

## ФИЗИКА ПОЧВ

УДК 631.43

А. Ф. ВАДЮНИНА, А. И. ПОЗДНЯКОВ

О ПРИЧИНАХ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЧВЕ И ЕГО ПРИРОДЕ

Рассмотрены причины и механизм возникновения стационарного электрического поля постоянных токов в почве. Показано, что ионы натрия в светло-каштановых почвах и кальция в дерново-подзолистой почве подчиняются распределению Больцмана. По измеренным величинам электрических потенциалов можно судить о характере варьирования концентраций этих ионов в исследованных почвах и применять параметры естественного электрического поля для описания неоднородности почвенного покрова.

Наблюдения за электрическими полями естественной природы широко используются в геофизике при разведке рудных залежей [10, 13] и при решении ряда гидрогеологических задач [1, 2, 11].

Исследования нефтяных, а также специальных гидрогеологических скважин часто проводят путем их каротажа по методу PS, аналогичному методу естественного электрического поля.

Хотя большинство геофизических исследований ведут на дневной поверхности, т. е. непосредственно на поверхности почвы, однако электрические поля, возникающие в почве и являющиеся помехами при этих исследованиях, специально не изучали. Поэтому в литературе по геофизике можно найти лишь самые общие соображения о факторах, влияющих на величину естественного электрического поля в почве.

В чисто почвенных исследованиях наблюдения за естественными электрическими полями проводили крайне мало, хотя, как отмечают некоторые авторы, они могут быть весьма полезными при описании различных неоднородностей почвенного покрова [7, 9].

Широкому внедрению исследований неоднородности почвенного покрова с помощью измерений потенциалов естественного электрического поля в практику почвенных исследований препятствуют, как недостаточная изученность характера изменений величин потенциалов электрического поля в разных почвах, так и отсутствие достаточно четких представлений о природе и причинах формирования электрических полей почв. Практические достоинства метода — простота измерений, малые затраты времени и труда, возможность проводить исследования *in situ* очевидны [13].

Измерения электрических полей почв светло-каштанового комплекса (Волгоградская обл.) и дерново-подзолистой почвы (Московская обл.) показали, что естественное электрическое поле в толще этих почв подчиняется определенным закономерностям.

1. Элювиальные горизонты дерново-подзолистых почв, солонцов и светло-каштановых почв имеют более высокие значения электрических

потенциалов (на 40—50 мв) по сравнению с иллювиальными горизонтами.

2. Величины потенциалов аккумулятивного горизонта дерново-подзолистых почв занимают промежуточные значения между величинами потенциалов иллювиальных и элювиальных горизонтов.

3. Потенциалы иллювиальных горизонтов светло-каштановых почв выше потенциалов солонцовых горизонтов на 15—25 мв ( $P=0,95$ ).

4. На границе горизонтов градиент электрических потенциалов наибольший.

Разберем возможные причины такого характера электрического поля почв. Для этого рассмотрим контакт двух однородных внутрипочвенных тел с различными концентрациями подвижных ионов ( $C_{i_1} > C_{i_2}$ ), а следовательно, различными химическими потенциалами ( $\mu_{i_1} > \mu_{i_2}$ ) для каждого иона.

В силу неравенств химических потенциалов, между телами будет происходить самопроизвольное взаимодействие, выражающееся в обмене вещества [12].

Если в обмене вещества участвуют заряженные частицы, в нашем случае ионы, то наряду с вещественной составляющей взаимодействия возникает и электрическая составляющая — электрическое поле на границе контакта тел, которое отражается в контактной разности потенциалов и препятствует дальнейшему перераспределению ионов.

Перераспределение электрических зарядов между телами будет происходить до тех пор, пока силы электрического поля с разностью потенциалов ( $\varphi_2 - \varphi_1$ ) между телами не прекратят передвижение ионов.

В классической термодинамике наивероятнейшее распределение носителей электрических зарядов в силовом поле выражается законом распределения Больцмана [12]:

$$\frac{C_{i_1}}{C_{i_2}} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^k \mu_{i_1} m_{i_1} - \sum_{i=1}^k \mu_{i_2} m_{i_2}}{kT} \right]. \quad (1)$$

Величина энергии в каждой точке системы двух тел складывается из химической и электрической энергии и может быть удобно охарактеризована величиной полного термодинамического потенциала активированной системы ( $z$ ), выражаемой через сумму потенциалов: потенциала Гиббса ( $F_{Гиббс}$ ) и электрического потенциала, численно равного работе по перемещению заряда в электростатическом поле  $zF(\varphi_2 - \varphi_1)$  [6]. В равновесном или стационарном состоянии системы величины ( $z$ ) в обоих телах должны быть равны между собой ( $z_1 = z_2$ ).

В этих условиях между электрическими и химическими потенциалами каждого вида ионов, участвующих в обмене, должны выполняться следующие зависимости: если  $z_1 = z_2$ , а  $C_{i_1} > C_{i_2}$  и, следовательно,  $\mu_{i_1} > \mu_{i_2}$ , то  $\varphi_1 < \varphi_2$  (2) (рис. 1, I).

Потенциалы Гиббса могут быть в свою очередь выражены через химические потенциалы  $F_{Г} = \sum_{i=1}^k \mu_i m_i$  (3) [12], Тогда

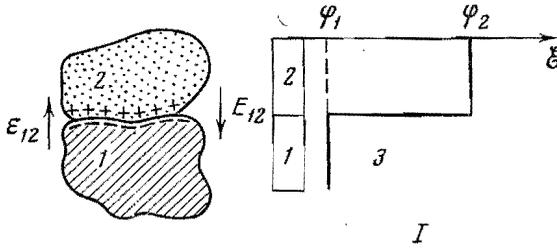
$$\sum_{i=1}^k \mu_{i_1} m_{i_1} - \sum_{i=1}^k \mu_{i_2} m_{i_2} = zF(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (4)$$

Подставляя в (1), получаем

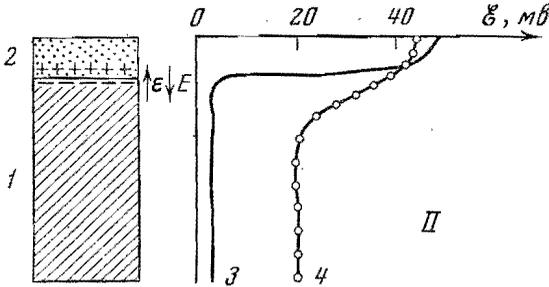
$$\frac{C_{i_1}}{C_{i_2}} = \exp \left[ -\frac{zF(\varphi_2 - \varphi_1)}{kT} \right], \quad (5)$$

где  $z$  — заряд иона,  $F$  — постоянная Фарадея,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура по Кельвину.

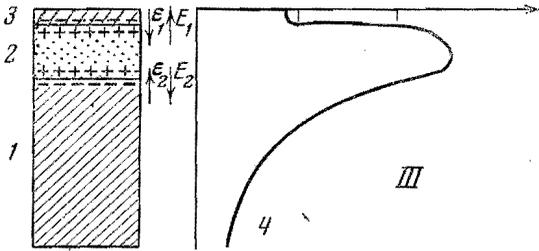
Таким образом, выражение (5) показывает, что зависимость между разностью электрических потенциалов двух точек почвенного покрова



I



II



III

$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	...	...	$\varphi_{n-1}$	$\varphi_n$
-------------	-------------	-------------	-------------	-----	-----	-----------------	-------------

IV

Некоторые характеристики распределения электрического поля в почве

I — распределение электрического поля (скачки потенциала) на границе контакта двух почвенных тел. (При  $z_1=z_2$ ;  $\mu_1>\mu_2$ ;  $C_1>C_2$ ;  $\varphi_1<\varphi_2$ ). 1, 2 — почвенные тела, 3 — график скачка потенциала на границе контакта тел 1 и 2; II — то же, в светло-каштановой почве. (При  $z_1=z_2$ ;  $\mu_1<\mu_2$ ;  $C_1<C_2$ ;  $\varphi_1<\varphi_2$ ). 1 — элювиальные, 2 — иллювиальные горизонты, 3 — график изменения величин потенциала электрического поля (или ЭДС) в профиле солонца, 4 — то же, в светло-каштановой почве; III — в дерново-подзолистой почве. (При  $z_1=z_2=z_3$ ;  $\mu_1>\mu_2<\mu_3$ ;  $C_1>C_2<C_3$ ;  $\varphi_1<\varphi_2>\varphi_3$ ). 1 — гор. A<sub>1</sub>; 2 — гор. A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>; 3 — гор. B<sub>1</sub>B<sub>2</sub>; 4 — график изменения ЭДС; IV — почвенный покров, как электрическая цепь элементарных однородных объемов генерирующих ЭДС.  
Пояснения в тексте

и концентрациями химических элементов, образующих подвижные ионы в этих точках, должна быть экспоненциальной, и может отражаться законом распределения Больцмана. Упрощенная интерпретация закона Больцмана для рассматриваемого случая может быть выражена сле-

дующим образом: чем меньше концентрация какого-либо индивидуального иона в определенной точке почвенного тела, тем большей должна быть (при стационарном состоянии системы) составляющая электрической энергии в полном термодинамическом потенциале. Другими словами, чем ниже концентрация материальных частиц (ионов) в определенной точке почвенного тела, тем выше должен быть их потенциальный уровень (электрический потенциал), что и описывается законом распределения Больцмана.

Возникновение и поддержание электрического поля на границах раздела почвенных неоднородностей происходит за счет другого, не электрического вида энергии. Вообще говоря, это может быть любой вид энергии, но в почвенных условиях энергия на возникновение и поддержание электрического поля чаще всего непрерывно пополняется за счет неравномерно распределенной химической энергии, что в электрохимии получило свое выражение в понятии сторонних электродвижущих сил ( $\mathcal{E} \sim E$ ) [14].

Контактная ЭДС сторонних сил поддерживает между телами 1 и 2 равную ей контактную разность потенциалов (или скачок)  $\varphi_2 - \varphi_1$ :

$$E_{12}^{cnp} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (6)$$

Контактные ЭДС аналогичного вида возникают на границе металл — раствор, на границе между различными растворами электролитов, между коллоидными частицами и раствором, на границе твердых диэлектриков, на границе металл — полупроводник, между твердой и жидкой фазой при промерзании воды и, как видим, охватывают обширный ряд природных явлений.

Краев указывает: «Какой бы ни был контакт, он по своей сущности всегда связан с тем или иным процессом, причем часто установившимся и обеспечивающим существование стационарного токового поля» ([10], стр. 182).

Если принять, что естественное электрическое поле в почвах формируется вследствие контактных ЭДС на границах неоднородностей любого порядка, тогда процедура измерения естественных электрических потенциалов, сторонних ЭДС, представляется следующим образом.

Для определения величин сторонних ЭДС измеряют потенциал в различных точках ( $M$ ) почвенной толщи ( $\varphi_M$ ) по сравнению с потенциалом  $\varphi_N$  в одной, выбранной определенным образом, постоянной для исследуемого объекта точкой почвы ( $N$ ) [3, 13].

Поскольку измерения в конечном итоге сводятся к измерению электрического потенциала в различных точках почвы, то метод исследования ЭДС почв можно также назвать методом потенциала электрического поля с той оговоркой, что проводится измерение сторонних ЭДС, практически равных по величине разностям электрических потенциалов.

В зависимости от целесообразности и удобства можно употреблять любое из следующих выражений: ЭДС ( $E$ ) сторонних сил, сторонние ЭДС, разность потенциалов между определенными точками почвенного покрова, наконец, просто величина электрического потенциала, электрический потенциал в определенной точке почвенного тела, по сравнению с другой фиксированной точкой.

В связи с вышеотмеченным важно знать, влияет ли на измеряемую разность электрических потенциалов между двумя неоднородностями почвы окружающая их неоднородная почвенная толща?

Условно любое почвенное тело можно разбить на элементарные соизмеримые с электродом объемы, однородные внутри, но неоднородные между собой. Такие однородные почвенные объемы на контакте с соседними объемами будут создавать замкнутые двойные электрические слои.

Внешнее электрическое поле замкнутого двойного электрического слоя проводников 2-го рода равно нулю. Существование скачка потенциала на границе таких двойных электрических слоев не может быть обнаружено никакими измерениями, если при этих измерениях не совершается переход через двойной электрический слой, т. е. через границу почвенных тел [10, 14].

Таким образом, задача выявления неоднородности почвенного покрова, варьирования свойств почв по изменению величин сторонних ЭДС сводится к измерению электрических потенциалов непосредственно в этих неоднородностях.

Покажем, что измеряемая ЭДС между точками определяется лишь контактной разностью потенциалов между элементарными однородными внутри приэлектродными объемами почвы и не зависит от промежуточных ЭДС в цепи. Однородные объемы почвы составляют неправильно разомкнутую цепь, так как свойства в двух различных точках измерения ЭДС, вообще говоря, неодинаковы.

Разность потенциалов между первым и последним телами равна алгебраической разности потенциалов в местах соприкосновения всех тел (2-е следствие из 1-го положения Вольта) [14]

$$\varphi_1 - \varphi_n = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = \varphi_1 - \varphi_n.$$

Потенциал каждого из промежуточных неоднородностей почвы обязательно встречается дважды, но с противоположными знаками. Поэтому все они исключаются и разность потенциалов между концами цепи определяется контактной разностью потенциалов между концевыми членами цепи, т. е. неоднородностью потенциалопределяющих свойств в точках измерения ЭДС.

Поэтому по измеренным на поверхности почвенного покрова разностям естественных электрических потенциалов невозможно получить достаточно объективную информацию о всей почвенной толще или значительной ее части. Для того чтобы получить электрический потенциал определенной неоднородности по сравнению с другой, необходимо установление измерительных электродов непосредственно в эти неоднородности. Разности же электрических потенциалов в двух точках почвенного покрова будут определяться различиями в свойствах лишь приэлектродных объемов почвы.

Исходя из предложенной модели о формировании естественных электрических потенциалов на границе контакта двух почвенных тел, рассмотрим закономерности изменения электрического поля в исследованных почвах.

В светло-каштановых почвах с двучленным строением профиля на границе между элювиальным и иллювиальным горизонтами обнаружен скачок потенциала. Для иллювиальных горизонтов почв с более высокой концентрацией подвижных ионов, чем в элювиальных горизонтах, а следовательно, и с более высокими химическими потенциалами этих ионов, будут наблюдаться более низкие электрические потенциалы, так как полные термодинамические потенциалы при стационарном состоянии почвенной толщи должны быть выровнены. В силу этого иллювиальные горизонты светло-каштановых почв будут также иметь более высокие электрические потенциалы, чем солонцовые горизонты (рис. 1, II).

В дерново-подзолистых почвах с трехчленным строением профиля элювиальные горизонты с малыми концентрациями подвижных ионов занимают промежуточное положение в профиле, между обогащенными подвижными ионами аккумулятивно-гумусовыми и иллювиальными горизонтами. Распределение естественных электрических потенциалов также согласуется с предложенной схемой. В элювиальных горизонтах

электрический потенциал более высокий, чем в аккумулятивно-гумусовом и иллювиальных горизонтах (рис. 1, II).

Понятно, что в почвенных условиях сторонние ЭДС действуют на всем протяжении почвенной толщи, т. е. ЭДС сторонних сил распределена в пространстве, поскольку чаще всего происходит постепенное изменение величин химических потенциалов (концентраций подвижных ионов) от точки к точке.

В пределах однородных объемов почв, где практически не изменяются концентрации подвижных ионов от точки к точке, наблюдаются и мало изменяющиеся электрические потенциалы.

На границах же различных почвенных горизонтов (элювиальных с иллювиальными) происходит изменение химического потенциала более резко («скачкообразно»). Поэтому можно говорить о сосредоточенной ЭДС (рис. 1, II; III).

Как видим, на границе двух различных почвенных горизонтов, с различными химическими потенциалами, существует электрическое поле, направленное против сторонних электродвижущих сил.

Иными словами, дифференциация почвенной толщи вследствие почвообразующих процессов приводит к возникновению градиентов химических потенциалов, которые при стационарном состоянии сформировавшегося почвенного покрова уравновешены градиентами потенциалов стационарного электрического поля постоянных токов.

Поскольку за формирование неоднородности почвенного покрова определенной территории ответственны процессы, присущие этой территории, то их «напряженность» и будет в конечном итоге опосредоваться в напряженности электрического поля, в электрических разностях потенциалов.

Существование двух разнонаправленных процессов (аккумуляция и выщелачивания веществ почвы) ответственны за формирование в профиле дерново-подзолистой почвы двух противоположно направленных сторонних ЭДС ( $E_1$  и  $E_2$ ) и напряженностей электрических полей ( $E_1$  и  $E_2$ ). Вероятно, по соотношению величин  $E_1$  и  $E_2$  можно будет судить о преобладающем процессе. Если  $E_1 > E_2$ , то в зоне сосредоточения меньшей ЭДС, т. е.  $E_2$ , будут происходить процессы, аналогичные процессам, происходящим в электролитической ванне, что вызовет трансформацию электрической энергии в химическую и в силу этого подвижные химические соединения, аккумулируясь в зоне действия меньшей ЭДС ( $E_2$ ), способствуют формированию иллювиальных горизонтов.

Сосредоточению ионов определенного вида в пределах соответствующих горизонтов или объемов почвы способствует существование потенциального электрического барьера для этих ионов, что обуславливает стабильность почвенных образований. Ионы могут преодолеть этот барьер лишь при получении дополнительной энергии.

В пределах сформировавшегося профиля дерново-подзолистой почвы отмеченное наличие двух противоположно направленных барьеров электрических полей с напряженностями  $E_1$  и  $E_2$  может в какой-то мере влиять на процессы миграции ионов сквозь почвенную толщу. Можно полагать, что ионы, поступающие в почву с растворами из разложившегося опада, не могут задерживаться в элювиальных горизонтах дерново-подзолистой почвы, так как они хотя несколько и изменяют величину электрического потенциала этих горизонтов, но не выровняв его по профилю почвы, будут подвергаться действию одного из существующих электрических полей и распределяться соответственно установившейся величине электрического потенциала горизонтов почвы.

Аналогичные явления, по-видимому, будут наблюдаться в профилях светло-каштановых почв.

Таким образом, любое влияние на сформировавшийся почвенный покров, связанное с притоком энергии, вызовет изменение градиентов

химических потенциалов в определенных точках почвенного покрова, а вслед за ним произойдет изменение и градиентов потенциалов электрического поля. Поэтому появляется возможность по изменению величин электрических потенциалов для определенных точек почвенного покрова говорить об изменениях химических потенциалов, а следовательно, и концентраций ионов в этих почвах.

При рассмотрении причины возникновения контактной разности потенциалов на границе раздела двух однородных почвенных тел, мы считали, что прекратится перераспределение ионов тогда, когда сторонние силы уравновесятся с электрическими. Строго говоря, такого равновесия в открытых системах, каковыми являются почвы, быть не может. Действительно, сторонние ЭДС всегда изменяются (происходит постоянное изменение градиентов химических потенциалов), что вызывает изменение силы тока, и через некоторое время достигаются новые установившиеся значения параметров электрического поля. Такие поля называются медленноменяющимися или квазистационарными [6, 12].

Наблюдения за дневной динамикой ЭДС в светло-каштановых почвах в мае 1973 г. показали, что во влажной почве ( $\sim 15-20\%$ ) происходят весьма незначительные изменения ( $\sim 2-4$  мВ) ЭДС при абсолютной величине в 30—40 мВ, лишь при сильно иссушенной почве ( $< \text{МГ}$ ) могут происходить довольно сильные изменения величин потенциалов естественного поля, вслед за иссушением и нагреванием поверхностных слоев почв.

Поэтому во время обильного увлажнения ( $W > B_3$ ) стационарность естественного электрического поля постоянных токов выполняется.

Таким образом, проводить исследование химической неоднородности почвенного покрова целесообразно в период наибольшего увлажнения почвы, когда изменение ЭДС и токов за время исследования незначительно, а также мало влияние влажности как одного из потенциалопределяющих факторов.

Мгновенные значения токов и электрических потенциалов квазистационарных полей будут подчиняться всем законам постоянных токов.

Стационарное электрическое поле постоянных токов почв является потенциальным полем.

Поэтому взаимосвязь между концентрациями подвижных ионов и энергией стационарного электрического поля постоянных токов в почве, созданного наличием только одних контактных ЭДС на поверхностях раздела элементарных однородных объемов почвы, может также выражаться законом распределения Больцмана.

Понятно, что этому закону будут подчиняться лишь подвижные ионы, участвующие в передвижении на макрорасстояния. К ним, по всей видимости, следует отнести ионы почвенного раствора и катионы почвенного поглощающего комплекса. Ионы кристаллических решеток почвенных минералов отнесем к связанным зарядам, т. е. не участвующим в переносе электричества, а лишь самопроизвольно поляризующимся в естественном электрическом поле постоянных токов [14].

Поэтому в качестве обобщенного показателя плотности подвижных зарядов была выбрана суммарная концентрация адсорбированных ионов и ионов раствора.

Влияние связанных и подвижных (свободных) зарядов на величину электрического потенциала весьма различно. Известно, что присутствие поляризованных неподвижных зарядов в значительной мере может изменить процесс диффузии свободных зарядов, осложняя ее адсорбционными процессами, т. е. изменять химические потенциалы каждого индивидуального иона ( $\mu_i$ ), а вследствие этого и величину электродвижущих сил по сравнению с ЭДС, наблюдаемой на контакте чистых растворов электролитов [4, 5].

Скачок потенциала, наблюдаемый при «пересечении» границы контакта растворов; носящий название «диффузионного потенциала», зависит от валентности ионов, их подвижности и различия концентраций ( $C_1$  и  $C_2$ ).

Подвижности любого вида ионов в растворах, насыщающих каждую из двух контактирующих сред, существенно меняются по сравнению со значениями, наблюдаемыми при отсутствии сред [4, 5]. Величины чисел переноса катионов и анионов, сохраняя свой физический смысл, включают подвижности ионов двойного электрического слоя, образующегося на границе раздела твердой и жидкой фаз, что резко меняет их [4, 5]. Такого рода контактные ЭДС называют диффузионно-адсорбционными [4—5].

Вследствие полного отсутствия данных о конкретных механизмах возникновения электрического поля в почве, на данном этапе исследования представляется весьма затруднительным отнести его формирование за счет какого-либо конкретного механизма — диффузии, адсорбции или совместного их действия.

Поэтому здесь рассматривалось возникновение электрического поля в почвах с помощью общих понятий о контактных ЭДС без акцента на более конкретные процессы.

Исходя из вышеизложенного, зависимость между концентрацией определенного вида подвижных ионов (суммарной концентрацией адсорбированных ионов и ионов раствора) и величиной потенциала должна описываться уравнением вида  $y = Ae^{-bx}$ , где  $y$  — концентрация иона, мг-экв/100,  $x$  — величина электрического потенциала в мв.

После логарифмирования получаем

$$\begin{aligned} \lg y &= \lg A - b \lg ex, \\ \lg y &= K - Mx. \end{aligned}$$

Следовательно, зависимость между логарифмами концентраций и величиной электрического потенциала должна быть прямолинейной. С точки зрения оценки влияния различных потенциалопределяющих факторов больший интерес представляет не зависимость вида  $\lg y = f(x)$ , а та, в которой зависимой переменной является величина потенциала электрического поля, т. е.  $x = f(\lg y)$ .

После преобразования получаем

$$\begin{aligned} x &= \frac{\lg A}{b \lg e} - \frac{\lg y}{b \lg e}, \\ x &= B - c \lg y. \end{aligned}$$

Таким образом, как зависимость вида  $x = f(\lg y)$ , так и зависимость вида  $\lg y = f(x)$  прямолинейны.

Для того чтобы проверить это положение, были проведены измерения естественного электрического поля в профиле дерново-подзолистых почв (Московская обл.) и светло-каштановых почв (Волгоградская обл.). В точках измерений потенциалов проводили отбор образцов объемом 10 см<sup>3</sup>.

В дерново-подзолистой почве образцы отбирали в 20-метровой траншее на глубинах 5, 15, 25, 35, 45 см с шагом в 10 см. Для каждой глубины было проанализировано по 50 образцов, которые разбивались на две серии по 25 образцов на каждой из вышеуказанных глубин. Сравнение зависимостей «концентрация иона — величина электрического потенциала» для обеих серий образцов показало их полную адекватность. Поэтому здесь приведем результаты одной серии из 125 образцов.

Вытеснение катионов в раствор проводили 1 н раствором NaCl. В вытяжке определяли Mg, Ca комплексометрическим способом и Al по

Соколову. В образцах определяли также подвижные формы железа и марганца (вытяжка 1 н  $H_2SO_4$ ) \*.

Для светло-каштановых почв отбор образцов проводили также в 20-метровой траншее с шагом 10 см на глубинах 0, 15, 25 см. Вытяжки из почв готовили вытеснением 1 н  $NH_4Cl$ . В вытяжках определяли сумму Ca, Mg комплексометрическим методом. Определение Na проводили на пламенном фотометре.

Статистическая обработка экспериментального материала подтвердила теоретические предпосылки. Так, установлено, что зависимости  $\lg C_{Ca} = f(E)$  для дерново-подзолистых почв и  $\lg C_{Na} = f(E)$

Таблица 1

Уравнения и параметры уравнений связи величин потенциалов естественного электрического поля почв с различными их свойствами (Уравнения функций вида  $y=f(x)$ , где  $x$  — величина электрического потенциала,  $y$  — концентрация ионов)

Почва	Зависимая переменная	Диапазон варьирования	Вид уравнения связи	Величина коэффициентов уравнений	Доверительные границы коэффициентов ( $P=0,95$ )
Дерново-подзолистая	$\lg C_{Ca}$	1,00—12,0	$\lg C_{Ca} = K_1 - M_1 x$	$K_1$ 1,01 $M_1$ -0,016	1,01±0,09 -0,016±0,003
	$\lg C_{\Sigma(Ca, Mg, Al)}$	5,85—22,4	$\lg C_{\Sigma} = K_2 - M_2 x$	$K_2$ 1,07 $M_2$ -0,006	1,07±0,09 -0,006±0,001
	$\lg C_{Mg}; \lg C_{Al}$	0,1—4,0 1,0—5,0	Не выявлен	— —	—
	$\lg C_{MnO}; \lg C_{FeO}$	0—40 200—800	»	— —	—
Светло-каштановая	$\lg C_{Na}$	0,5—200	$\lg C_{Na} = K_1 - M_1 x$	$K_1$ 0,89 $M_1$ -0,032	0,89±0,01 -0,032±0,002
	$\lg C_{H_2O}$	8,0—40,0	$\lg C_{H_2O} = K_2 - M_2 x$	$K_2$ 1,39 $M_2$ -0,020	1,39±0,05 -0,020±0,004
	$\lg C_{(Na+Mg+Ca)=\Sigma_1}$	15,0—220	$\lg C_{\Sigma} = K_3 - M_3 x$	$K_3$ 1,58 $M_3$ -0,004	1,58±0,08 -0,004±0,001
	$\lg C_{(Mg+Ca)=\Sigma_2}$	15,0—220	Не выявлен	— —	—

$\lg C_{\Sigma(Ca, Mg, Na)} = f(E)$ ; для светло-каштановых почв являются прямыми вида  $\lg y = K - Mx$  соответственно теоретическим положениям (табл. 1, 2). Иными словами, распределение химических элементов, имеющих первостепенное влияние на величину электрических потенциалов, в частности распределение Ca в дерново-подзолистых почвах и Na в светло-каштановых почвах, подчиняется закону Больцмана.

Полученные результаты статистической обработки также показывают отсутствие сколь-либо заметной связи между абсолютным содержанием Mg и Al в дерново-подзолистой почве и величинами электрических потенциалов, измеренных в точках отбора образцов (табл. 1—2).

Отсутствие связей может быть обосновано малым варьированием концентраций этих элементов в исследуемой почве (табл. 1, 2) и довольно большой ошибкой определения по сравнению с диапазоном варьирования самого признака ( $d_{min}$  соответственно равны 0,37 и 0,23 мг-экв/100).

Наиболее существенной причиной будет, по всей видимости, тот факт, что горизонты, а также разновидности дерново-подзолистых почв района исследования не имеют статистически достоверных отличий по

\* Эти данные любезно предоставлены нам В. П. Самсоновой.

абсолютному содержанию Mg и Al [8], а следовательно, и не участвуют в закономерно изменяющемся генерировании ЭДС, а лишь создают некоторую неопределенность («шумы») в зависимости между концентрацией кальция и величиной электрического потенциала.

Не было отмечено также соответствия закону распределения Больцмана между содержанием железа или марганца в почвах и величиной электрического потенциала, так как кислотная вытяжка переводит в раствор значительные количества железа и марганца минеральной части почвы, т. е. связанных электрических зарядов.

Таблица 2

Уравнения и параметры уравнений связи свойств почв с величинами потенциалов естественного электрического поля  
(Уравнения функций вида  $x=f(y)$ , где  $x$  — величина электрического потенциала,  $y$  — концентрация ионов)

Почва	Независимая переменная	Диапазон варьирования	Вид уравнения связи	Величина коэффициентов уравнений	Доверительные границы и коэффициентов ( $P=0,95$ )
Дерново-подзолистая	$\lg C_{Ca}$	1,00—12,0	$x=B_1-C_1 \lg C_{Ca}$	$B_1$ 55,7 $C_1$ -49,4	55,7±13,0 -49,4±22,0
	$\lg C_{\Sigma(Ca, Mg, Al)}$	5,85—22,4	$x=B_2-C_2 \lg C_{\Sigma}$	$B_2$ 49,7 $C_2$ -24,7	49,7±10,7 -24,7±10,4
	$\lg C_{Mg}; \lg C_{Al}$ $\lg C_{FeO}; \lg C_{MnO}$	1,0—5,0 0—40 200—800	Не выявлен »	— —	— —
	$\lg C_{Al/\Sigma(Ca, Mg, Al)}$	0,07—0,95	$x=ay \pm b$	$a$ 50,6 $b$ 4,8	50,6±2,5 4,8±0,3
Светло-каштановая	$\lg C_{Na}$	0,5—200	$x=B_3-C_3 \lg C_{Na}$	$B_3$ 48,3 $C_3$ -22,3	48,3±14,3 -22,3±8,5
	$\lg C_{\Sigma(Mg, Ca)}$	15,0—40,0	Не выявлен	—	—
	$\lg C_{\Sigma(Na, Mg, Ca)}$	15,0—200	$x=B_3-C_3 \lg C_{\Sigma}$	$B_3$ 52,7 $C_3$ -14,2	52,7±13,8 -14,2±2,2
	$\lg C_{H_2O}$	1,2—25,0	$x=B_3-C_3 \lg C_{H_2O}$	$B_3$ 159,4 $C_3$ -80,4	159,4±12,4 80,4±20,8
	$\lg C_{Na/\Sigma(Na, Mg, Ca)}$	0,08—0,90	$x = -ay \pm b$	$a$ -50,3 $b$ 48,3	50,3±6,0 48,3±2,4

Интересно отметить, что между относительным содержанием натрия  $Na/\Sigma(Na, Mg, Ca)$  в светло-каштановой почве и величинами электрических потенциалов отмечается прямолинейная зависимость вида  $x = -ay \pm b$ , где  $y$  — относительное содержание натрия  $Na/\Sigma(Na, Mg, Ca)$ ,  $x$  — величины электрических потенциалов. Для относительного содержания алюминия  $Al/\Sigma(Ca, Mg, Al)$  в дерново-подзолистых почвах отмечена зависимость вида  $x = ay \pm b$  (табл. 2). Иначе, если в светло-каштановых почвах с увеличением доли Na в суммарной концентрации свободных носителей электрических зарядов происходит уменьшение величины потенциалов электрического поля, то в дерново-подзолистой почве наблюдается противоположная закономерность для Al, т. е. увеличение его относительного содержания приводит к увеличению электрических потенциалов.

Такого рода зависимости все же определяются, вероятно, только закономерным изменением Ca и Na в почвах, так как в отношениях закономерно изменяются лишь составляющие этих элементов.

Учитывая, что такого рода отношения играют важную роль как в исследовании дерново-подзолистых почв, где она отражает степень оподзоленности почв и может быть диагностическим признаком [8], а

для почв светло-каштанового комплекса показывает степень засоления Na, то наличие связей между относительным содержанием этих катионов и электрическим потенциалом дает возможность использовать величины потенциалов электрического поля для изучения характера и закономерностей варьирования данных свойств в этих почвах.

Все полученные закономерности между концентрациями химических элементов в точках измерения потенциалов и их величинами получены и справедливы лишь в том случае, когда влажность почвы во время измерений выше влаги завядания ( $W > B_3$ ).

Влажность почвы как фактор, способный изменять реальные концентрации почвенных растворов и подвижности ионов, также влияет на величины естественных электрических потенциалов (при  $W < B_3$ ), а зависимость между величинами потенциалов и процентным содержанием воды описывается экспонентой (табл. 1—2).

Для почв светло-каштанового комплекса зависимость величин естественных электрических потенциалов от влажности весьма четкая.

В дерново-подзолистой зоне, где влажность почв для всех объектов исследования была высокой ( $W > B_3$ ), ее влияние на величины электрических потенциалов крайне слабое и вид зависимости не выявляется.

Следовательно, распределение ионов Na в иллювиальных горизонтах светло-каштановых почв и Ca в дерново-подзолистых почвах подчиняется закону распределения Больцмана. Как видим, только специфические ионы почвенных тел являются ионами, определяющими величины электрических потенциалов поля постоянных стационарных токов. В светло-каштановых почвах это главным образом ионы натрия, а в дерново-подзолистой — кальция. Химические потенциалы этих ионов являются невыровненными в пределах почвенного покрова, вследствие чего и возникает электрическое поле вышеуказанной природы.

### Выводы

1. В почве на границе раздела неоднородностей любого порядка с различными физическими и химическими свойствами существует естественное электрическое поле постоянных токов с определенной разностью электрических потенциалов, поддерживаемое сторонними электродвижущими силами контактной природы.

2. Измеряемая ЭДС между двумя точками почвенного покрова определяется контактной разностью потенциалов только приэлектродных однородных объемов почвы и не зависит от промежуточных ЭДС.

3. Возникновение и поддержание электрического поля в почве происходит за счет неравномерно распределенной химической энергии — различных химических потенциалов подвижных ионов в отдельных точках почвенного покрова.

4. При стационарном состоянии почвенного покрова градиенты химических потенциалов подвижных ионов уравновешены градиентами электрического поля, а полные термодинамические потенциалы этих ионов выровнены. Вследствие этого во всех почвах элювиальные горизонты с более низкими значениями химических потенциалов подвижных ионов, чем в иллювиальных горизонтах, имеют и более высокие электрические потенциалы.

5. Напряженности электрического поля на границах различных генетических горизонтов являются потенциальными электрическими барьерами, что, по-видимому, может пояснить причины стабильности почвенных образований.

6. При  $W > B_3$  естественное электрическое поле почв является стационарным электрическим полем с незначительно изменяющимися параметрами, мгновенные значения которых подчиняются законам полей постоянных токов.

7. Взаимосвязь концентраций подвижных ионов определенного вида и энергией стационарного электрического поля постоянных токов почвы выражается законом распределения Больцмана. Главным образом распределения ионов Na в светло-каштановых почвах и Ca в дерново-подзолистых почвах подчиняются закону Больцмана.

8. Относительное содержание алюминия и натрия в исследованных почвах по-разному влияет на величину электрических потенциалов.

#### Литература

1. Альпин Л. М. Влияние среды на результаты наблюдений потенциалов фильтрации. В сб.: Геофиз. разведка, вып. 1. М., 1960.
2. Боровинская Л. Б. Об изучении фильтрации вод Волго-Донского канала по измерению потенциалов естественного электрического поля. Почвоведение, 1964, № 5.
3. Вадюнина А. Ф., Поздняков А. И. Изменение потенциалов электрического поля по профилю некоторых почв. Вестн. МГУ, 1974, № 4.
4. Вендельштейн Б. Ю. Исследование разрезов нефтяных и газовых скважин методом собственных потенциалов. «Недра», 1966.
5. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. Гостоптехиздат, 1958.
6. Калашников С. Г. Электричество. «Наука», 1970.
7. Карпачевский Л. О. и др. Неоднородность почвенного покрова в искусственных биогеоценозах. В сб.: Структура почвенного покрова и методы ее изучения. «Наука», 1973.
8. Карпачевский Л. О. Пестрота почвенного покрова и ее связь со структурой лесного биогеоценоза: Автореф. докт. дис. МГУ, М., 1972.
9. Китнис В. М. О возможностях применения метода естественного электрического поля при изучении пестроты почвенного покрова. Биол. науки, 1974, № 3.
10. Краев А. П. Основы геоэлектрики. «Недра», 1965.
11. Огильви А. А. Применение метода естественного поля для определения фильтрации воды из водохранилища. Гидротехн. строит., 1946, № 12.
12. Путилов К. А. Термодинамика. «Наука», 1971.
13. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. «Недра», 1968.
14. Тамм И. Е. Основы теории электричества. «Наука», 1966.

Факультет почвоведения  
МГУ

Дата поступления  
6.XI.1974 г.

A. F. VADYUNINA, A. I. POZDNYAKOV

#### ON THE MECHANISM OF FORMATION OF A NATURAL ELECTRIC FIELD IN SOILS

The reasons and the mechanism of formation in soils of a stationary electric field of constant currents are considered. It has been shown that Na ions in a light-chestnut soil and Ca ions in a soddy-podzolic soils follow Boltzmann distribution.