

УДК 550.837

С. Ю. БАЛАСАНЯН

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА РУДНЫХ ОБЪЕКТАХ

В представленной работе предпринята попытка объяснения накопившихся к настоящему времени вопросов, связанных с применением метода естественных электрических полей (ЕП) на рудных объектах. Ключ к решению этой задачи видится в механизме образования ЕП.

Говоря о природе естественных электрических полей на рудных объектах, мы обычно представляем укоренившуюся в геофизике схему, изображенную на рис. 1.

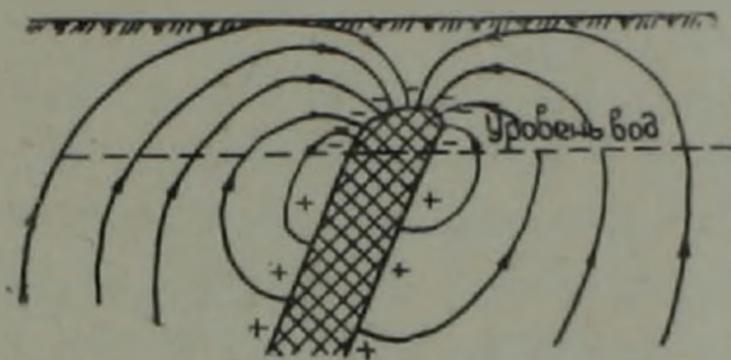


Рис. 1. Традиционная схема окислительно-восстановительных электрических токов поляризованного рудного тела.

Механизм образования ЕП по существующей до сих пор теории [5] объясняется следующим образом. Рудное тело и окружающая его среда образуют своего рода гальванический элемент, внешней цепью которого является само рудное тело, а внутренней—окружающая его ионная среда. Образование и действие этого гальванического элемента происходит так.

На границе электронного проводника с ионной средой существует скачок потенциала, величина которого зависит от свойств соприкасающихся сред и от физических условий, в которых они находятся.

Пространственное распределение потенциалопределяющих факторов обычно таково, что верхняя часть ионной среды на границе ее с проводником заряжается отрицательно, а нижняя—положительно. Вследствие этого наблюдаемые на поверхности поля имеют отрицательный знак. Различие в величине скачка потенциала создается и поддерживается внешними факторами, основным из которых является циркуляция подземных вод. Систематический приток кислорода к поверхности залежи, происходящий вследствие непрерывной циркуляции вод, обеспечивает сохранение достаточно высокого и постоянного во времени потенциала работающего катода и тем самым постоянство во времени Э.Д.С. рудной залежи.

Все вышеизложенное относится к сплошным рудным телам; что же

касается вкрапленных образований, то над ними возможны аномалии ЕП только в том случае, если они связаны между собой какими-либо токопроводящими капиллярами.

Тщательный анализ многочисленного полевого материала, полученного разными исследователями в самых различных рудных районах, привел нас к тому выводу, что вышеупомянутая схема образования ЕП, с вытекающими из нее положениями, верна лишь в частном случае, то-есть тогда, когда имеются условия, при которых работает приведенный механизм образования естественных полей. А ведь в природе возможны и есть ситуации, когда этих условий нет. Выходит так, что в этих случаях нет и ЕП. Но опыт геофизических исследований говорит о противоположном. Принятых предпосылок нет, а поле есть. Далее, аномалий нет (или же они положительные), а неглубоко залегающие рудные тела есть. Бывает и так, что аномалии имеются и довольно интенсивные, а рудных тел непосредственно под ними нет. Над вкрапленными рудными образованиями (необязательно соединенными токопроводящими каналами) аномалии ЕП все-таки наблюдаются.

С целью проверки нашего вывода о неуниверсальности существующей окислительно-восстановительной теории, был проведен специальный эксперимент, в котором был полностью исключен описанный выше окислительно-восстановительный механизм возникновения поля ЕП. В результате было установлено, что естественное поле на рудных образованиях возникает и без окислительно-восстановительного механизма. Эксперимент был проведен следующим образом.

В специальную ванну, заполненную раствором медного купороса, полностью погружались небольшие куски (приблизительно  $10 \times 6 \times 5$  см) сплошной и вкрапленной пиритовой и арсенипирит-пиритовой руды. Таким образом кусок руды был лишен и зоны окисления, и зоны восстановления, и циркуляции вод, которые обеспечивали бы сохранение достаточно высокого и постоянного во времени потенциала работающего катода.

Измерения осуществлялись на приборе микровольт-микроамперметре Ф-116/2 с большим входным сопротивлением. В качестве приемных электродов использовались неполяризующиеся меднокупоросовые датчики, собственная поляризация которых компенсировалась специальным устройством, основным элементом которого являлся германиевый диод Д2Е, освещаемый обычной лампой накаливания. Входное сопротивление такого компенсатора приближается к выходному сопротивлению идеального генератора тока и практически не шунтирует вход прибора.

В итоге на разных образцах руд (вкрапленных и сплошных) были установлены естественные потенциалы, абсолютные значения которых достигали  $\pm 100-600$  мкв (при пределе измерения прибора 750 мкв на шкалу). Полученные данные проверялись измерениями в той же ванне без присутствия кусков руды (здесь нам хотелось бы выразить искреннюю благодарность инженеру В. А. Кобыльскому за техническую помощь, оказанную им в проведении эксперимента).

Для подтверждения вывода о том, что окислительно-восстановительная теория носит частный характер и не объясняет множества вопросов, накопившихся в результате практических работ методом ЕП, приведем несколько примеров, взятых из монографии А. С. Семенова, посвященной методу естественных электрических полей [5].

На рис. 2 показаны графики ЕП над медными рудами на Дегтярском месторождении, из которых видно, что аномалии ЕП над рудными телами могут быть как отрицательными, так и положительными.

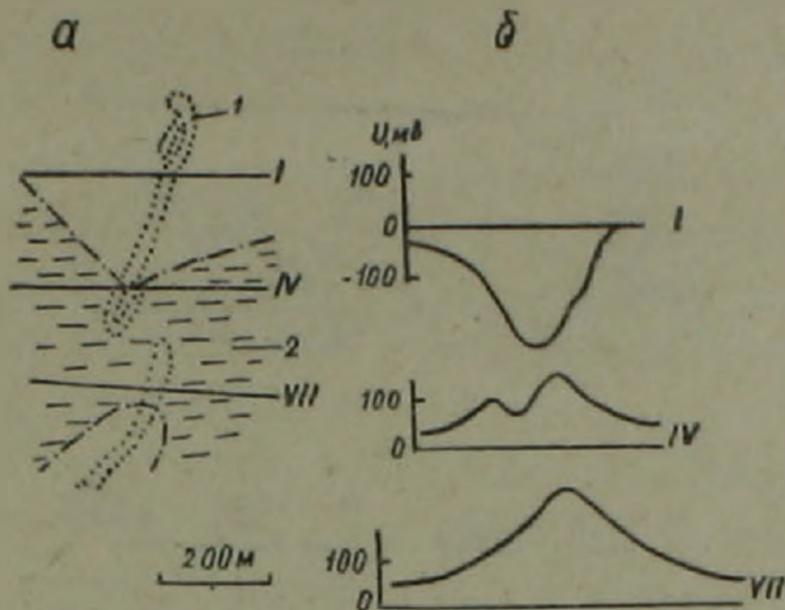


Рис. 2. План расположения профилей (а) и кривые потенциала естественного поля (б) на Дегтярском месторождении (по П. Ф. Радионову). 1—контуры рудного тела; 2—заболоченный участок.

Более того, над одной частью рудного тела могут наблюдаться отрицательные аномалии, а над другой—положительные.

На рис. 3 изображены кривые потенциала ЕП на месторождении Джусабай, которые также демонстрируют неприменимость существующей трактовки образования ЕП на рудных месторождениях, т. к. аномалии над рудными телами либо смещены в стороны, либо их вообще нет, а рудные тела есть.

В этом смысле интересны также данные, полученные по достаточно большому региону—Восточному Забайкалью, где над вкрапленными золото-полиметаллическими рудами обнаружены интенсивные аномалии ЕП, а над сплошными неглубоко залегающими рудными телами они либо существуют и часто смещены в стороны, либо их вообще нет [4].

Подобных примеров самого различного распределения потенциалов ЕП на дневной поверхности можно привести большое множество.

Объяснение фактически неинтерпретируемого с позиций окислительно-восстановительной теории материала нам видится в ином, нежели это было принято до сих пор, механизме образования ЕП на рудных объектах.

Как известно, на границе электропроводящих (рудное тело) и ионопроводящих сред (окружающая его среда) возникает двойной электрический слой. Не останавливаясь на природе его образования, которая может быть самой различной, отметим лишь несомненное следствие, исходящее из его возникновения. Это две области—плотнорасположенных

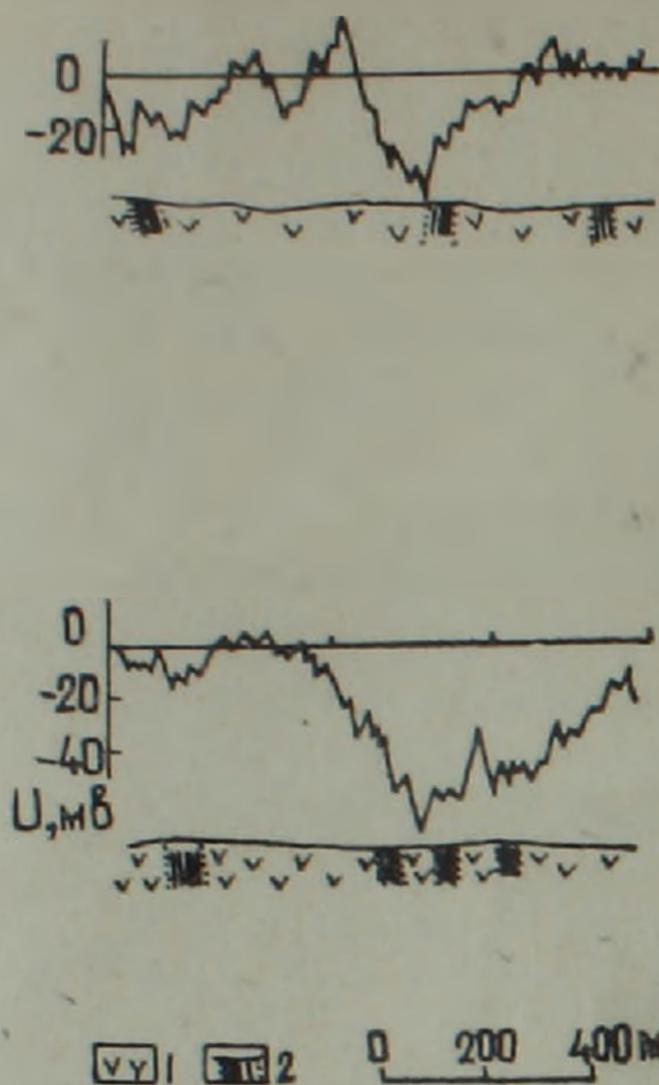


Рис. 3. Кривые потенциала естественного поля на месторождении Джусабай (по А. К. Аузину). 1—плагноклазовые пироксен-плагноклазовые порфиры и их туфы, ортофиры; 2—зоны осветления с кварцево-сульфидными жилами.

и диффузно распределенных положительных и отрицательных зарядов. Причем плотный ионный слой одного знака находится на поверхности рудного тела, а диффузный, другого знака, в окружающей его среде. Как зарядится та или иная область зависит от конкретных условий (причин) образования двойного слоя.

В нашем представлении при образовании двойного электрического слоя в геологических средах заряды передвигаются не только по нормали к границе раздела сред, но и вдоль нее, т. е. двойной электрический слой стремится к стационарному состоянию не только в направлении, перпендикулярном к контакту фаз (сред), но и в направлении, параллельном ему (рис. 4).

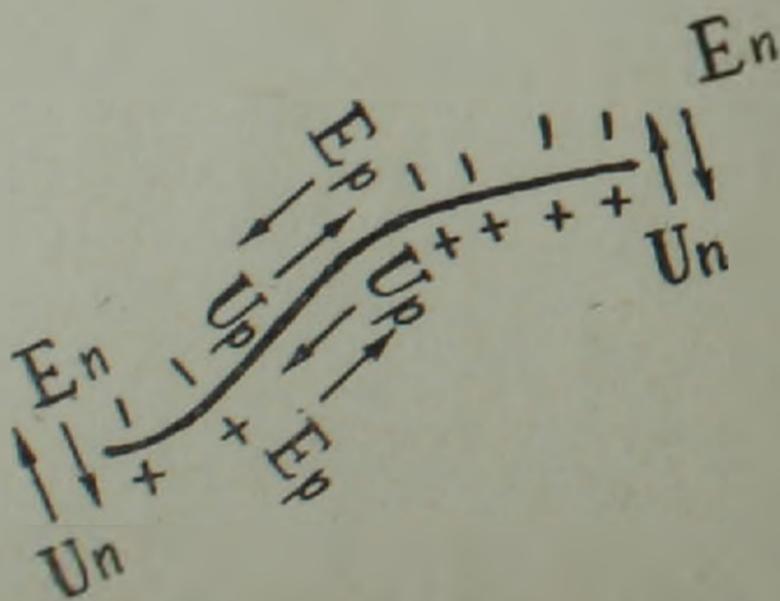


Рис. 4. Локальный участок схематически изображенного двойного электрического слоя на поверхности рудного тела.  $U_{(p,n)}$  — направление движения положительных зарядов.  $E_{(p,n)}$  — составляющие поля двойного электрического слоя на поверхности рудного тела.

В результате этого через некоторое время устанавливается некоторое стационарное, суммарное напряжение ( $E$ )

$$\vec{E} = \vec{E}_n + \vec{E}_p, \quad (1)$$

где  $\vec{E}_n$  и  $E_p$  —соответственно напряженности поля в направлении, перпендикулярном и параллельном границе раздела сред.

Поскольку условия образования и величина  $E_n$  хорошо описаны в специальных разделах физхимии и геофизики [2, 3], то мы остановимся на новой характеристике— $E_p$ , которая, как нам кажется, позволяет правильно представить общий механизм образования ЕП на рудных месторождениях.

Рассмотрим образование поля ( $E_p$ ) в объеме двойного электрического слоя в направлении, параллельном границе раздела сред.

Ввиду неравномерности распределения зарядов вдоль контакта граничащих фаз (сред), что связано с неизбежной неодинаковостью физических, химических и физико-химических свойств в этом направлении (т. к. трудно себе представить в реальных геологических условиях абсолютно гладкую поверхность раздела с абсолютно одинаковыми физико-химическими характеристиками соприкасающихся сред), происходит движение зарядов из области больших концентраций в область меньших. Перемещение зарядов приводит к образованию электрического поля ( $E_p$ ), противодействующего процессу миграции зарядов. Через некоторое время устанавливается динамическое равновесие, при котором перемещение зарядов, что эквивалентно некоторому току  $I_+$ , компенсируется обратным током  $I_-$ , обусловленным напряжением  $E^p$ , то есть

$$I_+ = I_-. \quad (2)$$

Плотность тока ( $I_+$ ) равна

$$j = Mq \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $M$ —коэффициент миграции, численная величина которого зависит от вещества, в котором происходит процесс миграции;  $q$ —величина мигрирующего заряда;  $\frac{\partial N}{\partial x}$ —градиент концентрации зарядов, под действием которого происходит миграция.

Исходя из формулы (3),

$$I_+ = Mq \frac{\partial N}{\partial x} S, \quad (4)$$

где  $S$ —поперечное сечение, через которое мигрируют заряды. Обратный ток

$$I_- = j_- \cdot S = \frac{E_p}{\rho_p} \cdot S, \quad (5)$$

где  $j$ —плотность обратного тока;  $S$ —имеет тот же смысл и величину, что и в уравнении (4);  $\rho$ —удельное электрическое сопротивление в направлении движения заряда, т. е. сопротивление вдоль границы раздела сред в области двойного электрического слоя.

Подставляя уравнение (4) и (5) в (2), получим:

$$E_p = M \cdot q \cdot \frac{\partial N}{\partial x} \cdot \rho_p. \quad (9)$$

Выражение (6) справедливо для каждого локального участка на поверхности рудного тела, где происходит миграция зарядов. Причем процесс миграции будет наблюдаться как в диффузной, так и в адсорбированной (плотнорасположенной) частях двойного слоя.

Таким образом в любой локальной области на поверхности рудного тела образуется такой двойной электрический слой, в котором всегда имеется как некоторый скачок потенциала вкост границы раздела фаз, так и определенный скачок потенциала вдоль этой границы в пределах одной и той же фазы (среды), причем как первый, так и второй скачки потенциалов взаимосвязаны.

Разность потенциалов, образованная вдоль границы раздела сред, в каждой области, где происходит процесс миграции, названа нами локальной разностью естественных «рудных» потенциалов, а образованный в этом же пространстве разделенный заряд—локальным естественным «рудным» диполем.

Поскольку подобные локальные естественные «рудные» диполи имеются по всей поверхности рудной залежи, то в результате сложения их величин образуется суммарный естественный «рудный» диполь и соответствующее ему суммарное естественное «рудное» поле.

Из вышеизложенного механизма возникновения естественных «рудных» полей нетрудно прийти к выводу о том, что расположение полюсов естественного «рудного» диполя на поверхности рудного тела будет зависеть от конкретных физических, химических, физико-химических условий и внешних факторов. Все эти влияющие характеристики могут быть в реальных геологических условиях какими угодно, поэтому расположение полюсов естественного «рудного» диполя становится неоднозначным, а это приводит к тому многообразию форм распределения естественного потенциала на поверхности земли, которое и наблюдается на практике.

Мы не станем приводить аналитического расчета внешнего поля, образованного «рудным» диполем, так как эта задача принципиально не отличается от аналогичных задач, решенных для обыкновенного электрического диполя в теории поля [1], а приведем лишь характерные графики распределения естественного потенциала на поверхности наблюдения при различных положениях полюсов естественного «рудного» диполя на поверхности рудного тела (рис. 5).

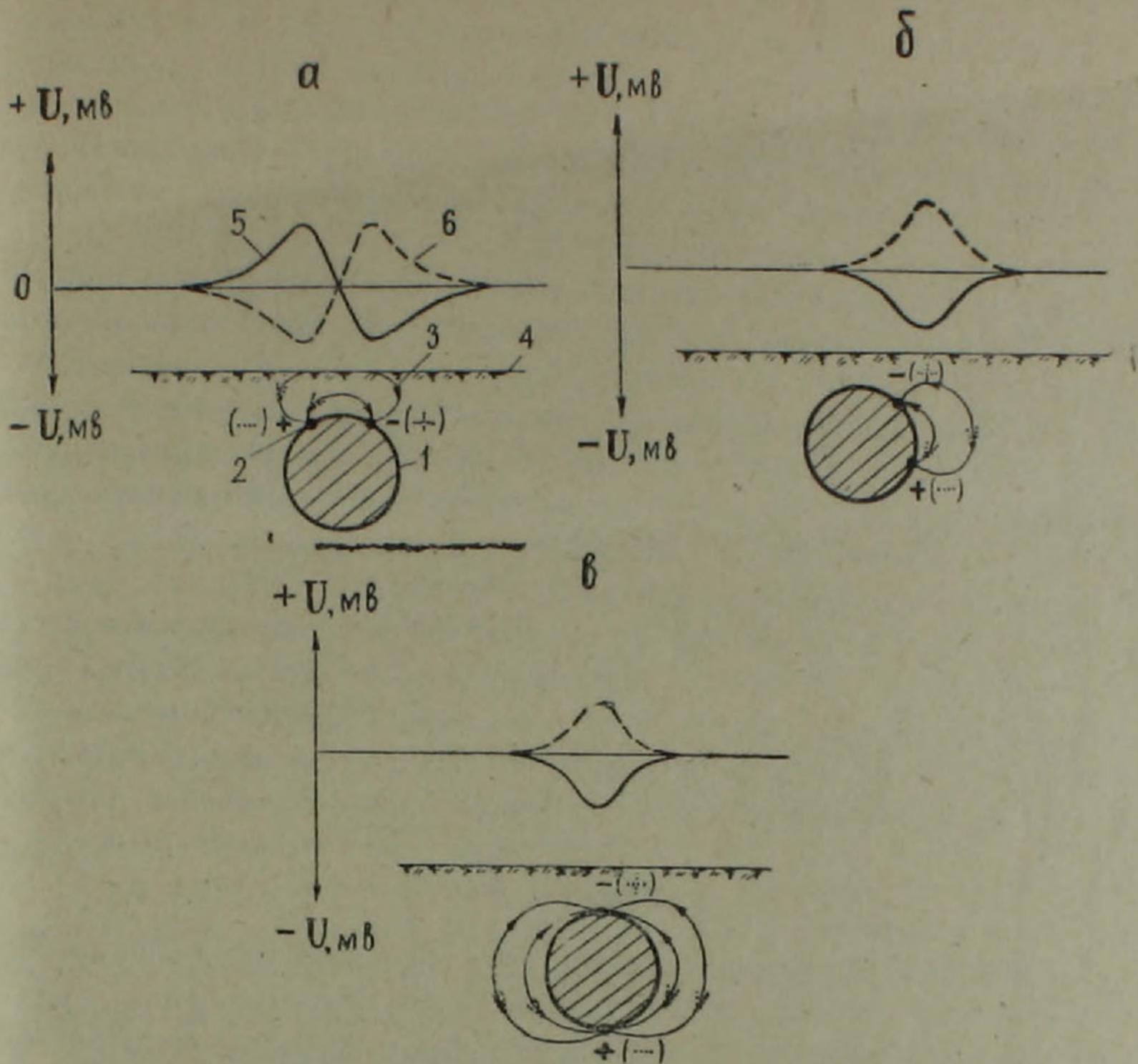


Рис. 5. Характерные графики распределения естественного потенциала на поверхности наблюдения при различных положениях полюсов естественного «рудного» диполя на поверхности рудного тела. 1—рудное тело; 2—полюса естественного «рудного» диполя; 3—силовые линии; 4—поверхность наблюдения; 5—график ЕП, соответствующий полярности, обозначенной сплошной линией; 6—график ЕП, соответствующий полярности, обозначенной пунктирной линией.

Из рис. 5 видно, например, в случае (а) над разными частями одного и того же рудного тела наблюдаются как отрицательные, так и положительные аномалии ЕП. Именно такое распределение полюсов «рудного» диполя и наблюдалось, по-видимому, на Дегтярском месторождении (рис. 2).

На том же рис. 5, случай (б) демонстрирует смещенную от центра тела отрицательную аномалию ЕП, которая может быть и положительной, если ближе к поверхности окажется положительный полюс. Смещение аномалии может наблюдаться в любую от рудного тела сторону. Этот случай должен наиболее часто встречаться на практике, т. к. вероятность того, что полюса «рудного» диполя будут занимать предельное положение, изображенное в случае (а), очевидно невелика. Кстати, практика хорошо подтверждает этот вывод, т. к. отрицательные или положительные аномалии ЕП над рудными образованиями чаще всего бывают смещенными относительно центра тела.

Помимо вышерассмотренных вариантов на практике возможны и нередко встречаются случаи, когда над рудными телами, даже неглубоко залегающими, аномалии ЕП не наблюдаются. Это может быть тогда, когда сумма локальных «рудных» диполей по поверхности рудного тела приводит к относительно скомпенсированному суммарному естественному «рудному» диполю.

До сих пор нами рассматривался механизм образования и проявления ЕП применительно к сплошным рудным телам. Что же касается вкрапленных рудных образований, то здесь каждое вкрапление действует, как отдельный естественный «рудный» диполь, а множество вкраплений — как сумма «рудных» диполей. Поле над такими образованиями должно наблюдаться не менее интенсивное, чем над сплошными рудными телами, и в отличие от последних прямо над рудной залежью. Этот вывод хорошо подтверждается и на практике.

Таким образом в отличие от окислительно-восстановительной теории, механизм естественного «рудного» диполя полностью объясняет все встречающиеся в реальных условиях формы распределения поля ЕП, включая при этом в себя окислительно-восстановительный вид поля, как один из возможных случаев, встречающихся в природе.

### В ы в о д ы

1. Причиной образования естественных электрических полей на рудных месторождениях является неравномерность распределения зарядов в двойном электрическом слое как вкрест, так и вдоль границы раздела электронный-ионный проводник. В результате этого образуется естественный электрический «рудный» диполь, у которого расположение положительного и отрицательного полюсов относительно поверхности наблюдения может быть каким угодно, т. к. это зависит от конкретных физико-химических состояний и условий соприкасающихся сред и от внешних факторов.

2. Местоположение, форма, интенсивность и знак аномалии ЕП на поверхности наблюдения зависит, в основном, от расположения полюсов естественного «рудного» диполя относительно друг друга и плоскости измерения; степени скомпенсированности зарядов в двойном электрическом слое, образованном на поверхности рудного тела; соотношения сопротивлений рудного тела и окружающей его среды; глубины залегания рудного объекта и т. д.

3. Полученные данные дополняют и перестраивают не только имеющиеся до сих пор теоретические представления о природе процессов ЕП на рудных объектах, но и позволяют с новых позиций подойти к интерпретации результатов метода ЕП.

4. Новые представления позволят правильно оценить возможности метода ЕП и уточнить круг задач, решаемых им в каждом конкретном случае.

Ս. Յու. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ

ՀԱՆՔԱՅԻՆ ՕՔՅԵԿՏՆԵՐՈՒՄ ԲՆԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ  
ԴԱՇՏՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածի հիմնական նպատակը բնական էլեկտրական դաշտերի (ԲԴ) առաջացման մեխանիզմի պարզաբանումն է, որը պատկերացվում է ոչ թե մշտապես ջրով շրջապատված գալվանական էլեմենտի աշխատանքի ձևով, ինչպես ենթադրվում էր մինչև այժմ, այլ հանքային մարմնի մակերեսին առաջացած գումարային բնական էլեկտրական «հանքային» դիպոլի աշխատանքի ձևով, որը գոյանում է կրկնակի էլեկտրական շերտում էլեկտրոնային-իոնային հաղորդիչ սահմանադատման մակերեսի ինչպես լայնակի, այնպես էլ երկայնակի ուղղությամբ լիցքերի անհամաչափ տեղաբաշխման հետևանքով: Հանքամարմնի մակերեսին դիպոլի բեռների դիրքը և, հետևաբար, նաև ԲԴ-ի տեղը, ձևը, ինտենսիվությունն ու անոմալիայի նշանը կարող են ցանկացած արժեքներ ունենալ: Դա կախված կլինի շփման մեջ գտնվող միջավայրերի կոնկրետ ֆիզիկական, քիմիական, ֆիզիկա-քիմիական պայմաններից, ինչպես նաև արտաքին գործոններից:

Առաջ քաշվող նոր տեսական դրույթներն ապացուցվում են տարբեր հետազոտողների աշխատություններից քաղված գործնական օրինակներով: Ստացված տվյալները թույլ են տալիս նոր դիրքերից մոտենալ ԲԴ մեթոդի արդյունքների մեկնաբանմանը:

Նոր պատկերացումները հնարավորություն են ընձեռում ճիշտ գնահատել ԲԴ մեթոդի հնարավորությունները և ճշգրտել խնդիրների այն շրջանակը, որոնք լուծվում են այդ մեթոդի միջոցով յուրաքանչյուր կոնկրետ դեպքում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Альпин Л. М. Теория поля. «Недра». М., 1966.
2. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов. «Мир», М., 1967.
3. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Госиздат технико-теорет. литературы. М., 1951.
4. Сейфуллин Р. С., Гребеншиков Ю. С., Красников В. И. Поиски золото-сульфидных месторождений в Восточном Забайкалье с применением геофизических методов. Изд. ОНТИ—ВИЭМС, сер. регион. развед. и промысл. геоф. № 28. М., 1969.
5. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. «Недра», Л., 1974.