

ЗАВИСИМОСТЬ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ ОТ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия

Разработана концепция, объясняющая зависимость между логарифмом полного давления почвенной влаги (pF) и влажностью почв, деленной на их максимальную гигроскопическую влажность (W), на основе классического закона Больцмана и зависимости между электрическим потенциалом и расстоянием от электрически заряженной поверхности твердой фазы почвы. Концепция проверена на 7 главных генетических типах почв Европейской территории России. Корреляция между pF и W, в интервале полного давления почвенной влаги от -27 до -2600 бар, была очень тесной (-0.97 при уровне значимости ≤ 0.05).

Показано, что величина pF зависит от гидратации ионов диффузного слоя обменно поглощенных ионов почвы.

Ключевые слова: давление почвенной влаги, максимальная гигроскопическая влажность, твердая фаза, гидратация.

I. I. Sudnytsyn, A. P. Shvarov, E. A. Koreneva

Moskovskiy derzhavniy universitet im. M. V. Lomonosova, Rossiya

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ ВІД ПОВНОГО ТИСКУ ҐРУНТОВОЇ ВОЛОГИ

Розроблено концепцію, що пояснює залежність між логарифмом повного тиску ґрунтової вологи (pF) та вологістю ґрунтів, поділеною на їх максимальну гігроскопічну вологість (W), на основі класичного закону Больцмана та залежності між електричним потенціалом та відстанню від електрично зарядженої поверхні твердої фази ґрунту. Концепцію перевірено на 7 головних генетичних типах ґрунтів Європейської території Росії. Кореляція між pF та W в інтервалі повного тиску ґрунтової вологи від -27 до -2600 бар була дуже значною (-0.97 при рівні значущості ≤ 0.05).

Показано, що величина pF залежить від гідратації йонів дифузійного шару обмінно поглинутих йонів ґрунту.

Ключові слова: тиск ґрунтової вологи, максимальна гігроскопічна вологість, тверда фаза, гідратація.

I. I. Suudnytsyn, A. P. Shvarov, E. A. Koreneva

M. V. Lomonosov Moscow state university

DEPENDENCE OF THE SOIL MOISTURE CONTENT ON TOTAL SOIL MOISTURE PRESSURE

It was developed a concept of the relationships between a logarithm of the total soil moisture pressure (pF) and the soil moisture content, divided on its' maximum hygroscopic moisture content (W). The concept was advanced on the basis of the classical Boltzmann's law and relationships between the electrical potential and the distance from the electrically charged soil solid phase surface. It was tested on the 7 main genetic soil types of the European part of Russia. The correlation between pF and W, in the interval of total soil moisture pressure from -27 to -2600 bar, was very high (-0.97 at the sign level ≤ 0.05). It was shown that pF level depends on hydration of cations of the soil exchange complex.

Keywords: soil moisture pressure, maximal hygroscopic moisture, solid phase, hydration.

Степень увлажнения почв определяет не только скорость, но и характер протекающих в них физических, химических и биологических процессов, в том числе получение гарантированных высоких урожаев сельскохозяйственных культур в неустойчивых метеорологических условиях. При этом часто определяющее значение для создания оптимального водного режима растений имеет не столько количество влаги, содержащейся в почвах (их «влажность»), сколько ее энергетическое состояние («по-

тенциал», или «давление» почвенной влаги) (Глобус, 1986; Роде, 1965; Судницын, 1966, 1979, 2008; Шеин, 2005). Для его оценки обычно используют зависимость давления влаги (P) от влажности почв (W). Эту зависимость часто называют основной гидрофизической зависимостью (ОГХ). К настоящему времени определены ОГХ для многих тысяч почв и неоднократно делались попытки их обобщения с помощью математических выражений (Глобус, 1969, 1986; Злочевская, 1969; Роде, 1965; Судницын, 1979, 2008; Теории..., 2007; Шеин, 2005). В области влажности, меньшей максимальной гигроскопической, широко известны уравнения Генри, Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ, Фаррера, Сперанского, Сочеванова и др. (Злочевская, 1969; Роде, 1965; Судницын, 1979; Теории..., 2007). Однако все они выведены эмпирическим подбором для ограниченных групп почв и без длительной и трудоемкой экспериментальной проверки (верификации) не могут быть использованы для других почв, отличающихся от первых по физическим и химическим свойствам. Если же для каждой еще не исследованной почвы необходимо проводить экспериментальную проверку, то необходимость в таких эмпирических математических выражениях, естественно, отпадает. Следовательно, возникает тупиковая ситуация, выйти из которой можно будет лишь в том случае, если удастся создать обобщающее математическое выражение, выведенное на основании строгих физических законов без существенных упрощающих допущений. Попытка вывода такого строго теоретического математического выражения для восьми почв основных природных зон Европейской территории России была сделана одним из соавторов этой статьи еще в 1966 г. (Судницын, 1966). Однако оно охватывало довольно узкий диапазон P (от -15 до -200 атм). В 1979 г. были опубликованы данные для более широкого диапазона P (от -40 до -2000 атм), но лишь для двух черноземовидных почв. Только лишь в 2008 г. другими соавторами этой статьи были опубликованы данные (Шваров, 2008), позволяющие проверить справедливость этого математического выражения для большой группы почв России и сопредельных территорий.

Приведем краткий вывод этого математического выражения для диапазона влажностей, меньших максимальной гигроскопической влажности (и соответственно для $P \leq -30$ атм). В качестве исходной гипотезы примем хорошо известное положение о том, что главной причиной снижения энергетического состояния почвенной влаги (ее «связывания» твердой фазой почвы) является гидратация обменных ионов, находящихся в диффузном слое ионов, в пленке влаги, покрывающей поверхность твердой фазы почвы (Поздняков, 2008; Роде, 1965). Как известно, на поверхности твердой фазы почв, смоченной почвенной влагой, почти всегда имеются атомы, которые вступают во взаимодействие (взаимное притяжение – гидратацию) с молекулами воды и превращаются в гидратированные ионы. В результате они оказываются «оторванными» от этой поверхности и (под влиянием хаотического теплового движения) диффундируют в почвенный раствор. При этом тепловое движение стремится выровнять их концентрацию по всему объему раствора. Однако противоположно заряженная поверхность твердой фазы притягивает их к себе (Поздняков, 2008; Тамм, 1968), и в результате концентрация ионов в диффузном слое по мере приближения к этой поверхности возрастает. Зависимость между концентрацией ионов и расстоянием от заряженной поверхности описывается экспоненциальным законом Больцмана. Эта зависимость аналогична зависимости давления воздуха от высоты над уровнем моря, и поэтому иногда ее называют барометрическим законом.

Закон (уравнение) Больцмана часто записывается в виде (Поздняков, 2008)

$$C_z = C_0 \cdot e^{-F\psi/RT}, \quad (1)$$

где C_z – концентрация ионов диффузного слоя на расстоянии z от электрически заряженной поверхности твердой фазы почвы; C_0 – их концентрация на бесконечно далеком расстоянии от этой поверхности; e – основание натуральных логарифмов; F – заряд ионов; ψ – величина электрического потенциала на расстоянии z от поверхности твердой фазы; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура (град. К).

Известна также зависимость ψ от z (Карякин, 1962, с. 185-190):

$$\psi = \psi_0 - b z, \quad (2)$$

где ψ_0 – величина электрического потенциала на поверхности твердой фазы, а

$$b = 4\pi\eta / D, \quad (3)$$

где η – плотность электрических зарядов на поверхности твердой фазы; D – диэлектрическая постоянная почвенного раствора.

Логарифмируя уравнение (1) и подставляя в него (2) и (3), получаем

$$\ln C_z = \ln C_0 + F b z / RT. \quad (4)$$

Поскольку при W , меньшей максимальной гигроскопической, почвенная влага представляет собой пленку более или менее равномерной толщины (Роде, 1965), имеем

$$z = W / S, \quad (5)$$

где S – удельная поверхность твердой фазы почвы, m^2/g .

В то же время известно, что осмотическое давление влаги (P) равно (Злочевская, 1969):

$$P = - RT C. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4), группируя члены полученного уравнения и используя величину логарифма модуля (абсолютной величины) давления почвенной влаги ($|P|$), получим

$$\ln (|P|)_w = A_1 - B_1 \cdot W, \quad (7)$$

$$\text{где } A_1 = \ln (C_0 R T); \quad (8)$$

$$B_1 = - b F / S R T. \quad (9)$$

Предельно простое математическое выражение (7) характеризует зависимость между влажностью почвы (в диапазоне ее, меньшем максимальной гигроскопической влажности) и давлением почвенной влаги (ее энергетическим состоянием), причем между логарифмом модуля давления почвенной влаги $\{\ln (|P|)_w\}$ и влажностью почвы (W) существует прямолинейная обратная зависимость. В почвенно-физической литературе часто вместо $\ln (|P|)$ используют символ rF , обозначающий логарифм величины давления почвенной влаги, взятого с обратным знаком и выраженного в сантиметрах водного столба.

Для верификации уравнения (7) оно было сопоставлено с экспериментальными данными о зависимости между влажностью (в диапазоне ее, меньшем максимальной гигроскопической влажности) и логарифмом давления почвенной влаги для различных генетических горизонтов семи различных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты и методы были подробно описаны в нашей предыдущей публикации (Шваров, 2008), поэтому мы лишь кратко их перечислим.

В качестве объектов были использованы почвы основных биоклиматических зон Европейской территории России: супесчаная дерново-подзолистая и среднесуглинистая серая лесная в Московской области, чернозем обыкновенный среднесуглинистый в Тамбовской области, светло-каштановая среднесуглинистая (Волгоградская обл.), среднесуглинистые бурая полупустынная и солончак (Астраханская обл.), глинистый краснозем (Грузия, г. Чаква). В каждой почве были взяты образцы из трех основных генетических горизонтов. В лабораторных условиях образцы, увлажненные до полевой влагоемкости, последовательно (до достижения равновесия) выдерживали в эксикаторах над насыщенными растворами солей при относительных влажностях воздуха 0.98, 0.86, 0.55, 0.32 и 0.15, соответствующих полному давлению почвенной влаги -27 , -200 , -800 , -1550 и -2600 атм (бар). Равновесная относительная влажность воздуха, равная 0.98 ($P = -27$ атм), соответствует максимальной гигроскопической влажности почв (МГ).

Всего было получено 105 экспериментальных точек (7 почв – 3 горизонта – 5 уровней давления влаги). Для того чтобы можно было использовать данные, полученные для разных горизонтов различных генетических типов почв, в качестве единой физической статистической совокупности элементов опробования, все данные о влажности почв были нормированы делением их на величину МГ (Дмитриев, 1995). Поскольку почвенная влага при $W \leq MГ$ представляет собой пленку, более или менее равномерно выстилающую поверхность твердой фазы (Роде, 1965), то эти нормированные данные (W_n) означают толщину пленки при данном P , выраженную в долях от толщины ее при МГ (таблица).

**Удельная поверхность, максимальная гигроскопическая влажность
и нормированная по МГ влажность почв при различных значениях рF**

Почва	Горизонт, глубина, см	Удельная поверх- ность, м ² /г	Максимальная гигроскопиче- ская влаж- ность, %	Значение рF				
				4.43	5.3	5.9	6.2	6.42
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дерново- подзолистая	A ₁ 10–15	25	5.0	1.0	0.78	0.52	0.43	0.39
	A ₂ 20–25	25	3.2	1.0	0.70	0.51	0.46	0.35
	B 80–100	53	8.1	1.0	0.71	0.47	0.38	0.28

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серая лесная	A ₁ 10–15	25	4.5	1.0	0.71	0.48	0.38	0.28
	B ₃ 120–130	48	8.5	1.0	0.73	0.55	0.40	0.27
	BC 190–200	50	6.8	1.0	0.74	0.48	0.35	0.26
Чернозем	A ₁ 20–30	76	9.6	1.0	0.80	0.56	0.41	0.28
	B ₁ 45–55	72	9.2	1.0	0.75	0.50	0.40	0.27
	B ₂ 65–75	72	7.9	1.0	0.70	0.55	0.40	0.25
Светло- каштановая	A ₁ 15–20	60	10.1	1.0	0.68	0.50	0.37	0.27
	B ₁ 35–40	54	9.3	1.0	0.67	0.42	0.32	0.23
	C 120–130	58	8.5	1.0	0.66	0.42	0.32	0.23
Бурая полу- пустынная	A ₁ 0–10	44	7.7	1.0	0.65	0.41	0.31	0.19
	B ₁ 10–30	74	10.1	1.0	0.64	0.42	0.36	0.23
	B ₂ 30–66	51	9.6	1.0	0.60	0.40	0.32	0.20
Солончак	A ₁ 0–8	56	11.9	1.0	0.63	0.44	0.30	0.18
	B ₁ 28–40	60	12.0	1.0	0.50	0.28	0.27	0.18
	B ₂ 70–75	89	15.0	1.0	0.54	0.30	0.22	0.16
Краснозем.	A ₁ 5–15	130	20.0	1.0	0.56	0.39	0.29	0.18
	B 35–40	126	21.2	1.0	0.50	0.35	0.27	0.18
	C 135–140	136	18.5	1.0	0.54	0.33	0.25	0.14
Среднее				1.0	0.66	0.44	0.34	0.24

Одновременно определяли и другие свойства почв, значения которых приведены в предыдущей публикации (Шваров, 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость между нормированной влажностью почв (W_n) и логарифмом полного давления почвенной влаги (рF) для всей полученной физической статистической совокупности, как и предполагалось, оказалась очень близкой к обратной прямолинейной. Коэффициент корреляции между переменными величинами рF и W_n (рассчитанный с использованием компьютерной программы «Статистика 6.0») равен -0.97 (при уровне значимости ≤ 0.05).

Зависимость подчиняется уравнениям:

$$W_n = 2.7 - 0.385 \text{ рF} \quad \text{или} \quad (10)$$

$$\text{рF} = 7.05 - 2.6 W_n \quad (11)$$

Столь высокий и достоверный коэффициент корреляции позволяет сделать вполне определенный вывод: в интервале $-2600 \text{ атм} \leq P \leq -27 \text{ атм}$ снижение энергетического уровня почвенной влаги обусловлено гидратацией ионов диффузного слоя, прилегающего к поверхности твердой фазы почвы.

Выяснилось также, что принятые в качестве *нормы* величины максимальной гигроскопической влажности (МГ) хорошо коррелируют с величинами внешней удельной поверхности почв (S м²/г почвы), рассчитанной по уравнению Фаррера (Шеин, 2005) (коэффициент корреляции равен 0.94 при уровне значимости ≤ 0.05).

Зависимость между МГ и S оказалась, таким образом, прямо пропорциональной. Она описывается уравнением

$$\text{МГ} = 0.1335S. \quad (12)$$

Тесная корреляция и прямолинейная зависимость между МГ и S подтверждает справедливость принятого выше допущения, что при W , равной или меньшей максимальной гигроскопической влажности, почвенная влага представляет собой пленку более или менее равномерной толщины.

В соответствии с этой зависимостью, например, в почвах с внешней удельной поверхностью, равной 100 м²/г почвы, МГ равна 17.5 % от массы почвы. Уравнение (12) позволяет рассчитать толщину водной пленки при этой влажности почвы. Она равна $1.335 \cdot 10^{-9}$ м, что соответствует 4 диаметрам молекул воды. Близкую величину (5 диаметров) получил А. А. Роде (1965, с. 95).

Напомним, что выведенная выше зависимость влажности почвы от логарифма полного давления почвенной влаги – *единственное* выведенное строго теоретически (и к тому же без помощи необоснованных допущений и упрощений) математическое выражение, описывающее значительный отрезок основной гидрофизической зависимости почв. Поэтому оно и оказалось репрезентативным для большого массива самых различных генетических типов почв разного гранулометрического состава (от супесей до глин). Это выгодно отличает его от всех других – эмпирических – математических выражений, которые представляют собой индуктивные, чисто эмпирические обобщения (с неопределенной репрезентативностью).

Это позволяет надеяться, что (после дополнительной ее верификации) предложенная зависимость приобретет статус основного почвенного гидрофизического *Закона*.

Существование этого *Закона* значительно облегчает решение большого круга агрофизических проблем. Так, одной из важнейших задач агрофизики и мелиорации почв является проблема оптимизации водного режима растений, необходимого для получения гарантированных высоких урожаев сельскохозяйственных культур в неустойчивых метеорологических условиях. Для решения этой задачи необходима оперативная оценка запасов доступной растениям почвенной влаги. Нижним пределом доступной растениям почвенной влаги является влажность устойчивого завядания растений (ВУЗ), которую традиционно принято вычислять (Роде, 1965) по уравнению

$$\text{ВУЗ} = 1.34\text{МГ}. \quad (13)$$

Часто в качестве ВУЗ принимают также W , соответствующую давлению влаги – 15 атм (бар) (Роде, 1965; Шеин, 2005). Полученная нами зависимость $W_n(P)$ позволяет проверить справедливость этих традиционных приемов. Поскольку раньше величину МГ определяли при $P = -54$ атм, то ее приведенное значение (W_n) равно 0.88. Значению же $P = -15$ атм соответствует $W_n = 1.1$. Поделив 1.1 на 0.88, получаем 1.25, то есть величину, весьма близкую к традиционной (1.34). Кстати говоря, именно такую величину (1.25) обнаружили в своих многочисленных опытах Кочерина и Улаевич (цит. по: Роде, 1965, с. 576-579).

Поскольку ВУЗ обычно рассчитывают по величине МГ, для решения проблемы оптимизации водного режима растений на разных почвах приходится для каждой конкретной почвы определять величину МГ почв экспериментально. Однако экспериментальное определение МГ – длительная (она занимает около месяца) и трудоемкая процедура, не поддающаяся пока автоматизации. Уравнение (12) дает возможность рассчитывать величину МГ по величинам W , соответствующим гораздо более низким значениям P (например, –2600 атм, что соответствует относительной влажности воздуха 15 %). Определить W при этом значении P в динамическом режиме (при помощи продувания образцов почв воздухом с такой низкой относительной влажностью) можно всего за несколько минут, и эта процедура легко поддается автоматизации с помощью стандартных приборов – газовых хроматографов (например, модели ЛХМ-80, Хром, 3700) (Теории..., 2007, с. 200).

Определить ВУЗ с помощью газовых хроматографов можно и непосредственно, продувая образцы почв воздухом, относительная влажность которого равна 99 % (что соответствует $P = -15$ атм, принятому в качестве средней величины P при ВУЗ), однако эта процедура займет несколько больше времени (около получаса).

ВЫВОДЫ

Использование уравнения Больцмана и зависимости между электрическим потенциалом и расстоянием от электрически заряженной поверхности твердой фазы почвы позволило теоретически вывести и экспериментально верифицировать зависимость полного давления влаги от влажности почв в интервале давления почвенной влаги от -27 до -2600 атм (что соответствует интервалу равновесной относительной влажности воздуха от 15 до 98 %). Для семи почв Европейской территории России коэффициент корреляции между логарифмом полного давления влаги и влажностью, нормированной по максимальной гигроскопической влажности, достиг -0.97 (при уровне значимости ≤ 0.05). Существование этой закономерности свидетельствует о том, что снижение энергетического уровня почвенной влаги обусловлено гидратацией обменных ионов диффузного слоя, граничащего с электрически заряженной поверхностью твердой фазы почвы.

Полученная закономерность позволяет во много раз ускорить определение влажности устойчивого завядания растений, знание которой необходимо для оптимизации водного режима растений и получения гарантированных высоких урожаев сельскохозяйственных культур в неустойчивых метеорологических условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 355 с.
- Глобус А. М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 427 с.
- Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 319 с.
- Злочевская Р. И. Связанная вода в глинистых грунтах. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 176 с.
- Карякин Н. И. Краткий справочник по физике / Н. И. Карякин, К. Н. Быстров, П. С. Киреев. – М.: Высш. шк., 1962. – 559 с.
- Поздняков А. И. Электрические параметры почв и почвообразование // Почвоведение. – 2008. – № 10. – С. 1188-1197.
- Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 663 с.
- Судницын И. И. Новые методы оценки водно-физических свойств почв и влагообеспеченности леса. – М.: Наука, 1966. – 112 с.
- Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 254 с.
- Судницын И. И. Экологическая гидрофизика почв / И. И. Судницын, И. З. Каманина. – Дубна: Изд-во «Университет «Дубна», 2008. – 181с.
- Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1968. – 624 с.
- Теории и методы физики почв / Под ред Е. В. Шеина. – Тула: Гриф и К, 2007. – 614 с.
- Шейн Е. В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 430 с.
- Шваров А. П. Явление гистерезиса зависимости капиллярно-сорбционного потенциала воды от влажности почвы / А. П. Шваров, Е. А. Коренева // Почвоведение. – 2008. – № 10. – С. 1179-1187.

Надійшла до редколегії 17.03.09