:	не более 3

Физическое и математическое моделирование

Для объективной оценки потенциала нового метода было необходимо изучить его особенности и сравнить его эффективность с традиционным методом на физических моделях упрощенного геоэлектрического разреза, используя комплекс СТЕМ-1 и электроразведочную систему на уровне мировых образцов Цикл-7. На этих же моделях необходимо было также подтвердить численным моделированием достоверность импульсных характеристик h_F , получаемых по результатам физических измерений.

Были использованы две физические модели: М1 — модель вмещающих горных пород (рис. 3а) — графитовый цилиндр \oslash 700×400 мм с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1.18 \times 10^{-5}$ Ом·м; М4 — модель вмещающих горных пород с флюидонасыщенным хорошо проводящим слоем, ограниченным по горизонтальной оси *X* (граница хорошо проводящего флюидонасыщенного пласта и нефтяной залежи) — указанный выше графитовый цилиндр с алюминиевой пластиной 800×500×4 мм и $\rho = 5.26 \times 10^{-8}$ Ом·м на глубине 200 мм (рис. 46).

Относительно малый диаметр (700 мм) физических моделей явился причиной возникновения краевых эффектов. Поэтому были введены дополнительные математические модели М16 и М23, в которых увеличены раз-

меры блоков вмещающей среды в М1

и M4 соответственно: до Ø 10×10 м.

Масштаб моделирования 1:10000 и 1:20000. При масштабе 1:10000 использовалась измерительная установка 1 — соосные 30-витковые генераторная 80×80 мм и приемная 40×40 мм рамки. При масштабе 1:20000 использовалась измерительная установка 2 — соосные 30-витковые генераторная 40×40 мм и приемная 20×20 мм рамки. Соосные рамки располагаются над центром моделей. Модели проводящей среды для указанных масштабов одни и те же. Для установки 1 глубина до проводящего пласта в модели М4 (200 мм) соответствует реальной глубине 2000 м, для установки 2 — 4000 м.

В соответствии с условиями электромагнитного подобия при масштабе моделирования 1:10000 графитовые модели представляют горные породы с $\rho = 1180$ Ом·м, а при масштабе моделирования 1:20000 — $\rho = 4720$ Ом·м. В обоих случаях можно считать, что это непроводящие





Рис. 3. Импульсные *h_F* и переходная характеристики *H(t)* по результатам измерений и расчетов на моделях вмещающих горных пород: а — рассчитанные *h_F* и классическая импульсная характеристика *h*, модель M1 (установка 1); б — рассчитанные *h_F* для моделей M16 и M1 (установка 2); в — величины *h_F* по результатам расчетов и измерений с комплексом СТЕМ-1 и *H(t)* по результатам расчетов и измерений с системой Цикл-7, модель M1 (установка 1). Шифр кривых: *h_{F-}n_T_{i_-}N_i*, *n* — порядок последовательности; *T_i* — длительность импульса, мс; *N_i* — количество импульсов тока в пакете; *Elcut*/Мод — вычисленные по программам *Elcut*6.0/ Моделирование 8.31, изм._и/п — по измерениям, синхронным с импульсами тока/в паузах, M1/M16 — модели; *c* — смещенные *h_F*

породы. Чтобы моделировать горные породы с практически значимыми ρ, например 118 Ом·м, необходимо использовать времена моделирования соответственно в 10 и 40 раз меньше натурных.

Режимы модельных измерений с комплексом СТЕМ-1 показаны в табл. 1, где n — порядок последовательности, T_i — длительность импульса тока, N_i — количество импульсов тока в пакете, N_n (M1) — общее число накоплений для модели M1, N_n (M4) — общее число накоплений для модели M4. Режимы модельных измерений с электроразведочной системой Цикл-7 показаны в табл. 2.

Математическое моделирование производилось с помощью программы моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов «*Elcut* 6.0» [3] и собственной программы моделирования измерений ШПС и определения по ним импульсных характеристик геоэлектрического разреза в частотном окне «Моделирование 8.31».

Результаты моделирования

Для получения представления о форме кривых h_F и их связи с классической импульсной характеристикой h рассмотрим эти характеристики, рассчитанные с помощью программы «Elcut 6.0» [3], как реакцию модели М1 с установкой 1 на импульс тока треугольной формы R_{II} с единичной площадью и основанием равным 2 ($T_i + T_0$) × N_i (рис. 3а). Форма h_F для импульсов тока T_i = 50 и 100 мкс (*N_i* = 1) близка к реакции на б-импульс, т.е. к классической импульсной функции h. По мере увеличения N_i импульсные характеристики становятся все более крутыми. При этом их форма совпадает с соответствующими по времени частями классической им-

Габлица 1	
Режимы модельных измерений с комплексом СТЕМ-1	

Nº	n	<i>Т</i> _{<i>i</i>} , мс	N _i	<i>N</i> _n (M1)	<i>N</i> _n (M4)	Ток, А
1	12	0.05	1	1280	960	0.4
2	12	0.1	1	640	480	0.4
3	8	0.5	1	2048	1536	0.4
4	5	0.5	5	2048	1536	0.4
5	5	0.5	15	2048	1536	0.4
6	5	0.5	30	2048	1536	0.4
7	5	0.5	45	2048	1536	0.4
8	5	0.5	90	512	256	0.4

Таблица 2

Режимы модельных измерений с электроразведочной системой Цикл-7

Длительность импульсов тока, с	Время реги- страции, с	Число временных задержек	Число накоплений	Ток, А
0.1 c	$4 \times 10^{-7} - 0.1274$	112	12×512	0.87

пульсной функции. Это хорошо видно при вертикальном смещении вниз h_F для $N_i = 15$, 30, 45, 90 до их совмещения с классической h. В этом случае методом СТЕМ можно определять форму классической импульсной характеристики, значения которой на несколько порядков меньше реально измеряемых h_F . Таким образом, для рассматриваемой модели чувствительность к сигналам на поздних стадиях переходного процесса у нового метода на несколько порядков выше, чем у традиционного метода ЗСБ (зондирование становлением поля в ближней зоне). Существенную роль здесь играют краевые эффекты из-за относительно малого диаметра модели.

На рис. Зб к h_F на модели М1добавлены h_F на модели М16, где влияние границ модели практически отсутствует (установка 2). Здесь все асимптоты кривых h_F являются касательными к кривой h. На самых ранних стадиях они совпадают с h_F на модели М1.

На рис. Зв приведены h_F по результатам измерений с комплексом СТЕМ-1(установка 1) и математического моделирования по программам «Elcut 6.0» и «Моделирование 8.31» на модели М1. Импульсные характеристики, определенные по измерениям на фоне импульсов тока и в паузах между ними, хорошо совпадают между собой и с результатами вычислений по указанным выше программам. Динамический диапазон для полного набора h_F по данным измерений составляет 180 дБ. Максимальное время регистрации h_F равно 0.1 с. Уровень собственных шумов для *h*_F при максимальной длительности пакета и токе 0.4 A составляет 0.3 мкB/(A·c). На этом же рисунке приведены результаты измерения переходной характеристики H(t) разреза методом ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7. Максимальное время надежной регистрации H(t) - 0.01 с. Измеренные H(t) также хорошо совпадают с расчетными («*Elcut* 6.0»).

На рис. 4а показаны h_F и H(t) на модели M4 вмещающих горных пород с ограниченным по горизонтали флюидонасыщенным пластом (установка 1) по результатам вычислений и измерений с комплексом CTEM-1

и с системой Цикл-7. В обоих случаях результаты измерений и вычислений хорошо совпалают, и уверенно отмечается хорошо проводящий пласт (алюминиевая пластина) на глубине 200 мм (2000 м в натурных условиях) по затянутому спаду h_F для $N_i \ge 5$. Здесь также наблюдается краевой эффект, но он связан не только с вертикальными границами графитового цилиндра, как на модели М1, но и с границей алюминиевой пластины, на 200 мм смещенной от края графитовой модели к ее центру (рис. 2б). Время регистрации h_F для $N_i \ge 30$ существенно больше времени регистрации поздних стадий переходной характеристики. Импульсные характеристики измеряются до 100 мс, а переходная — до 30 мс. Так же, как на модели М1, по импульсным характеристикам *h_F* можно определить форму поздних стадий классической импульсной характеристики h, значения которой существенно меньше значений h_{F} .

На рис. 46 показаны рассчитанные h_F на модели М23, которая отличается от М4 тем, что вмещающая среда практически безгранична (установка 1). В этом случае задача выделения проводящего пласта становится еще проще. Сигнал от пласта складывается с увеличенным сигналом от вмещающей среды.

На рис. 4в на той же модели М4 показаны расчетные характеристики h_F и переходная характеристика H(t) с установкой (2) при внешнем шуме 1 мкВ. В этом случае хорошо проводящий пласт, ограниченный по латерали (алюминиевая пластина) на глубине 200 мм (4000 м в натурных условиях), уверенно отмечается на h_F и не чувствуется на переходной характеристике H(t). Таким образом, потенциальная глубинность метода СТЕМ при наличии даже небольшого шума может быть существенно больше, чем у традиционного метода ТЕМ (ЗСБ).

На всех моделях крутизна импульсных характеристик h_F больше, чем у переходных характеристик H(t), и, следовательно, в методе СТЕМ разрешающая способность по электропроводности и размерам проводящих объектов выше, чем в ЗСБ.

В результате исследования подавления гауссовского белого шума на входе измерителя СТЕМ в отсутствии полезного сигнала получен коэффициент подавления шума около трех порядков для последовательности с числом отсчетов, равным 409400.

Результаты полевого опробования метода СТЕМ и экспериментального образца комплекса СТЕМ-1 здесь не приводятся. Можно лишь отметить, что результаты геологической интерпретации данных опробования метода СТЕМ в полевых условиях в Иркутской области в 2014 г. и данных наблюдений методом ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7 показали неоспоримые преимущества нового метода. В частности, в сложных геоэлектрических условиях, обусловленных интенсивной тектоникой и развитием траппового комплекса, была обеспечена глубинность исследования порядка 5 км. Глубинность метода ЗСБ при прочих равных условиях оказалась в 2 раза меньше. При этом методом СТЕМ надежно расчленяется разрез надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов с отдельными свитами, кровли рифейских отложений и кристаллического фундамента, согласующиеся с данными сейсморазведки.



Выделены аномальные объекты повышенных и пониженных значений удельного электрического сопротивления, предположительно отождествляемые с областями развития траппов, с карбонатными породами повышенной общей пористости. Отдельные неоднородности повышенного удельного сопротивления в





2 • февраль • 2016

подсолевом комплексе могут быть связаны с залежами углеводородов.

Заключение

1. Новый корреляционный метод СТЕМ импульсной электроразведки и экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1, основанные на определении взаимной корреляционной функции специальных (шумоподобных) возбуждающих электромагнитное поле и принимаемых сигналов, обеспечивают получение импульсных характеристик разреза в частотных окнах при максимальном отношении сигнал/шум. Шумоподавление при корреляционной обработке достигает трех и более порядков, что позволяет работать с маломощными источниками энергии и при достаточно большой глубине исследований.

2. При зондировании благодаря ограничению частот пределами окна может быть значительно ослаблено влияние верхней части разреза.

3. Опробование комплекса СТЕМ-1 и системы Цикл-7 на физических моделях и подтверждение результатов измерений расчетами с использованием независимой программы моделирования ЭМ полей доказывают достоверность получаемых импульсных характеристик *h_F* и позволяют сделать следующие выводы:

по импульсным характеристикам в частотном окне (для моделей массивов проводящих горных пород, ограниченных по латерали) можно определять форму классической импульсной характеристики разреза, значения которой на несколько порядков меньше реально измеряемых $h_{F_{2}}$

крутизна импульсных характеристик h_F значительно больше, чем у переходных характеристик H(t), и, следовательно, чувствительность к

изменению электропроводности и размеров проводящих объектов у них выше;

при малом аддитивном шуме моделируемая глубина выделяемого хорошо проводящего коллектора по h_F (СТЕМ-1) составляет 4000 м, а по $H(t)_T$ — 2000 м (Цикл-7).

Таким образом, новый метод СТЕМ и экспериментальный образец комплекса СТЕМ-1 обладают существенно большей потенциальной глубинностью и разрешающей способностью по сравнению с традиционными методом и аппаратурой. Поэтому можно ожидать, что внедрение в практику геологоразведочных работ новой конкурентоспособной и экономичной технологии электромагнитного зондирования недр на основе промышленных образцов комплекса СТЕМ-1 значительно повысит эффективность проводимых геологоразведочных работ на нефть, газ и другие виды полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.

2. *Великин А.Б.* Способ электроразведки и устройство для его осуществления (варианты): патент 2354999 РФ: МПК *G*01*V* 3/08/; заявл. 04.07.07; опубл. 10.05.09. Бюл. № 13. 3. Дубицкий С.Д. Программный комплекс Elcut, http://elcut.ru/ publications/dubitsky2.pdf. (05.04.2015).

4. Жданов М.С. Сто лет электромагнитной геофизике: заметки о прошлом и дорога в будущее. / Матер. 5-й всерос. школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли ЭМЗ. Кн. 1. — СПб.: СПбГУ, 2011. — С. 54–87.

5. Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. — 2014. — Т. 50. — № 2. — С. 5–9.

6. *Светов Б.С., Алексеев Д.А. и др.* Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. — 2012. — № 1. — С. 52–60.

7. *Duncan P.M. et al.* The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using a pseudo-noise source // Geophysics. — Vol. 45. — No. 8. — 1980. — P. 1276–1296.

Velikin A.B., Bulgakov Ju.I. Transient electromagnetic method (One loop version), Proceedings of the UNO International Seminar. — Moscow, 1967.
Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M. Transient geo-electromagnetics. Ludwig-Maximilian-University. — Munich, 2010.

10. *Ziolkowski A., Wright D.,* Shallow water Multi-Transient EM Surveys in the North Sea, 3rd International Oil and Gas Simposium in Western Newfoundland. — 2008.

© Великин А.Б., Великин А.А., 2016

Великин Александр Борисович // avelikin@mail.ru Великин Алексей Александрович // aavelikin@mail.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.334.52:551.2

Манукьян В.А. (Росгидрогео)

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В МЕЖГОРНЫХ ВПАДИНАХ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Рассматривается почти полувековая история взаимодействия уникального месторождения пресных подземных вод с крупным горно-химическим комбинатом. В процессе эксплуатации месторождения не произошло сколько-нибудь заметной сработки запасов, обеспеченных инверсией разгрузки, но привело к заметному загрязнению поземных вод. С помощью тщательного изучения баланса подземных и поверхностных вод, основанного на проведении образцовых опытно-фильтрационных работ с последующим моделированием, предлагается выход из кризиса. Ключевые слова: месторождение, баланс подземного и поверхностного стока, уравнение связи, кластерный анализ, уран.

Manukyan V.A. (Rosgidrogeo)

THE INFLUENCE OF THE PERMANENT NATURAL FACTORS AND FAULTY TECHNOLOGY ON THE EXPLOITATION OF UNDERGROUND WATERS IN THE INTERMOUNTAIN AREAS OF SOUTH-EASTERN ZABAYKALYE

Here it is considered a nearly half-a-century history of the interaction between the unique fresh underground water deposit and a large-scale mining-chemical industrial enterprise. During the work process of the exploitation of the deposit it didn't happen any noticeable exhaust of the underground water supply protected with the inversion of the relieve, but it became a reason of the appreciable contamination of the underground waters. After the thorough investigation of the underground water basin balance and river basin balance, which was founded on the cluster pumping tests and the following computer simulation technique the way out of the situation is offered in this article. **Key words:** deposit, underground water basin and river basin balance, equation of connection, cluster analysis, uranium.

Восточно-Урулюнгуйское месторождение пресных подземных вод, разведанное в 1966-1968 гг. (В.А. Манукьян, В.С. Сорокина, Н.А. Григорьев, А.М. Таболина) расположено на юго-востоке Забайкалья в межгорной впадине, которая простирается на 80 км с юго-запада на восток, ограничиваясь с севера — Кличкинским, с юга — Аргунским хребтами (рис. 1). В западной половине депрессии полностью отсутствует поверхностный сток (падь Сухой Урулюнгуй), в восточной половине отмечается временный водоток р. Урулюнгуй со среднегодовым расходом $Q_0 = 1,99 \text{ м}^3/\text{с}$. Река, текущая преимущественно на многолетнемерзлых породах мощностью от 15-20 до 38 м, прорезает с севера на юг Кличкинский хребет, поворачивает на восток при входе в Восточно-Урулюнгуйскую депрессию и достигает р. Аргунь. При дефиците воды в регионе такое крупное месторождение было признано уникальным в 1968 г. на совместном заседании представителей Минсредмаша и Мингео СССР и отмечена недопустимость строительства отстойников и хвостохранилищ гидрометаллургического производства урана в верховьях долины. Позд-

