

## ИМПУЛЬСНАЯ ИНДУКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ ЯКУТСКОЙ КИМБЕРЛИТОВОЙ ПРОВИНЦИИ

**В.В. Стогний**

*Ботубинская геолого-разведочная экспедиция АК "АЛРОСА",  
678170, Мирный, ул. Ленина, 44б, Россия, v.stogny@mail.ru*

Рассмотрены результаты полевых электроразведочных работ, проведенных методом переходных процессов на территории Якутской кимберлитовой провинции. Показано, что зондирования с переходными характеристиками, осложненными влиянием индукционно-вызванной поляризации, приурочены к участкам развития высокольдистых пород. Предложена методика проведения полевых работ и обработки материалов электромагнитных зондирований, обеспечивающая разделение эффектов индукции и поляризации.

*Метод переходных процессов, мерзлые породы, индукционно-вызванная поляризация*

### TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROSPECTING ON INVESTIGATIONS OF INDUCED POLARIZATION EFFECTS IN FROZEN GROUND OF YAKUTIAN KIMBERLITE PROVINCE

**V.V. Stogny**

*"ALROSA" Co Ltd, Botuobinskaya Geological Enterprise of Exploration,  
678170, Mirny, Lenina str., 44b, Russia, v.stogny@mail.ru*

The investigations have been carried out in the Yakutian kimberlite province. The transient electromagnetic sounding technique has shown that the sounding sites with transient properties complicated by the influence of induced polarization are confined to the ice-rich soils. Methods of field research and data processing providing separation of induction and polarization effects have been suggested.

*Transient electromagnetic sounding technique, frozen ground, induced polarization effects*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время геолого-разведочными предприятиями АК "АЛРОСА" проводится большой объем электроразведочных работ зондированием методом переходных процессов (ЗМПП) на территории Якутской кимберлитовой провинции, направленных на поиски кимберлитовых тел в сложных геологических условиях. Другой основной задачей для электроразведочных методов является мониторинг межмерзлотных таликов, образующихся при закачке высокоминерализованных промышленных стоков в ослабленные тектонические зоны.

При проведении полевых работ ЗМПП по традиционной методике с использованием совмещенной генераторной и измерительной установки регистрируемые переходные процессы часто осложнены влиянием индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Это приводит к почти полной потере информации об аномальном эффекте, вызванном повышенной проводимостью кимберлитовых тел [Стогний, Жандалинов, 2006], и затрудняет проведение структурных построений при мониторинге межмерзлотных техногенных таликов.

До настоящего времени влияние индукционно-вызванной поляризации рассматривалось как помеха при интерпретации данных зондирований

методом переходных процессов. Однако, по нашему мнению, учет влияния ВПИ является актуальной задачей при изучении геокриологического строения кимберлитовых полей.

Переходные процессы ЗМПП, осложненные влиянием ВПИ, были зарегистрированы еще в 70-х гг. XX в. Существуют разные точки зрения на механизм формирования ВПИ. Так, С.И. Митюхин [1985] считает, что данные процессы обусловлены пиритизацией кембрийских карбонатных отложений, В.А. Сидоров [1987] связывает их с гетерогенностью мерзлых пород, содержащих прослойки льда. Емкостные эффекты (эффект Максвелла–Вагнера) возникают при чередовании высокоомных прослоев с низкоомными. Н.О. Кожевников с соавт. [1995] предположил, что источник поляризации обусловлен диэлектрической релаксацией полярных молекул воды в мерзлом состоянии.

Необходимо отметить, что эффекты индукции и ВПИ имеют разный знак. В связи с этим наблюдается суперпозиция данных эффектов, результатом которой являются осложненные регистрируемые переходные процессы, часто с двойной сменой знака.

Индукционный и поляризационный процессы различным образом зависят от геометрических

размеров электроразведочной установки, что может быть положено в основу их разделения. Ослабление влияния ВПИ на процессы становления показано при изменении размеров генераторного и измерительного контуров [Каменецкий, 1997]. Подавление ВПИ наблюдается также с удалением приемного датчика от центра генераторного контура [Стогний, Жандалинов, 2006].

Анализ материалов полевых исследований зондирования методом переходных процессов, выполненного в алмазоносных районах Якутской кимберлитовой провинции, показывает, что значительная часть зарегистрированных переходных процессов осложнена влиянием ВПИ. В связи с этим актуальны следующие задачи: 1) разработка методики разделения эффектов индукции и ВПИ; 2) использование ВПИ как источника информации о структуре криолитозоны. Методика решения этих задач сводилась, во-первых, к выполнению математического моделирования изменения во времени пространственной структуры электромагнитного поля, возбуждаемого незаземленным генераторным контуром при зондировании поляризующихся сред, и, во-вторых, к анализу полученных данных и материалов полевых исследований по пространственной приуроченности кривых переходных процессов, осложненных влиянием ВПИ, к определенным комплексам пород.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВПИ

В настоящее время для математического описания процессов вызванной поляризации (ВП) наиболее часто используется формула Cole-Cole, определяющая электродинамическую модель среды с комплексной частотно-зависимой электропроводностью  $\sigma(\omega)$ :

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c(1-\eta)} \right], \quad (1)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $\sigma_0$  – электропроводность в отсутствие поляризации;  $\eta$  – поляризуемость среды ( $0 < \eta < 1$ );  $\tau$  – постоянная времени поляризационного процесса;  $c$  – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП.

Формула Cole-Cole положена в основу программ, использованных нами при обработке материалов ЗМПП, – Выбор-ЗС и Inv\_QQ\_IP.

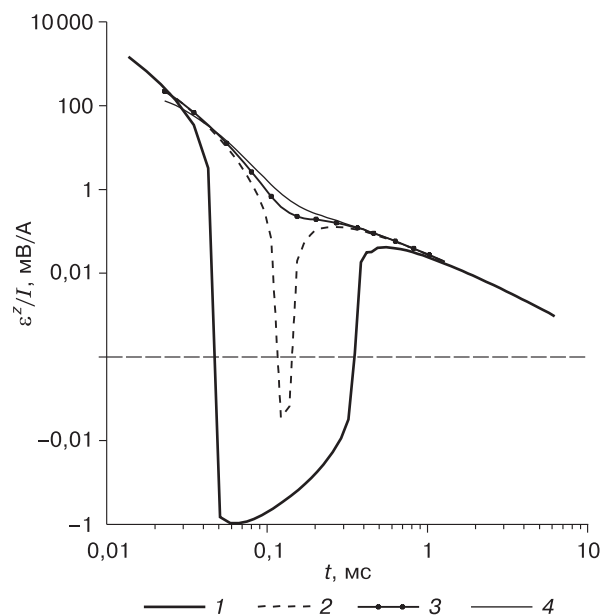
При учете эффекта ВП на основе формулы Cole-Cole к сопротивлению и мощности геологических слоев добавляется поляризуемость  $\eta$ , постоянная времени поляризации  $\tau$  и показатель степени  $c$ , определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП. Необходимо учитывать, что инверсия переходных процессов с учетом ВПИ ввиду множества параметров,

характеризующих геоэлектрические разрезы, может приводить к широкой эквивалентности. При отсутствии априорной информации на основании одной переходной характеристики не удастся однозначно восстановить параметры даже простой геоэлектрической модели – поляризующегося полупространства [Кожевников, Антонов, 2007].

Математическое моделирование с учетом эффекта ВПИ выполнялось с целью изучения особенностей моделей, создающих переходные характеристики, подобные наблюдаемым в Якутской кимберлитовой провинции, и имеющих осложнения, в том числе переходы через нуль, а также с целью поиска путей снижения пределов эквивалентности.

Типичная модель среды, принятая для расчетов, включала три слоя, из которых первый слой обладает частотно-зависимой электропроводностью и характеризуется параметрами:  $\rho_1 = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\eta_1 = 0,3$ ,  $\tau_1 = 70 \text{ мкс}$ ,  $c_1 = 0,8$ ,  $h_1 = 10 \text{ м}$ , а второй (мощность  $h_2 = 200 \text{ м}$ ) и третий слои не обладают поляризационными свойствами и имеют удельное электрическое сопротивление  $\rho_2 = 600 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и  $\rho_3 = 35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Возбуждение осуществляется незаземленным прямоугольным генераторным контуром размером  $100 \times 100 \text{ м}$  при ступенчатом выключении постоянного тока ( $I$  – сила тока). Электродвижущая сила (ЭДС) обозначена через  $\varepsilon^z$ .

Согласно результатам математического моделирования неустановившегося электромагнитного поля выбранной модели (рис. 1) для соосной уста-



**Рис. 1. Сравнение поля на поверхности трехслойной поляризующейся среды при различном удалении приемного датчика от центра генераторного контура.**

Величина разнота между центром генераторной петли и приемным датчиком: 1 –  $OO' = 0$  (соосная установка), 2 –  $OO' = 60 \text{ м}$ , 3 –  $OO' = 70 \text{ м}$ , 4 –  $OO' = 100 \text{ м}$ .

новки, переходный процесс в интервале времени 0,03–0,70 мс полностью определяется влиянием индукционно-вызванной поляризации, что выражается в характере переходного процесса с двойной сменой знака, однако на времени более 1 мс преобладают индукционные эффекты. Для разнесенных установок влияние поляризуемости первого геoeлектрического слоя на процесс становления значительно уменьшается с удалением приемного датчика от центра генераторной петли и при разnose  $OO' = 100$  м составляет только первые проценты от общей амплитуды переходного процесса за все время исследований.

С целью оценки пределов эквивалентности при инверсии поляризующихся геoeлектрических сред были выбраны две модели геoeлектрических разрезов, переходные процессы от которых в совмещенной электроразведочной установке совпадают. В качестве исходной взята полевая кривая, измеренная в пределах центральной части Мало-Ботубинского алмазного района с совмещенной установкой  $100 \times 100$  м. Расчет выполнен для двух типов установок: совмещенной (рис. 2, а) и разнесенной (рис. 2, б). В модели 1 поляризующийся слой небольшой мощности находится в верхней части разреза, в модели 2 кровля мощного поляризующегося слоя расположена на глубине, равной  $1/4$  стороны генераторного контура. Параметры модели 1 следующие:  $\rho_1 = 30$  Ом·м,  $h_1 = 4$  м,  $\rho_2 = 200$  Ом·м,  $h_2 = 15$  м,  $\eta_2 = 0,55$ ,  $\tau_2 = 110$  мкс,  $c_2 = 0,85$ ,  $\rho_3 = 600$  Ом·м,  $h_3 = 190$  м,  $\rho_4 = 45$  Ом·м,

$h_4 = 200$  м,  $\rho_5 = 600$  Ом·м; модели 2:  $\rho_1 = 30$  Ом·м,  $h_1 = 1$  м,  $\rho_2 = 6000$  Ом·м,  $h_2 = 25$  м,  $\rho_3 = 300$  Ом·м,  $h_3 = 210$  м,  $\eta_3 = 0,82$ ,  $\tau_3 = 110$  мкс,  $c_3 = 0,85$ ,  $\rho_4 = 45$  Ом·м,  $h_4 = 200$  м,  $\rho_5 = 600$  Ом·м. Расчеты показали, что как для совмещенной, так и для разнесенной установок влияние ВПИ на характер переходных процессов очень сильное. Однако для зондирования с разнесенной установкой (см. рис. 2, б) вклад близповерхностного поляризующегося слоя (модель 1) в процесс становления значительно меньше по сравнению с моделью 2, где мощный поляризующийся слой перекрыт неполяризующимися породами. Для модели 2 влияние ВПИ на переходные процессы ЗМПП, выполненные установками различного типа (совмещенной и разнесенной), оказывается близким по характеру, переходные процессы несколько раз меняют знак. Данную закономерность можно эффективно использовать при инверсии зондирования, выполненных в диспергирующих средах. Совместная инверсия двух переходных процессов, измеренных электроразведочными установками различного типа (совмещенные и разнесенные), позволяет значительно уменьшить эквивалентность подбираемых геoeлектрических разрезов.

Результаты математического моделирования показывают, что использование разнесенных установок ЗМПП хорошо ослабляет эффекты индукционно-вызванной поляризации, обусловленные приповерхностными источниками, в то время как вклад процессов ВП от глубинных поляризующихся

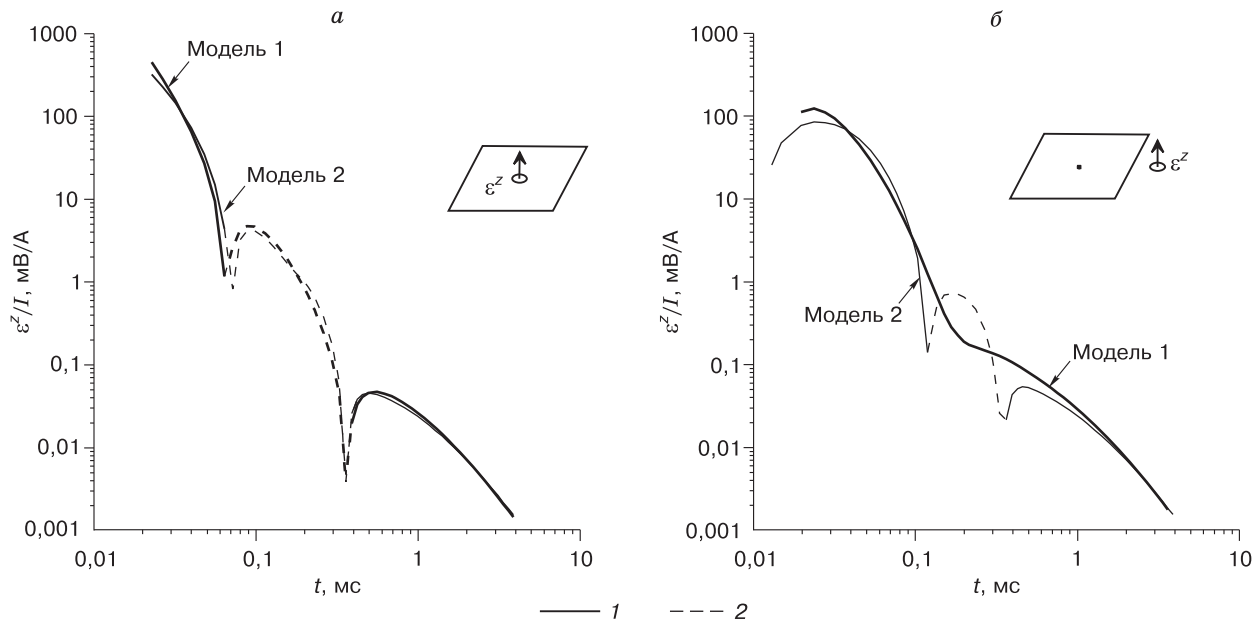


Рис. 2. Пример эквивалентности модели с тонким поляризующимся слоем в верхней части разреза (модель 1) и модели с поляризующимся слоем большой мощности, расположенным на глубине, равной  $1/4$  стороны генераторного контура (модель 2), для совмещенной (а) и разнесенной (б) установок.

Полярность сигнала: 1 – положительная, 2 – отрицательная.

ся объектов остается на высоком уровне. Это позволяет использовать установки с приемным датчиком, вынесенным за пределы генераторного контура, при поиске глубоко залегающих поляризующихся объектов, какими являются, например, некоторые кимберлитовые тела Якутской кимберлитовой провинции [Жандалинов, 2005]. Выполнение комбинированных зондирований совмещенной и разнесенной установками дает возможность уменьшить пределы эквивалентности и оценить глубину залегания поляризующихся объектов.

### МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Полевые электроразведочные работы были проведены с использованием аппаратуры “Цикл-5”. Количество накоплений сигнала при одном измерении зависело от уровня электромагнитных помех и составляло не менее 256. Для минимизации влияния фронта выключения тока в генераторной петле и для увеличения динамического диапазона измерения переходного процесса зондирования выполняли при амплитуде импульсов тока 0,5–1,5 и 10–17 А. Зондирование при силе тока 0,5–1,5 А наименее искажено фронтом выключения тока и содержит информацию о верхней части разреза. Полученные кривые в последующем “сшивали” в программе предобработки таким образом, чтобы участки кривых переходных процессов, зарегистрированные при различной силе тока, совпали в соответствующих временных интервалах. Временная поправка за фронт выключения тока выбиралась с учетом формулы

$$t_3 = t_0 + 2I(L_a + L_b)/U_{\max}, \quad (2)$$

где  $t_0$  – задержка коммутатора, мкс;  $L_a, L_b$  – размеры сторон генераторного контура, м;  $I$  – ток в генераторном контуре, А;  $U_{\max}$  – напряжение ограничения, В (определяется техническими характеристиками используемого генератора).

Для снижения уровня колебательных процессов на начальных этапах регистрации применялись шунтирующие сопротивления ( $R = 270 \text{ Ом}$ ), подключаемые параллельно концам генераторной и измерительной петли. В приемных датчиках ПДИ-20 (эквивалент измерительной петли  $20 \times 20 \text{ м}$ ) и ПДИ-100 ( $100 \times 100 \text{ м}$ ) изготовителем обе полуобмотки были шунтированы резисторами, что позволило приемной системе работать в аperiodическом режиме.

Первоначальный подбор геоэлектрических разрезов осуществлялся на основе решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований становлением поля с использованием программы EM-Vision (Encom Technology, Австралия) и Подбор (СНИИГГиМС, Россия) [Могилатов, Злобинский, 2006]. В дальнейшем инверсия проводи-

лась с учетом поляризации среды на основе формулы Cole-Cole в программах Выбор-ЗС (авторы В.С. Могилатов, А.В. Злобинский, А.К. Захаркин) и Inv\_QQ\_IP (авторы Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников) [Кожевников, Антонов, 2007].

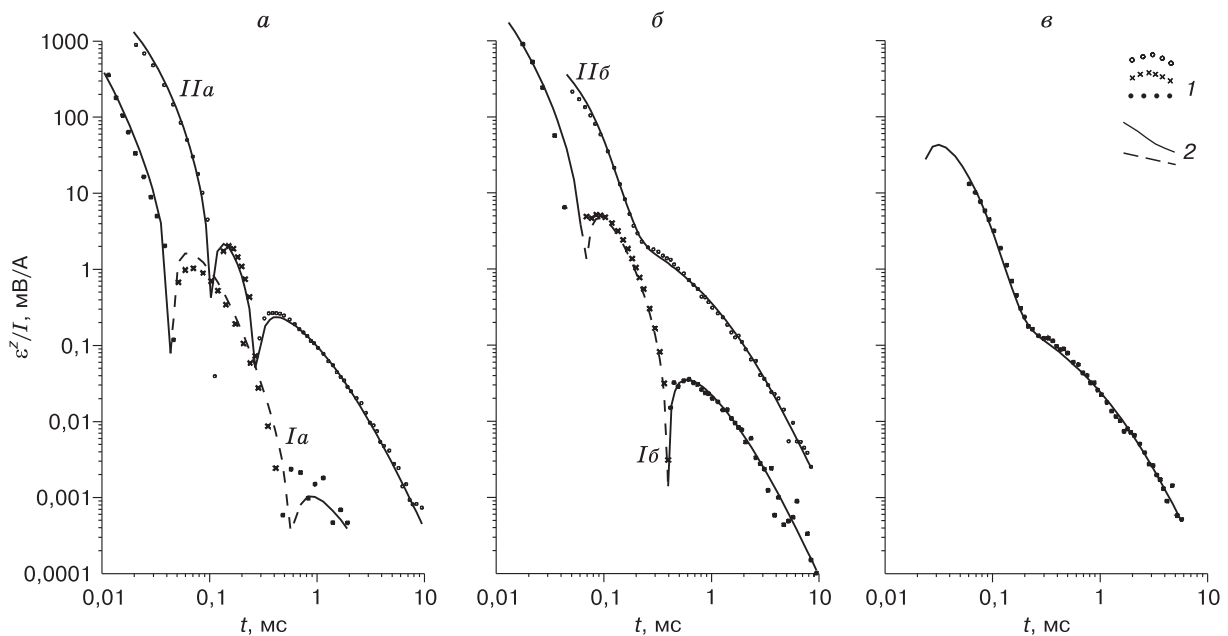
Для вычисления эффекта поля-фактора в интерпретируемом поле использовался аппарат многомерного регрессионного анализа [Шрайбман и др., 1977; Никитин, 1986]. Расчеты выполнены в комплексе программ SMI – Stochastic Physical-Geological Modeling and Interpretation (автор А.Ю. Давыденко), реализованном в программно-инструментальной среде Mathcad13.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что пространственные распределения вихревых токов, обусловленных индукционным становлением поля, и токов поляризации по-разному зависят от геометрических размеров генераторной и приемной установок [Сидоров, 1985; Каменецкий, 1997; Азеев и др., 2006]. Для оценки адекватности применения формулы Cole-Cole при совместной интерпретации зондирований, выполненных с различной геометрией электроразведочной установки, был проведен следующий эксперимент. Геометрическое зондирование выполнено в пределах участка с горизонтально-слоистым строением геоэлектрического разреза, находящегося в 500 м от неглубокого карьера, образовавшегося после отработки верхних горизонтов кимберлитовой трубки Таежная (центральная часть Мало-Ботуобинского алмазоносного района). Геоэлектрический разрез в пределах участка представлен кембрийскими карбонатными отложениями, имеющими в мерзлом состоянии удельное сопротивление 200–2000 Ом·м. На глубине 210–410 м находится слой пониженного сопротивления (25–50 Ом·м), представленный мергелями и доломитами мирнинской и метегерской свит кембрия.

Геометрические зондирования на участке Трубка Таежная выполнены на основе совмещенной и соосной установок серией измерений с различными размерами генераторного и приемного контуров. Зондирование с приемно-генераторной установкой размерами  $50 \times 50 \text{ м}$  было выполнено в однопетлевом варианте. Измерения с соосной установкой проведены с использованием приемного датчика ПДИ-100 (эквивалент приемной петли  $100 \times 100 \text{ м}$ ), размер генераторного контура при этом составил  $100 \times 100$ ,  $200 \times 200$  и  $375 \times 400 \text{ м}$ . Измерения ЗМПП на основе применения разнесенной установки выполнены при удалении приемного датчика на 130 и 180 м от центра генераторного контура размерами  $100 \times 100 \text{ м}$ .

Анализ полученного материала показывает, что наибольшее влияние ВПИ на характер переходного



**Рис. 3. Результаты одномерной инверсии геометрического зондирования, выполненного на участке Трубка Таежная с разными установками:**

*a: Ia* – однопетлевая установка размером  $50 \times 50$  м, *IIa* – соосная установка: генераторная петля (ГП)  $200 \times 200$  м, ПДИ-100; *б: Ib* – соосная установка: ГП  $100 \times 100$  м, ПДИ-100, *IIб* – соосная установка: ГП  $375 \times 400$  м, ПДИ-100; *в* – разнесенная установка: ГП  $100 \times 100$  м, ПДИ-100,  $OO' = 130$  м. Переходный процесс: 1 – измеренные значения ЭДС, 2 – расчет по модели, штриховые линии – отрицательная полярность сигнала.

процесса отмечается для совмещенной установки размером  $50 \times 50$  м, при этом наблюдается кривая становления с характерным двойным переходом через нуль (рис. 3, *a*). Для соосной установки влияние ВПИ уменьшается с увеличением размера генераторного контура, и при размерах генераторного контура  $375 \times 400$  м индукционно-вызванная поляризация проявляется понижением величин ЭДС без перехода кривой через нуль (см. рис. 3, *б*). Применение разнесенной установки также позволяет эффективно подавлять влияние ВПИ путем увеличения расстояния между центром генераторного контура и приемным датчиком (см. рис. 3, *в*). Так, при удалении приемного датчика на 130 м от центра генераторной петли вклад поляризации в процесс становления составляет первые десятки процентов, при удалении на 180 м – первые единицы процентов.

Общей закономерностью зарегистрированных переходных процессов ЗМПП с установками различных типов является уменьшение проявления ВПИ с ростом размера генераторного контура для соосной установки и увеличением расстояния между центром генераторной петли и приемным датчиком для разнесенной установки. Совместная инверсия данных, полученных при выполнении геометрического зондирования, была проведена в программе *Inv\_QQ\_IP*. Результатом инверсии яви-

лась пятислойная модель среды со следующими параметрами. Первый геоэлектрический слой имеет пониженное удельное сопротивление  $\rho_1 = 30$  Ом·м, мощность  $h_1 = 4$  м и связывается со слоем сезонного протаивания. Второй слой обладает поляризационными свойствами и характеризуется следующими параметрами:  $\rho_2 = 200$  Ом·м,  $\eta_2 = 0,55$ ,  $\tau_2 = 110$  мкс,  $c_2 = 0,85$ ,  $h_2 = 15$  м. При инверсии исходных данных увеличение мощности второго слоя относительно подобранной модели или глубины его залегания вызывало значительное отклонение расчетной кривой переходного процесса, зарегистрированного с разнесенной установкой, от наблюдаемых значений. По результатам бурения данный поляризующийся слой связывается с интенсивно трещиноватыми, льдистыми известковистыми алевролитами. Третий ( $h_3 = 210$  м), четвертый ( $h_4 = 200$  м) и пятый слои различного удельного сопротивления ( $\rho_3 = 600$  Ом·м,  $\rho_4 = 45$  Ом·м,  $\rho_5 = 1000$  Ом·м) не обладают поляризационными свойствами и обусловлены комплексами пород различного литологического состава.

Согласно нашему опыту, для определения поляризационных свойств среды необходимо выполнить совместную интерпретацию не менее двух переходных процессов, измеренных электроразведочными установками ЗМПП с различной геометрией и различающихся вкладом ВПИ в процесс станов-

ления. Диапазон измерения переходного процесса должен составлять не менее 5–6 порядков. При локализации поляризуемого слоя в верхней части разреза наиболее искаженными под влиянием ВПИ являются кривые переходных процессов, измеренные совмещенными установками небольшой площади. Это накладывает определенные ограничения на размер установки. Из-за быстрого спада кривой переходного процесса при зондировании высокоомных сред существуют методические, в том числе аппаратные, трудности его измерения [Стогний, 2003; Кожевников, Плотицкий, 2004]. В связи с этим использование соосной или совмещенной установки с размером генераторного контура менее  $50 \times 50$  м при исследовании высокоомных разрезов криолитозоны затруднено, а иногда и невозможно. В этих условиях, на наш взгляд, наиболее технологичной является методика совместных измерений на каждой точке соосной и разнесенной установками, позволяющая учесть эффекты ВПИ. Площадь генераторного контура при этом должна составлять от 2500 до 10 000 м<sup>2</sup>.

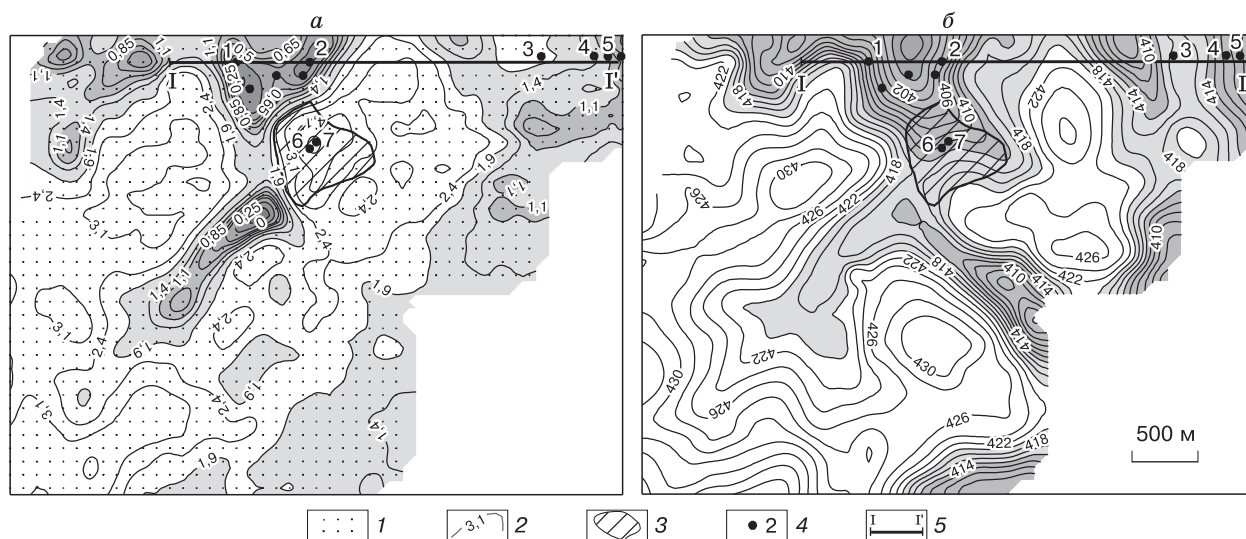
Необходимо учитывать, что для разнесенной установки изменение знака переходного процесса может быть также связано с локальной проводящей неоднородностью в геоэлектрическом разрезе [Каменицкий, 1997]. Поэтому только проведение площадных работ позволяет выделить однородные участки, в пределах которых возможна одномерная интерпретация на основе модели горизонтально-слоистой поляризуемой среды. При количественной интерпретации кривых переходных процессов, измеренных в переходных зонах, необходимо использовать программы дву- и трехмерного

моделирования. В качестве примера рассмотрим пространственное распределение зон с интенсивным влиянием ВПИ на участках Верхне-Чуоналырский и Дьяхтарский.

*Участок электроразведочных работ Верхне-Чуоналырский* Мало-Ботуобинского алмазоносного района расположен в 45 км к юго-западу от г. Мирный. На этом участке выполнено 1218 зондирований методом переходных процессов с совмещенной электроразведочной установкой  $100 \times 100$  м способом петля к петле. Участок сложен траппами, залегающими на карбонатных породах нижнего палеозоя, а в понижениях рельефа – местами перекрытыми нижнеюрскими и четвертичными отложениями мощностью до 10 м.

По материалам электромагнитного каротажа скважин и интерпретации данных ЗМПП траппы имеют удельное электрическое сопротивление 1000–5000 Ом·м, а карбонатные породы нижнего палеозоя – 400–900 Ом·м. В области их контакта образуется зона метасоматоза мощностью до 8 м с низким электрическим сопротивлением (10–30 Ом·м), что необходимо учитывать при объемном картировании траппов. Низким электрическим сопротивлением (10–70 Ом·м) также характеризуется кора выветривания карбонатных пород, мощность которой в пределах участка не превышает 5 м.

Эффекты ВПИ наиболее отчетливо проявляются во временном интервале 80–250 мкс и вызывают уменьшение величин ЭДС. Согласно схеме изолиний ЭДС переходных процессов, построенной для времени регистрации 183 мкс (рис. 4, а), наиболее сильное искажающее влияние ВПИ отме-



**Рис. 4. Участок электроразведочных работ Верхне-Чуоналырский:**

а – схема изолиний ЭДС ( $t = 183$  мкс) по данным ЗМПП; б – схема рельефа дневной поверхности; 1 – точки ЗМПП, 2 – изолинии ЭДС (мВ), 3 – контур талика, 4 – геологическая скважина и ее номер, 5 – линия I–I' геолого-геофизического разреза.

чается в понижениях рельефа (рис. 4, б), находящихся в центральной и северной частях участка. Это связывается с высокой льдистостью горных пород в верхней части разреза, образовавшейся в условиях зарегулированного стока. Пространственная корреляция поля ЭДС со структурой рельефа участка оценивалась по коэффициенту множественной корреляции для окна обработки  $1,5 \times 1,5$  км. Коэффициент множественной корреляции в целом для всего участка составил 0,74, изменяясь для отдельных его частей от 0,71 до 0,85. Такой высокий коэффициент корреляции свидетельствует о сильном влиянии на неустановившееся электромагнитное поле, регистрируемое совмещенной установкой, стороннего фактора, который зависит от рельефа местности и связывается с влиянием поляризационных процессов. Необходимо отметить, что эффекты ВПИ не зарегистрированы в пределах субаэрального талика, который в материалах ЗМПП выделяется зоной повышенных значений ЭДС. Талик вскрыт скважинами 7 и 8 и локализован в рыхлых песчаных отложениях юры. Разгрузка вод талика происходит на склоне невысокого водораздела, что является причиной формирования наледей в зимнее время. Ресурсы водоносного горизонта талика формируются в летнее время за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Подбор модели горизонтально-слоистой поляризуемой среды по линии I—I' (см. рис. 4) был выполнен на основе решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований становлением поля (рис. 5, А). На площади возвышенности, сложенной траппами, кривые становления практически не искажены ВПИ, и восстановление параметров среды дает хорошие результаты при инверсии переходных процессов без учета поляризуемости. Мощность траппов по результатам интерпретации ЗМПП не превышает 25 м. В пределах низины зарегистрировано сильное влияние индукционно-вызванной поляризации. Для подтверждения аномалии ВПИ были пройдены скважины 1 и 2 глубиной 80 м. Скважиной 1 вскрыты маломощные (до 2 м) льдистые четвертичные отложения и льдистые рыхлые юрские отложения мощностью 10 м, а с глубины 12 м до забоя – кембрийские карбонатные отложения. Скважиной 2 в верхней части разреза вскрыты льдистые четвертичные отложения мощностью 1 м и трещиноватые траппы мощностью 9 м. На участке профиля с интенсивным влиянием ВПИ были дополнительно выполнены зондирования разнесенной установкой с использованием приемного датчика ПДИ-20 (см. рис. 5, В). Вынос приемного датчика на удаление 78 м от центра генераторного контура оказался достаточным для надежного подавления процессов индукционно-вызванной поляризации до первых единиц процентов. Совместная инверсия зондирований с совмещенной и разнесенной установками позволила восста-

новить параметры среды, которые хорошо совпадают с данными бурения и каротажа скважин 1 и 2. Согласно результатам инверсии, мощность поляризуемого слоя не превышает 10 м. Этот слой расположен в верхней части разреза, в пределах локального понижения рельефа. Источник поляризационных процессов связывается с повышенной льдистостью четвертичных и юрских терригенных отложений, а также трещиноватых траппов, образовавшихся в условиях зарегулированного стока поверхностных вод.

*Участок электроразведочных работ Дьяхтарский* Среднемархинского алмазоносного района расположен в 5 км к юго-западу от кимберлитовой трубки Ботубинская. Рельеф дневной поверхности на площади работ слаборасчлененный с абсолютными отметками от 222 м в долине руч. Дьяхтар до 250 м на водоразделах. Ручей Дьяхтар находится в центральной части участка в пределах плоской сильно заболоченной долины, которая заросла моховым покровом и низкими кустами карликовой березки, что обуславливает минимальное (до 1 м) протаивание высокольдистых пород в течение летнего периода. Долина ручья имеет ширину 0,8–1,0 км в нижней части участка, сужаясь до 0,2–0,3 км в его верхней части. Значительная площадь в пределах возвышенных частей рельефа покрыта мелким густым подлеском молодого лиственника с кустами ольхи.

По материалам интерпретации данных ЗМПП и результатам бурения, выполненного по сети  $400 \times 400$  м, верхняя часть разреза представлена неогеновыми и четвертичными льдистыми отложениями мощностью до 10 м с удельным электрическим сопротивлением 100–2000 Ом·м. Ниже по разрезу залегают юрские трещиноватые песчаники и алевролиты с УЭС 50–500 Ом·м, глинистые алевролиты и аргиллиты с УЭС 20–50 Ом·м. Кровля палеозойских карбонатных отложений вскрыта на глубине от 60 до 110 м, породы характеризуются УЭС, равным 260–700 Ом·м. Глубже 170 м по разрезу УЭС палеозойских пород резко падает до 7 Ом·м.

Переходные процессы, зарегистрированные на участке Дьяхтарский при полевых работах, проведенных с использованием совмещенной электроразведочной установки  $200 \times 200$  м, искажены влиянием индукционно-вызванной поляризации в интервале 80–600 мкс, которое проявляется в снижении величин ЭДС переходных процессов (увеличение значений кажущегося сопротивления  $\rho_{\tau}$ ) и наличии отрицательных значений ЭДС. Для более позднего времени искажающего влияния индукционно-вызванной поляризации не отмечается, и правые участки кривых  $\rho_{\tau}$ , вычисленные по результатам измерений с соосной и разнесенной установками, совпадают. На рис. 6 представлены кривые, снятые совмещенной и разнесенной установка-

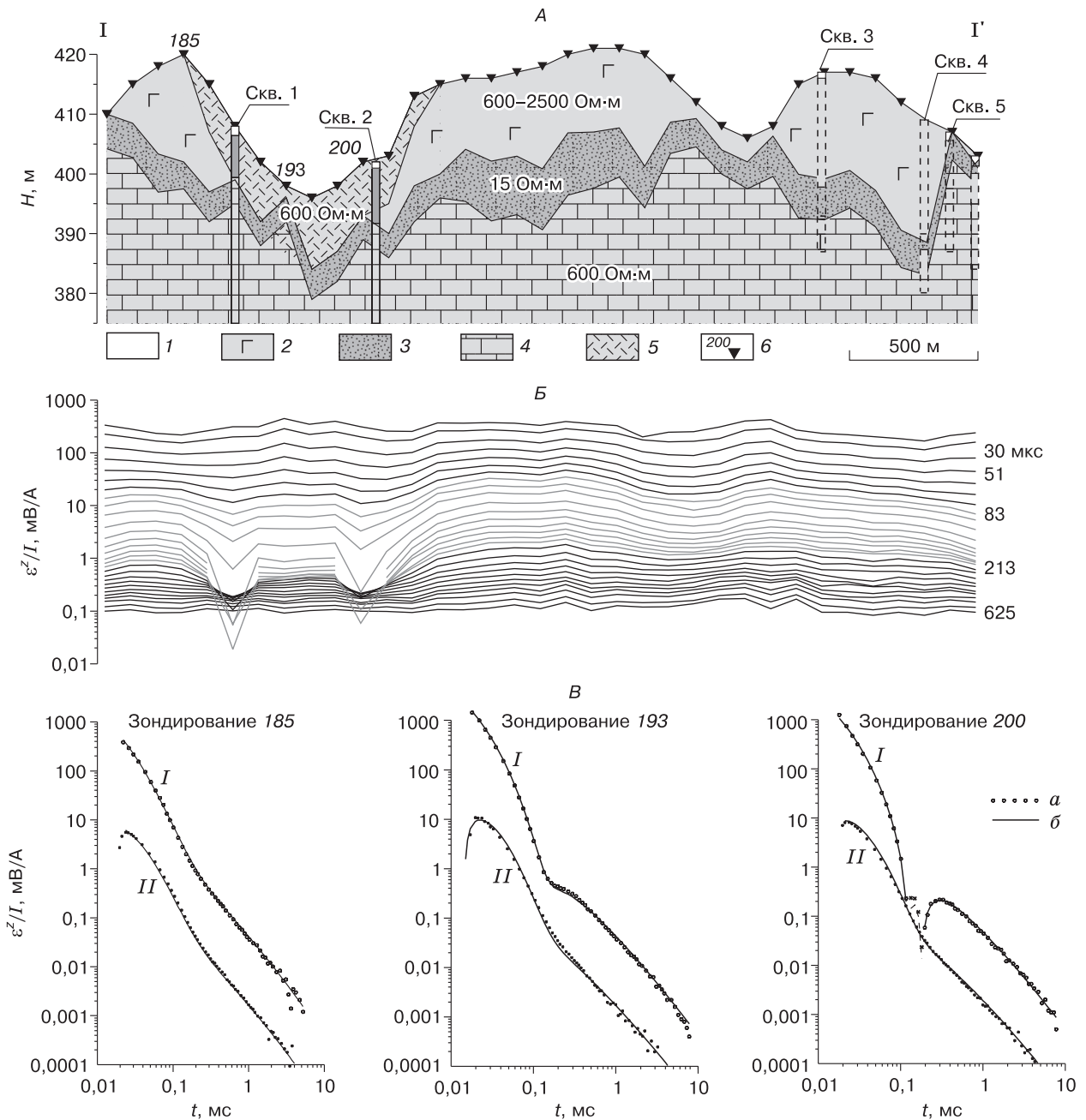
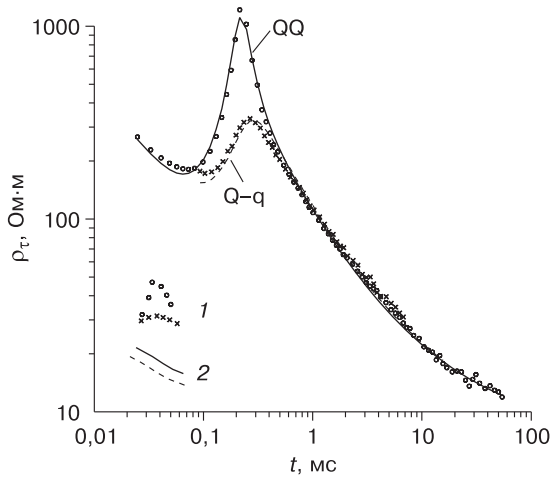


Рис. 5. Геолого-геофизический разрез по линии I–I', построенный по результатам одномерной инверсии с учетом поляризуемости среды (A), графики ЭДС по материалам измерения с совмещенной установкой  $100 \times 100$  м (B), измеренные и подобранные при инверсии кривые переходных процессов Верхне-Чуоналырского участка (B).

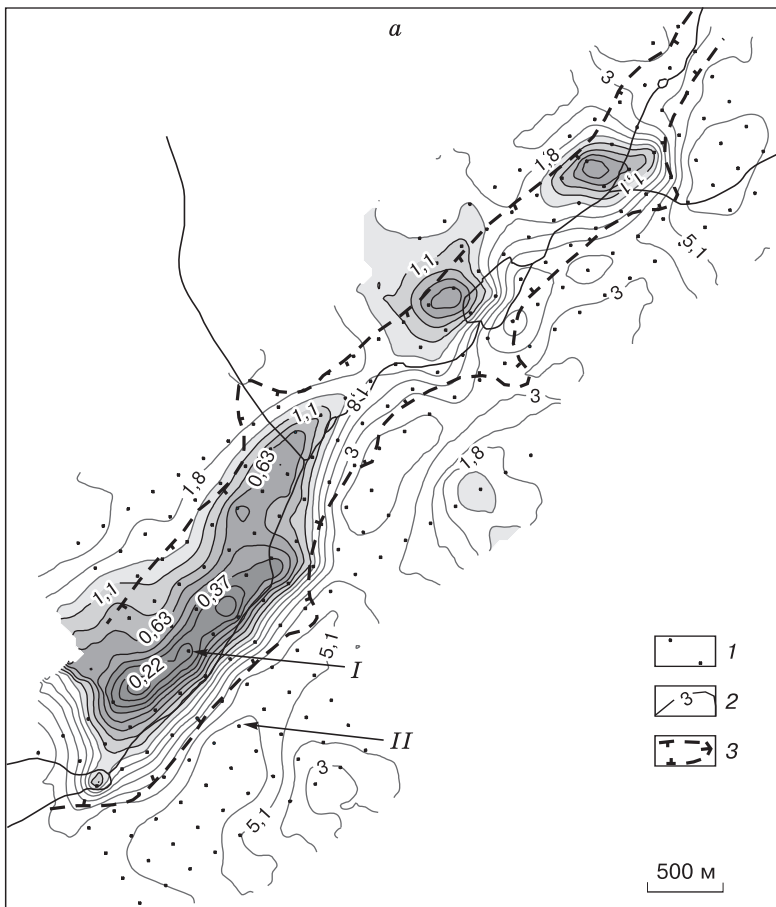
A: 1 – четвертичные суглинки и пески; 2 – траппы; 3 – метасоматически измененные траппами карбонатные породы; 4 – известковистые алевролиты, доломиты; 5 – поляризующиеся горные породы ( $\rho = 600 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\eta = 0,70\text{--}0,85$ ,  $\tau = 170\text{--}250 \text{ мкс}$ ,  $c = 0,8\text{--}0,9$ ); 6 – точка ЗМПП и ее порядковый номер. B: I – зондирование с совмещенной установкой размером  $100 \times 100$  м, II – разнесенной установкой ПДИ-20, ГП  $100 \times 100$  м,  $OO' = 78$  м; a – измеренная кривая ЭДС, б – кривая ЭДС по результатам подбора геоэлектрического разреза.





**Рис. 6.** Характер проявления индукционно-вызванной поляризации на кривых  $\rho_{\tau}(t)$ , построенных по результатам измерений с совмещенной (QQ) и разнесенной (Q-q) электроразведочными установками на участке Дьяхтарский.

1 – значения  $\rho_{\tau}$  по результатам измерений с совмещенной (QQ) установкой размером  $200 \times 200$  м и разнесенной (Q-q) установкой ПДИ-100, ГП  $200 \times 200$  м,  $OO' = 125$  м; 2 – рассчитанные по модели значения  $\rho_{\tau}$ .



**Рис. 7.** Результаты зондирования МПП поляризующейся геокриологической среды участка Дьяхтарский:

*a* – схема изолиний ЭДС ( $t = 235$  мкс); *б* – пример измеренных кривых переходных процессов на водоразделе (II) и в долине руч. Дьяхтар (I); 1 – точки ЗМПП; 2 – изолинии ЭДС (мВ); 3 – границы долины руч. Дьяхтар. Установка ПДИ-100, ГП  $200 \times 200$  м,  $OO' = 120$  м.

ми на водоразделе, где влияние ВПИ проявляется только в повышении величин кажущегося сопротивления  $\rho_{\tau}$ , без смены знака переходного процесса. При совместной инверсии материалов соосного и разнесенного зондирования была подобрана четырехслойная модель среды, где поляризационными свойствами обладает первый геоэлектрический слой, характеризующийся следующими параметрами:  $\rho_1 = 190 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h_1 = 45 \text{ м}$ ,  $\eta_1 = 0,59$ ,  $\tau_1 = 93 \text{ мкс}$ ,  $c_1 = 0,9$ . Это связывается с высокой льдистостью рыхлых четвертичных и трещиноватых юрских отложений. Следует отметить достаточно большую мощность поляризующегося слоя (45 м). Параметры второго–четвертого слоев следующие:  $\rho_2 = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h_2 = 30 \text{ м}$ ,  $\rho_3 = 677 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h_3 = 138 \text{ м}$ ,  $\rho_4 = 7,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Данная ситуация характерна в целом для геоэлектрического разреза Среднемархинского алмазоносного района. Согласно результатам поисковых электроразведочных работ, проведенных в различные годы, до 90 % зарегистрированных переходных процессов сильно искажены индукционно-вызванной поляризацией. Исключение составляет лишь площадь, находящаяся северо-восточнее кимберлитовой трубки Нюрбинская, где кровля мощного проводящего слоя с сопротивлением 15–30 Ом · м находится на глубине 110–140 м. На данной площади понижение относительного вклада ВПИ в процесс становления обусловлено увеличением суммарной проводимости разреза.

С целью прямого поиска кимберлитовых тел на участке Дьяхтарский была выполнена площадная электроразведочная съемка по сети 200 × 200 м. Для подавления влияния поляризации близ поверхностных объектов, которые рассматривались как помеха, использована разнесенная установка с генераторным контуром 200 × 200 м и приемным датчиком ПДИ-100, вынесенным на расстояние 125 м от центра генераторного контура.

Анализ характера проявления индукционно-вызванной поляризации в материалах ЗМПП на участке Дьяхтарский (рис. 7, а) показывает, что ее влияние минимально на водоразделе и достигает максимума в пределах долины руч. Дьяхтар. В центральной части долины величины ЭДС ( $t = 235 \text{ мкс}$ ) понижаются с 5,1 до 0,22 мВ (см. рис. 7, б), т. е. более чем на порядок, что не может быть объяснено изменением литологического состава пород. Согласно результатам бурения, мощность юрских отложений и их литологический состав выдержаны в пределах участка исследований. Начиная с 1 мс почти полностью преобладают индукционные процессы, и различия между кривыми переходных процессов выравниваются.

По материалам подбора геоэлектрических разрезов участка Дьяхтарский поляризационными свойствами обладает первый геоэлектрический слой. В пределах заболоченной низменности руч. Дьяхтар отмечается дополнительное увеличе-

ние поляризуемости горных пород в интервале 0–10 м, что связывается с их высокой льдистостью. Общая мощность льдистых пород составляет 30–55 м. Применение разнесенной установки позволило снизить влияние ВПИ в десятки раз, поэтому на участке не зарегистрированы процессы с двойной сменой знака, однако полностью исключить ее влияние не удалось из-за значительной мощности поляризующегося слоя и высоких значений  $\eta$ . Согласно результатам математического моделирования, для ослабления ВПИ до первых десятков процентов на данном участке необходим разнос между приемным датчиком и центром генераторной петли не менее 180 м.

## ВЫВОДЫ

Одним из основных методов поиска кимберлитовых тел Якутской кимберлитовой провинции является импульсная электроразведка ЗМПП. Однако регистрируемые кривые переходных процессов часто имеют особенности, которые не могут быть объяснены в пределах классической модели проводящей среды, в том числе переходы через нуль. Это требует усложнения модели среды и ввода нового параметра – поляризуемости. Анализ полученных данных ЗМПП показывает, что зондирования с осложненными переходными характеристиками обычно приурочены к участкам, где развиты высокольдистые породы. В связи с этим рассмотрено следующее: 1) разработка методики разделения эффектов индукции и поляризации в переходных процессах, что должно обеспечить повышение эффективности ЗМПП при решении поисковых задач; 2) использование информации по поляризующимся свойствам отдельных частей разреза для решения задач геокриологии.

Дополнительное введение при расчетах переходных процессов параметров модели Cole-Cole ( $\eta$ ,  $\tau$ ,  $c$ ), учитывающих поляризационные свойства среды, значительно увеличивает эквивалентность подбираемых геоэлектрических разрезов, которую можно снизить совместной интерпретацией зондирований, выполненных с различной геометрией электроразведочных установок ЗМПП, когда эффекты ВПИ проявляются с различной интенсивностью. Проведенным математическим моделированием неустановившегося электромагнитного поля с учетом параметров поляризуемости геоэлектрического разреза и опытными работами показано, что использование разнесенных установок “незаземленная генераторная петля–приемный индукционный датчик” позволяет ослабить влияние индукционно-вызванной поляризации. Наиболее технологичной методикой, которая обеспечивает разделение процессов индукции и поляризации, является комбинированное зондирование соосной и разнесенной установками. Для определения пара-

метров латерально неоднородных поляризующихся сред необходимо выполнение площадной съемки.

Проведение в пределах Якутской кимберлитовой провинции электроразведочных съемок по методике, обеспечивающей получение дополнительной информации о поляризуемости геоэлектрического разреза, позволяет существенно повысить информативность данного метода при решении геокриологических и гидрогеологических задач, а также при поисках кимберлитовых трубок.

Автор признателен проф. А.Ю. Давыденко за оказанную помощь при проведении статистической обработки материалов полевых исследований, А.В. Злобинскому за предоставленную возможность воспользоваться компьютерной программой Выбор-ЗС для моделирования процесса становления в многослойной (одномерной) земле от произвольного, задаваемого токовыми отрезками источника.

### Литература

- Агеев В.В., Каринский С.Д., Светов Б.С.** Становление электромагнитного поля в поляризующейся среде и определение параметров Cole-Cole // Геофизика, 2006, № 5, с. 40–46.
- Жандалинов В.М.** Переходные процессы в условиях кимберлитовых полей Западной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2005, 20 с.
- Каменецкий Ф.М.** Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. М., ГЕОС, 1997, 162 с.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Инверсия данных МПП с учетом быстро протекающей индукционно-вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика, 2007, № 1, с. 42–51.
- Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Снопков С.В.** Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология, 1995, № 2, с. 118–126.
- Кожевников Н.О., Плотников А.Е.** Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика, 2004, № 6, с. 33–39.
- Митюхин С.И.** О геологической природе знакопеременных переходных процессов в Западной Якутии // Геология и геофизика, 1985, № 1, с. 103–106.
- Могилатов В.С., Злобинский А.В.** Математическое обеспечение индуктивной импульсной электроразведки // Сиб. журн. индустр. математики, 2006, т. IX, № 1, с. 91–105.
- Никитин А.А.** Теоретические основы обработки геофизической информации. М., Недра, 1986, 342 с.
- Сидоров В.А.** Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.
- Сидоров В.А.** Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1987, № 10, с. 58–64.
- Стогний В.В.** Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, Изд-во СО РАН, Якут. фил., 2003, 124 с.
- Стогний Вас.В., Жандалинов В.М.** Импульсная индуктивная электроразведка при поисках кимберлитовых тел в условиях диспергирующей среды Мало-Ботуобинского и Средне-мархинского алмазоносных районов // Геофизика, 2006, № 2, с. 53–57.
- Шрайбман В.И., Жданов М.С., Витвицкий О.В.** Корреляционные методы преобразования и интерпретации геофизических аномалий. М., Недра, 1977, 236 с.

*Поступила в редакцию  
20 декабря 2007 г.*