Известия АН Армянской ССР, Науки о Земле, 2, 47—57, 1978

УДК 550.837.3

В. Б. ГАМОЯН, Е. М. ЛУЛЕЧЯН

ХАРАКТЕР ПОЛЯ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ ОТ «ЛИНЕЙНО-ДВУХПОЛЮСНОГО» ИСТОЧНИКА

Как известно, распределение геофизических полей и методика их изучения, в первую очередь, определяются типом источника. Опыт полевых наблюдений показывает, что в районах рудников основными источниками блуждающих токов являются рельсы транспортных горных выработок, где транспортировка производится контактными электровозами [1, 3, 4]. Это делает актуальным изучение характера распределения полей от подобного источника.

В литературе известны два мнения о характере источника блуждающих постоянных токов на рудниках:

1. Г. И. Березиным и М. В. Семеновым по ходу использования блуждающих токов с целью выявления и прослеживания крупных ветвей рудных полей изучены закономерности распределения поля блуждающих токов вблизи Иртышского рудника Рудного Алтая в связи с характером источника поля [2]. В результате установлен общий дипольный характер источника электрического поля месторождения. Один из полюсов диполя совпадает с районом автоматических трансформаторных подстанций к «отсасывающим» пунктам. Второй полюс питающего диполя расположен вблизи ствола шахты «Вспомогательная», в район которой доставляется электропоездами основная часть руды месторождения.

2. Экспериментальные исследования поля блуждающих токов, проведенные чехословацкими геофизиками Безвода и др. [7] на Северо-Члийском угольном бассейне (Чехословакия), привели к определению характера источника как электрического диполя, действующая величина которого несколько меньше расстояния между электровозом и ближней подстанцией, где имеется заземление.

Такие разногласия о характере источника поля постоянных блуждающих токов привели к необходимости особого исследования вопроса. С целью изучения характера источника блуждающих токов от тяговой сети рудника, скрытого штольнями, подобно рудникам Зодского золоторудного, Ахтальского барит-полиметаллического, Алавердского и Шамлугского медных и других месторождений, нами проведены полевые наблюдения, теоретические расчеты и лабораторные исследования.

Цель полевых наблюдений заключалась в изучении потенциала блуждающих токов на характерных точках в связи с движением электровоза. Наблюдения проводились в прямой горной выработке, пройденной в «однородных породах», в разветвленных горных выработках,

пройденных в «однородных породах», и в случае их пересечения хорошопроводящей рудной жилой.

На рис. 1 представлены осредненные кривые изменения потенциала блуждающих токов на точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 1а), зарегистрированные при перемещении электровоза с пикета 0 до пикета 1500 *м* транспортной штольни. Штольня пройдена в «однородных» породах габбро.

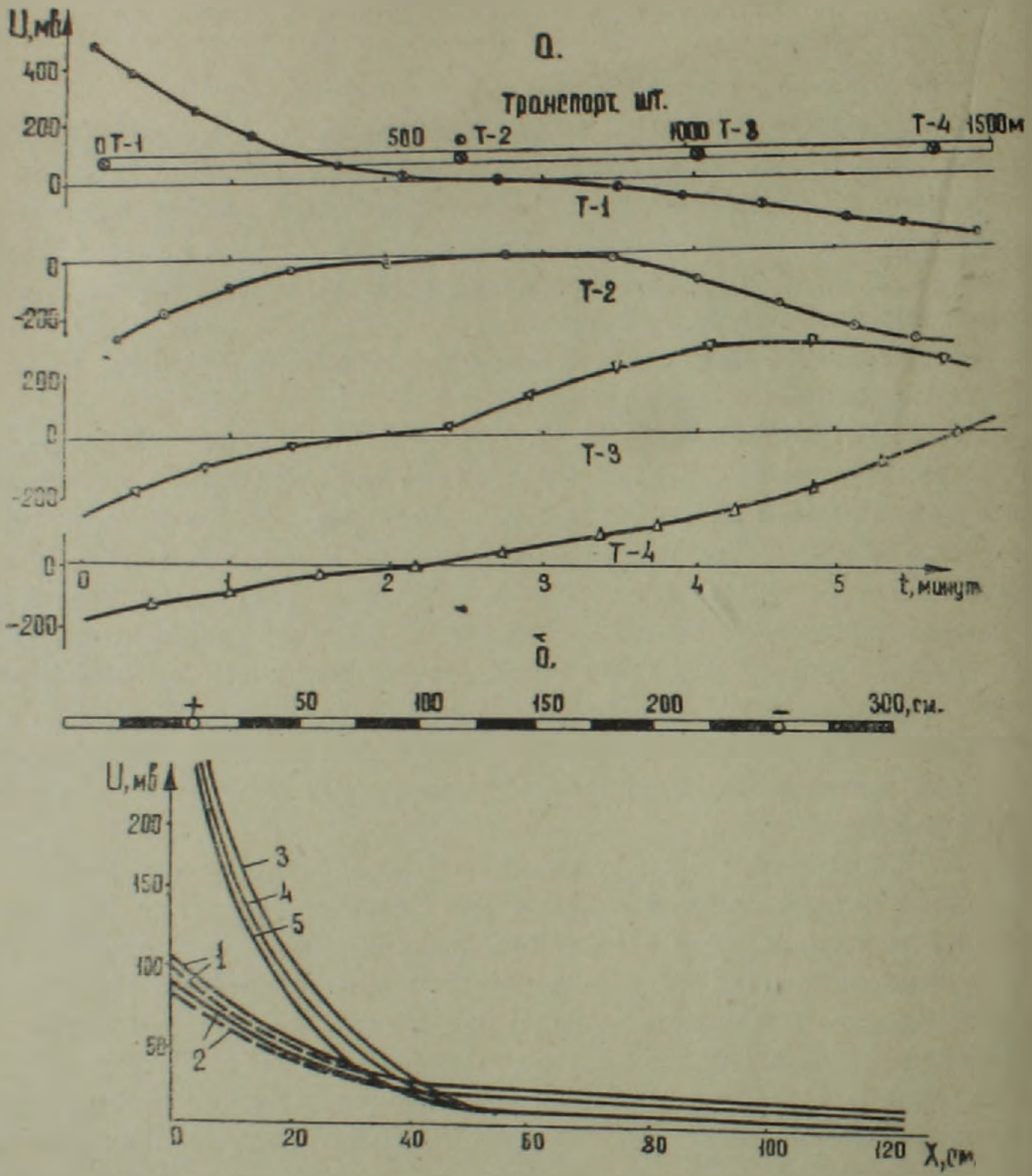

Рис. 1. Осредненные кривые осциллограмм потенциала блуждающих токов, полученные в прямой горной выработке при движении контактного электровоза—а и б—схема моделирования и графики потенциала от «линейно-двухполюсного» и «двухполюсного» источников. 1, 2—графики потенциала «линейно-двухполюсного» источника; 3, 4, 5—графики потенциала «двухполюсного» источника.

На точке 1, при расположении электровоза в сторону ее от отсасывающего щита, потенциал имеет положительный знак. Наибольшие отклонения кривой (до 560 *мв*) получены при нахождении электровоза на ближней от пункта наблюдения точке. По ходу приближения элек-

тровоза к отсасывающему щиту потенциал уменьшается и меняет знак при расположении электровоза в районе щита. С удалением электровоза от щита отклонения кривой возрастают. На точках 2, 3 и 4 наблюдается совершенно иной характер изменения потенциала блуждающих токов.

На рис. 2 представлены планы горизонтов подземных горных выработок (рис. 2а и 2б) и кривые изменения потенциала блуждающих токов, зарегистрированные на характерных точках при перемещении электровоза от устья до забоя разветвленной выработки, пройденной в «однородных породах» габбро (рис. 2а), осредненные кривые изменения потенциала блуждающих токов (а-1, а-2, а-3, а-4, а-5, а-6, а-7, а-8) и пересекающие хорошопроводящую рудную жилу (рис. 2б) осредненные кривые[1] потенциала блуждающих токов (б-1, б-2, б-3, б-4, б-5, б-6, б-7).

Потенциал блуждающих токов на точке 1 (рис. 2а) при нахождении электровоза в интервале пикетов 0—150 имеет положительный знак. Далее, после перехода электровоза через точку контакта отрицательного полюса источника с рельсами и по ходу его удаления от контакта, потенциал становится отрицательным и растет до значения 600 *мв*. При нахождении электровоза на перекрестке выработок зафиксирована локальная аномалия потенциала.

На точке 2 при всех положениях электровоза потенциал имеет отрицательный знак. Здесь, на перекрестке выработок, также выделяется локальная аномалия.

На точке 3 при нахождении электровоза за отсасывающим контактом (интервал пикетов 0—150) знак потенциала отрицательный. По ходу движения электровоза от устья выработки к точке контакта отсасывающей линии с рельсами абсолютное значение потенциала уменьшается. Далее потенциал возрастает. Осредненная кривая потенциала пересекает горизонтальную ось системы координат при нахождении электровоза в районе пикета 450.

На точках 4, 5, 6, 7 и 8 изменение интенсивности блуждающих токов по ходу движения электровоза от устья к забою имеет одинаковый характер. Во всех случаях по ходу приближения электровоза к точке наблюдения интенсивность блуждающих токов возрастает. Наибольшее значение потенциала зафиксировано на перекрестке горных выработок. В левом квершлаге (квш. 1), где имеется рельсовый путь, блуждающие токи интенсивнее, чем в правом, в котором рельсы отсутствуют.

Изменение блуждающих токов на горизонте горных выработок, пересекающих хорошопроводящую рудную жилу (рис. 2б), имеет такой же характер, как и на горизонте выработок, пройденных в «однород-

---

[1] Осредненные кривые получены путем вычисления среднеквадратичных значений табулированных данных осциллограмм. Частота табуляции составляет 1 *сек*. Для каждого осредненного значения использованы 7 членов с перекрытием на 3 точках.

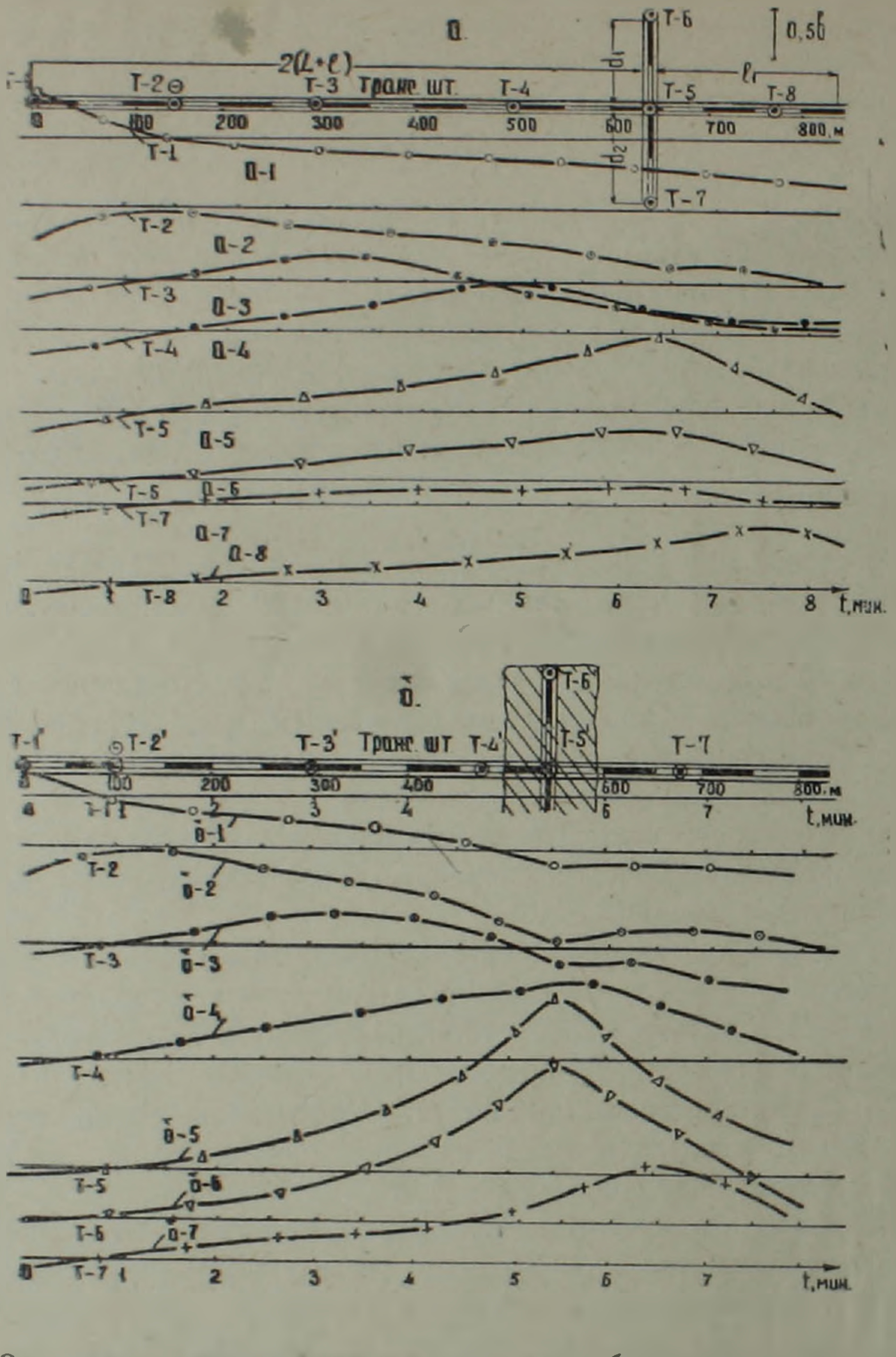

Рис. 2. Осредненные кривые осциллограмм потенциала блуждающих токов, полученные в горных выработках при отсутствии—а и б—наличии рудного объекта.

ных породах» (рис. 2а). Отличие заключается в том, что при наличии хорошопроводящего рудного объекта интенсивность блуждающих токов значительно больше, чем при его отсутствии. Это явление служит признаком выявления хорошопроводящих рудных объектов, расположенных вблизи горных выработок [4].

При теоретических расчетах и лабораторно-модельных исследованиях принято:

1. Утечки тока от тяговой сети (контактная линия, рельсовая сеть и отсасывающие линии) происходят только от рельсов.

2. Рельсы с окружающей горной средой имеют контакт в любых своих Δl частях.

Изменение тока, стекающего по рельсам, при расположении электровоза на точке 0 и отсасывающего контакта на точке $2l$ (рис. 1 б) в интервале $0 \div l$ определяется формулой:

$$J = J_0 \left(1 - \frac{\Delta R_p}{\Delta R_k}\right)^i, \qquad (1)$$

а в интервале $l - 2l$ —формулой:

$$J = J_l \left(1 + \frac{\Delta R_p}{\Delta R_k}\right)^i, \qquad (2)$$

где $i = \dfrac{x}{\Delta l}$.

Δl —отрезок рельса с площадью контакта, равной своему поперечному сечению;

x —координата точки определения по отношению к точке 0 для формулы (1) и к точке l для формулы (2);

J_0 и J_l —величины тока, стекающего по рельсу на точках 0 и l;

ΔR_k —сопротивление контакта рельс—почва с площадью, равной площади поперечного сечения рельса;

ΔR_p —сопротивление отрезка рельса Δl.

Для временных рельсов типа р-18 [6], при сопротивлении окружающих пород 10^4 *омсм* $\Delta R_p = 1{,}084 \times 10^{-6}$ *ом*, $\Delta R_k = 1{,}1 \times 10^3$ *ом*.

Потенциал от подобного источника в однородной окружающей среде выражается формулой:

$$U = \frac{J_0 \rho_{ср}}{4\pi} \left[\int_0^l \frac{(1-k)^{l-\xi} d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + y^2 + z^2}} - \int_0^{-l} \frac{(1-k)^{l+\xi} d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + y^2 + z^2}} \right], \qquad (3)$$

где $K = \dfrac{\Delta R_p}{\Delta R_k}$.

По формуле (3) с помощью электронно-вычислительной машины «Минск-22» вычислены значения потенциала вдоль рельса при $y = 1$ *м*, $z = 0$ и $l = 10^3$ *м* и с сопротивлением окружающей среды, равным 10^3 *ом·м* (рис. 1б).

Для рельсов длиной $2(L+l)$ и расположением полюсов на точках $-l$ и l формула (3) принимает вид:

$$U = \frac{J_0 \rho_{ср}}{2\pi} \left\{ \frac{\alpha}{2(l+\alpha)} \left[\int_l^M \frac{(1-k)^{-(l-\xi)} d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + y^2 + z^2}} - \right.\right.$$

$$\left. - \int_{-l}^{-M} \frac{(1-k)^{-(l+\xi)} d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + y^2 + z^2}} \right] + \frac{2l+\alpha}{2(l+\alpha)} \left[\int_0^l \frac{(1-k)^{l-\xi} d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + y^2 + z^2}} - \right.$$

$$-\int_0^{-l}\frac{(1-k)^{l+\xi}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}\Bigg|\Bigg\}, \qquad (4)$$

где $M = L + l$.

Для рассмотрения распределения потенциала блуждающих токов от ответвленной сети транспортных выработок примем, что от транспортной штольни длиной $2(L+l)+l_1$ на пикете $2(L+l)$ под прямым углом ответвляются две квершлаговые выработки протяженностью d_1 и d_2 (рис. 2). Располагая начальную точку системы координат в центре полюсов источника на точке $L+l$ и направляя ось X по штольне, для распределения потенциала БТ получим следующее математическое выражение:

$$U=\frac{J_0\rho_{cp}}{2\pi}\Bigg[N_1\int_0^{l}\frac{(1-k)^{l-\xi}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}-N_2\int_0^{-l}\frac{(1-k)^{l+\xi}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}-$$

$$-N_3\int_{-l}^{M_1}\frac{(1-k)^{-(l+\xi)}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}+N_4\int_{l}^{M_2}\frac{(1-k)^{-(l-\xi)}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}+$$

$$+N_5\int_{M_2}^{M_3}\frac{(1-k)^{-(M_2-\xi)}\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+y^2+z^2}}+N_6\int_0^{d_1}\frac{(1-k)^{\eta}\,d\eta}{\sqrt{x^2+(y-\eta)^2+z^2}}+ \qquad (5)$$

$$+N_7\int_0^{-d_2}\frac{(1-k)^{\eta}\,d\eta}{\sqrt{x^2+(y-\eta)^2+z^2}}\Bigg|,$$

где $M_1=-(L+l)$; $M_2=l+l$; $M_3=l+l_1+L$

$$N_1=\frac{2l+L}{P};\ N_2=\frac{P-L}{P};\ N_3=\frac{L}{P},$$

$$N_4=\frac{P-(2l+L)}{P};\ N_5=N_4X\frac{l_1}{d_1+d_2+l_1};$$

$$N_6=N_4x\frac{d_1}{d_1+d_2+l_1};\ N_7=N_4x\frac{d_2}{d_1+d_2+l_1};$$

P—общая протяженность всех горных выработок.

В случае, когда квершлаговые выработки являются рудными или штольня пересекает рудные тела, в формуле (5) значение сопротивления контакта рельса с окружающей средой на различных участках будет различным, что влияет на распределение и интенсивность блуждающих токов.

Обозначив сопротивление контакта Δl части рельса с окружающими породами— R_{k1}, а с рудами— R_{k2}, можно получить формулу для распределения потенциала блуждающих токов от ответвленной сети

горных выработок, пересекающей рудные тела.

Лабораторно-модельные исследования для изучения характера распределения электрического поля от источника, подобного рельсу с движущимся по нему контактным электровозом, проводились в электролитическом баке. Рельс имитировала стальная проволока диаметром 0,2 *мм*, хорошопроводящую рудную жилу—медная пластинка размерами 40×25×0,4 *см*.

Поскольку в рассмотренных примерах модельные и натурные поля определяются одинаковыми математическими выражениями, то для моделирования поставленных задач требуется подобрать лишь соответствующие модели [5]. Исходя из этого, при помощи формул (1), (2) определены параметры $2(l+L)=300$ *см*, $\Delta l=0{,}78$ *мм* и $\rho_{ср.}=44{,}1$ *омм* (водный раствор медного купороса с концентрацией 4,4 *г/л*).

Как при полевых работах и теоретических расчетах, так и здесь изучение распределения поля проводилось для трех модификаций источника:

1. «Прямолинейный—двухполюсный» источник, расположенный в однородной среде;

2. «Прямолинейный-ответвленный—двухполюсный» источник, расположенный в однородной среде;

3. «Прямолинейный-ответвленный—двухполюсный» источник, пересекающий медную пластинку на точке развилки.

Во всех трех случаях стальная проволока, служащая моделью рельсов в штольне, располагалась по длинной оси бака, а ответвленная проволока и медная пластинка располагались перпендикулярно к ней.

Изучение распределения поля при первой модификации источника проводилось по профилям параллельно стальной проволоке на расстоянии от нее 0,2; 1; 5 *см*.

На рисунке 1б представлены схема моделирования и кривые распределения потенциала от «линейно-двухполюсного» (графики 1, 2) и «двухполюсного» (графики 3, 4 и 5) источников поля, полученные с помощью теоретических расчетов (пунктирные линии) и модельных работ (сплошные линии). Как представлено, потенциал от «линейно-двухполюсного» источника, подобного рельсу, по параллельным профилям имеет плавный ход по сравнению с потенциалом двухполюсного источника.

Лабораторно-модельные исследования поля от ответвленного источника, расположенного в однородной среде, проводились при четырех точках контакта положительного полюса со стальной проволокой, служащей моделью рельса в штольне (магистральная проволока). Такой подход к решению задачи преследовал цель определения роли расстояния полюсов на характер распределения и интенсивности поля блуждающих токов.

Рисунки 3 и 4а изображают изопотенциальные карты «двухполюсного линейного» источника, имеющего разветвление на точке $x=190$ *см* при четырех положениях контакта положительного полюса источника

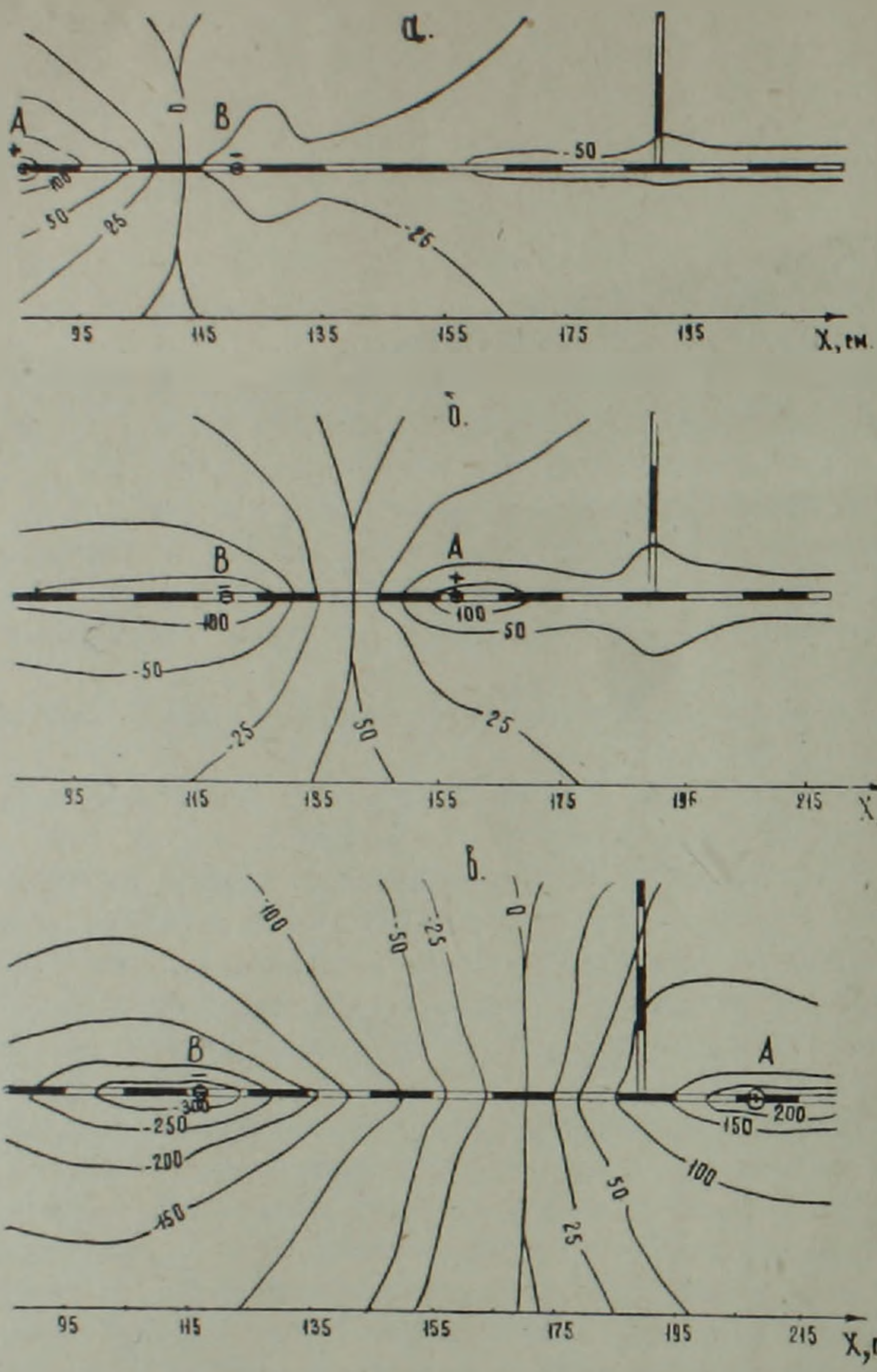

Рис. 3. Изопотенциальные карты «линейно-двухполюсных» источников с различными расстояниями полюсов, полученные лабораторно-модельными работами.

постоянного тока со стальной проволокой (А). Контакт отрицательного полюса источника (В) оставался постоянным—на точке x = 120 *см*.

При положении контакта А на точке x = 85 *см* (рис. 3а) изопотенциальная карта характеризуется асимметрией положительного и отрицательного полей и небольшими значениями (до 150 *мв*) потенциала. Положительное поле изопотенциальной карты по сравнению с отрицательным имеет локальный характер и большую интенсивность. Данное расхождение объясняется тем, что положительный полюс расположен ближе к концу стальной проволоки, чем отрицательный полюс. Отри-

цательное поле характеризуется вытянутыми изопотенциальными линиями и их раздувами на точке контакта В.

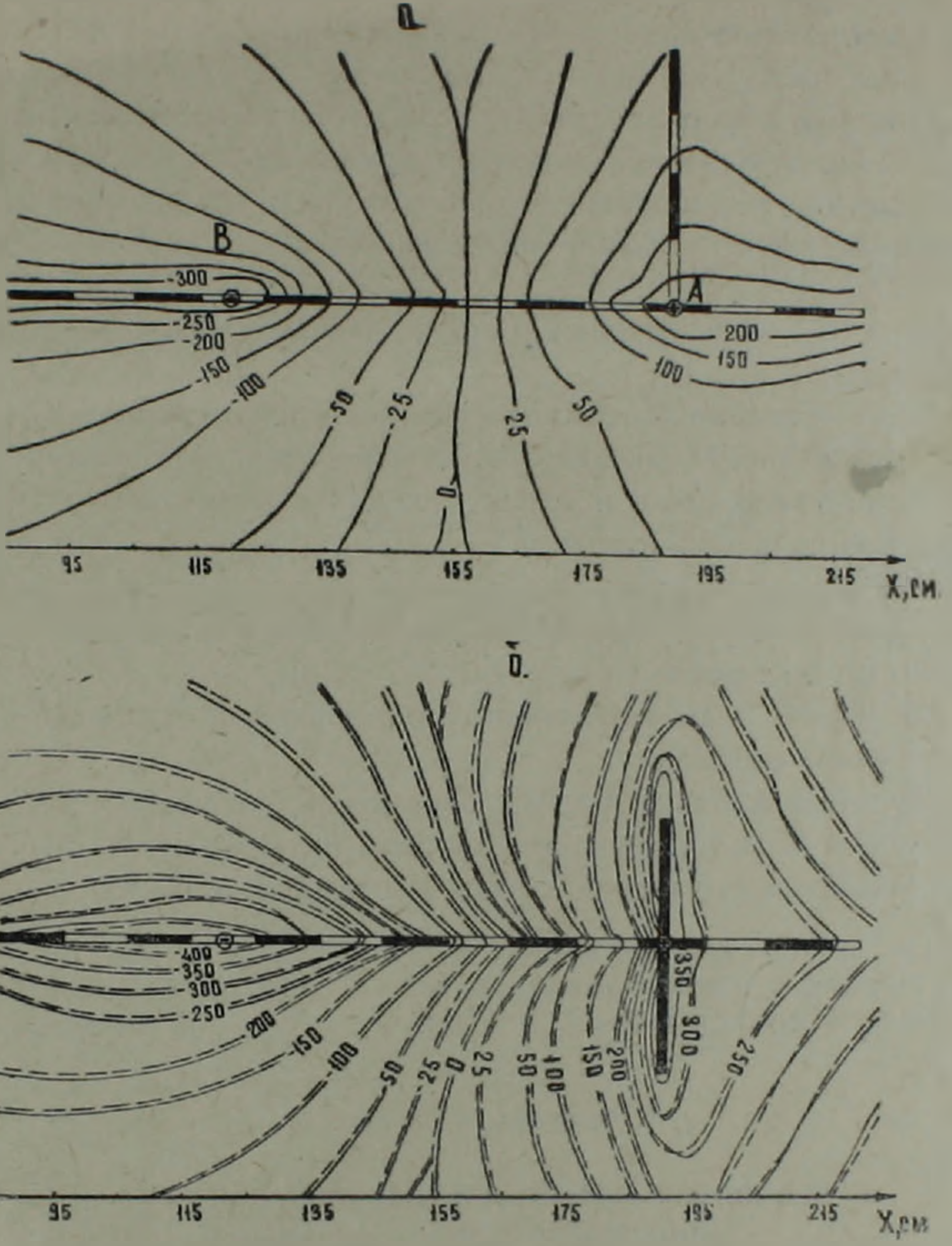

Рис 4. Изопотенциальные карты «линейно-дипольного» источника. полученные лабораторно-модельными работами (сплошные линии) и теоретическими расчетами (пунктирные линии), при отсутствии—а и б—наличии медной пластинки.

В отличие от рассмотренного примера поле «двухполюсного линейного» источника при положении контакта А на точке $x = 155$ *см* характеризуется более или менее сходными по размерам и значениям потенциала полюсами. Как в первом примере, так и здесь, в районе перекрещивания проволок, изолинии потенциала удаляются друг от друга, образуя раздувы.

По ходу удаления контакта А от отрицательного полюса (рис. 3б и 4а) интенсивность поля возрастает. Наибольшее искажение поля от стальной проволоки, служащей моделью рельсов в квершлаговой выработке, получено при положении контакта А на точке перекрещения проволок.

Рисунок 4 изображает изопотенциальные карты «линейно-двухполюсного» источника при наличии хорошопроводящего рудного объекта (рис. 4б) и при его отсутствии (рис. 4а). Изопотенциальные карты получены лабораторно-модельными работами (сплошные линии) и теоретическими расчетами (пунктирные линии). Сравнение представленных на рисунке 4 карт преследует цель изучения аномалии поля блуждающих токов от хорошопроводящих рудных объектов. Как представлено на рисунке, при наличии медной пластинки изопотенциальная карта характеризуется высокой интенсивностью и резким градиентом поля.

Исходя из представленных в статье данных, можно сделать следующие выводы:

1. Поле «линейно-двухполюсного» источника, подобно рельсам с движущимся по ним контактным электровозом, отличается от поля двухполюсного источника и характеризуется вытянутыми вдоль рельсов изопотенциальными линиями.

2. Интенсивность блуждающих токов определяется контактным сопротивлением рельсов с окружающими породами и расстоянием электровоза от отсасывающего контакта.

3. Сложность поля блуждающих токов зависит от сложности сети транспортных выработок.

4. Хорошопроводящие рудные объекты резко влияют на характер распределения поля БТ и увеличивают его интенсивность. Это явление служит признаком выявления и разведки рудных объектов.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики и инженерной сейсмологии
Академии наук Армянской ССР

Поступила 9.11.1976.

«ԵՐԿԲԵՎԵՌԱՆԻ–ԳԾԱՅԻՆ» ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ԹԱՓԱՌՈՂ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ԴԱՇՏԻ ԲՆՈՒՅԹԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածը նվիրված է հանքերում թափառող հոսանքների դաշտերի բնույթի ուսումնասիրմանը։

Տեսական հաշվումների միջոցով ստացված են հաստատուն հոսանքի աղբյուրի բևեռները միացնող գծային հաղորդիչի («երկբևեռանի-գծային» աղբյուր) դաշտը արտահայտող բանաձևեր։

Ներկայացված են թափառող հոսանքի պոտենցիալի փոփոխությունը պատկերող օսցիլոգրամներ՝ կապված էլեկտրաքարշերի տեղաշարժման հետ։ Բերված են նաև տարբեր երկրաբանական պայմաններում թափառող հոսանքների բնույթն արտահայտող կորեր և իզոգծերի քարտեզներ։

Հայտնաբերված են թափառող հոսանքների մեթոդով հանքորոշման նախանշաններ։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арутюнян Г. В., Бадалян С. В., Газарян Г. О., Гамоян В. Б.* и др. Комплексирование методов подземной геофизики при поисках глубокозалегающих рудных тел на колчеданных месторождениях Армянской ССР. Вопросы методики глубинных поисков рудных месторождений в Казахстане, вып. I. Алма-Ата. 1973.
2. *Березин Г. И., Семенов М. В.* Об использовании полей блуждающих токов для электроразведки флангов разрабатываемых месторождений. В сб. «Методика и техника разведки», № 86. Л., 1973.
3. *Богданчиков Л. П., Прицкер Л. С.* и др. Использование подземного электрического поля для решения некоторых задач на рудниках. В сб. «Вопросы рудной геофизики в Казахстане», № 2, Алма-Ата, 1958.
4. *Гамоян В. Б.* Некоторые вопросы метода блуждающих токов. Материалы Третьей республиканской конференции молодых научных работников Армении, посвященной 100-летию со дня рождения В. И. Ленина. Ереван, 1970.
5. *Гершгейн Г. М.* Моделирование полей методом электрической индукции. «Наука», Москва, 1970.
6. Справочник горного инженера. Госгортехиздат., Москва, 1960.
7. *Bezvoda Vaclav, Prachazka Josef.* Stray currents in geological prospection "Sb.. geol. Vcol", UG № 11, 1973.