

ОЦЕНКА ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ РАСТЕНИЙ

© 2011 г. Н. А. Муромцев

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7*

Установлены закономерности поведения влаги в системе приземный воздух–растительный покров–почва с использованием потенциала влаги. Показано, что потенциал влаги в почве, листьях растений, перепады потенциала влаги в системе почва–растение, и относительная транспирация связаны между собой функциональными зависимостями. Достоверно обосновано, что каждая группа растений (гигрофиты, мезофиты и ксерофиты) характеризуется определенным узким интервалом потенциала почвенной влаги, при котором значения относительной транспирации не опускаются ниже оптимального уровня (1.0–0.9). Этот интервал практически не зависит от свойств почв и метеорологических условий и может быть использован в качестве оптимального критерия влагообеспеченности растений.

Ключевые слова: потенциал почвенной влаги, перепад потенциала влаги, верхняя и нижняя границы оптимального увлажнения почвы, испаряемость, наименьшая влагоемкость почвы, влажность завядания растений, абсолютная транспирация, потенциальная транспирация, относительная транспирация, влагообеспеченность почв и растений.

Проблеме водного режима почв и влагообеспеченности растений посвятили свои труды многие выдающиеся ученые почвоведы и физиологи. Укажем лишь только на некоторых из них: Н.А. Максимов (1941), С.И. Долгов (1948), Н.А. Гусев (1949), А.А. Роде (1965), А.Д. Воронин (1966), Н.А. Качинский (1970), Б.Н. Мичурин (1975), И.И. Судницын (1979), Х. Пенман (1982), Н.А. Семенов и др. (2005). Водный режим почв и влагообеспеченность растений неразрывно связаны между собой, в связи с чем ее оценивают категориями и понятиями влагообеспеченности почв.

В соответствии с определением (Толковый словарь, 1972; Мелиоративная энциклопедия, 2003) влагообеспеченность растений

уподобляется влагообеспеченности почв. Последняя представляет собой отношение запаса продуктивной влаги в почве к запасу, соответствующему наименьшей влагоемкости почвы и диапазону активной влаги (по Н.А. Качинскому) или интервалу оптимального увлажнения (интервал оптимальной влажности, оптимальных запасов влаги и др.) почв.

Под верхним пределом оптимального содержания влаги в почве принимается наименьшая влагоемкость (**НВ**), а нижним – интервал влаги, равный 0.8–0.6 НВ (Качинский, 1970; Воронин, 1985; Судницын, 1990; Муромцев, 1991; Роде, 2008). Однако возможно ли оценивать влагообеспеченность растений, исходя из понятий влагообеспеченности почв? Можем ли мы в полной мере переносить это понятие с почвы на растение?

В основе большинства «действующих» методов оценки влагообеспеченности растений, так или иначе, используется информация о верхнем и нижнем пределах оптимального интервала влажности почв. В качестве критерия оптимальности водного режима почв обычно служит урожайность возделываемых культур. Однако урожай культур – показатель интегральный, конечный, и его невозможно использовать для оценки влагообеспеченности растений в процессе их роста и формирования урожая.

Казалось бы, что поддержание запасов влаги в почве на оптимальном уровне (например, на уровне 0.7 НВ) должно обеспечивать получение высоких и устойчивых урожаев. В действительности все обстоит гораздо сложнее, хотя бы потому, что даже запасов влаги (**ЗВ**), равных наименьшей влагоемкости, нередко оказывается недостаточно для покрытия расходов их на транспирацию (**Т**), абсолютное значение которой очень сильно зависит от испаряемости (E_0).

Например, при высокой испаряемости (3–5 мм/сут), когда влажность воздуха опускается до 30–25%, а температура воздуха поднимается до 25–30°C, растению для поддержания нормальной жизнедеятельности необходим уровень абсолютной транспирации (**АТ**), соответствующий испаряемости, т.е. $АТ = E_0$. Иными словами, поток влаги из почвы в растение должен удовлетворять потенциально возможной транспирации, соответствующей (равной) испаряемости, т.е. $пото́к\ влаги\ (I) = АТ = T_0 = E_0$. Однако из-за несоответствия скорости потока влаги через границу почва–корень

растения скорости потока ее на границе лист растения–атмосфера часто в природных условиях имеем ситуацию: поток влаги из почвы в растение (I) < $AT < T_0 = E_0$.

Для достижения такой высокой интенсивности AT необходимо обеспечить соответствующую плотность потока влаги из почвы в растение. Однако плотность потока влаги в системе определяется не только ее содержанием в почве, но и сопротивлением проводящей системы твердая фаза почвы–паренхима–сосуды корня, стебля и листьев. В результате происходит несоответствие между поступлением влаги из почвы в растение и расходом ее на транспирацию, что приводит к возникновению водного дефицита влаги в листьях, к перманентному их завяданию и снижению темпов наращивания полезной продукции.

Состояние, движение и доступность почвенной влаги для растений зависят от комплекса природных и антропогенных факторов. Параметры природной среды можно подразделить на три взаимосвязанные между собой группы, характеризующие различные части системы почва–растение–атмосфера. К первой группе относятся факторы, определяемые почвенными условиями: гранулометрическим составом, сложением и структурой почвы, степенью ее засоления, гидрологическим режимом территории и др. Вторую группу составляют факторы, связанные с биологическими и физиологическими особенностями растений: принадлежностью к той или иной экологической группе, степенью жаро- и холодоустойчивости, мощностью надземной и подземной биомасс, плотностью фитоценоза, возрастом растений и др. В третью группу входят метеорологические параметры и их сочетание во времени и пространстве: температура воздуха и почвы, влажность воздуха, скорость и направление ветра, испаряемость, альbedo и др.

Для того чтобы иметь реальную и адекватно отражающую сиюминутное состояние влаги в почве информацию ($I = AT < E_0$ или $I = AT = E_0$) необходим динамический критерий влагообеспеченности растений. Динамический критерий – показатель состояния влаги в системе или отдельной ее части (например, в растении), который позволяет судить о степени влагообеспеченности в любой отрезок времени.

Предпринята попытка использовать в качестве динамического критерия влагообеспеченности растений различные физиологиче-

ские показатели (сосущую силу растительной клетки, скорость движения влаги по стеблю, абсолютную транспирацию и др.). Однако она не увенчалась успехом, прежде всего потому, что все абсолютные значения физиологических параметров сильно зависят от испаряемости приземного слоя воздуха и подвержены значительной изменчивости не только в пространстве, но и в пределах одного и того же растения. Поэтому предложены относительные значения некоторых параметров природной среды: относительная испаряемость, относительная транспирация (T/T_0) и др. (Слейчер, 1970; Судницын, Муромцев, 1971; Муромцев, 1979; Семенов и др., 2005). Последний критерий (T/T_0), представляющий собой отношение действительной (T) транспирации к потенциальной (T_0), имеет преимущество, т.к. учитывает и изменение метеорологической обстановки, и физиологические особенности растений.

Таким образом, мы кратко указали на влияние атмосферных параметров, отображенных в испаряемости в интегральном виде. Влияние гидрофизических и иных свойств почвы на состояние влаги в ней и доступности ее для растений достаточно хорошо известно из многочисленных трудов отечественных и зарубежных ученых А.А. Роде (2008), Н.А. Качинский (1970), И.И. Судницын (1979), Р.О. Слейчер (1970 и др. Следовательно, на водный режим и влагообеспеченность почв и растений и состояние влаги в системе приземный слой воздуха–растительный покров–почва–грунтовые воды воздействуют многие факторы природной среды. Анализ состояния влаги традиционными методами одновременно в разных частях единой системы серьезно затруднен. Однако его можно рассчитать на основе информации о потенциале влаги в системе.

Под потенциалом влаги понимают полезную работу, которую необходимо совершить приложением извне сил для изотермического и обратимого переноса единицы массы или единицы объема свободной химически чистой воды с заданного уровня в почвенный раствор (Толковый словарь по почвоведению, 1975; Мелиоративная энциклопедия, 2004).

При отнесении количества работы к массе перенесенной воды, получается размерность «потенциала» (Дж/кг, Эрг/г); а при отнесении ее к объему перенесенной воды – размерность «давления» (кПа, атм, бар, мм рт.ст.). Количественно размерности относятся

следующим образом: $-1 \text{ атм} = -1000 \text{ см водн. ст.} = -1.02 \times 10^3 \text{ мбар} = -7.36 \times 10^2 \text{ мм рт. ст.} = 1.02 \times 10^6 \text{ дн/см} = -9.81 \times 10^1 \text{ кПа} = -9.81 \times 10^{-2} \text{ Дж/г} = 9.81 \times 10^1 \text{ Дж/кг}$.

Взаимодействие воды с вмещающим ее телом (почвой, растением) оценивается в системе почва–растение величиной химического потенциала воды (потенциал влаги, давление почвенной влаги). В условиях равновесного состояния системы потенциал влаги во всех ее частях одинаков, а в неравновесном – вода может передвигаться лишь в направлении более низкого потенциала. Между потенциалом почвенной влаги (P_n) и влажностью почвы практически во всем интервале увлажнения существует функциональная зависимость, широко используемая в гидрофизических работах Судницына (1979), Воронина (1984), Муромцева (1991) и др.

Вполне естественно предположить наличие функциональной зависимости между потенциалами влаги в почве и листьях растений и между относительной транспирацией и потенциалами влаги в системе почва–лист. Действительно, такие зависимости были получены и другими исследователями. На рис. 1 представлена зависимость между потенциалами влаги в листьях различных растений и в слоях 0–40 см черноземовидных почв Доно-Арчединского песчаного массива, а на рис. 2 – зависимость перепада потенциала влаги ($P_l - P_n$) в системе почва–растение от потенциала почвенной влаги (P_n) в этих же почвах.

Исследования проведены в условиях вегетационных опытов в больших вегетационных сосудах (вес почвы около 8 кг). Потенциал влаги в почве и растениях измеряли психрометрическим методом (Судницын, Муромцев, 1971; Муромцев, 1986). Морфологический облик почв выглядит таким образом.

Пойменная черноземовидная суглинистая почва. Гор. А (0–40 см): темно-серый, почти черного цвета; сухой, плотный; структура комковатая, среднесуглинистый, много корней, червоточин, кротовин, новообразований нет; переход в следующий горизонт четкий по цвету и структуре.

Пойменная черноземовидная супесчаная почва. Гор. А₀ (0–3 см): подстилка из полуразложившейся сосновой хвои. Гор. А₁ (3–40 см): влажноватый серовато-коричневого цвета слой, супесчаный, среднеуплотненного сложения; структура комковатая,

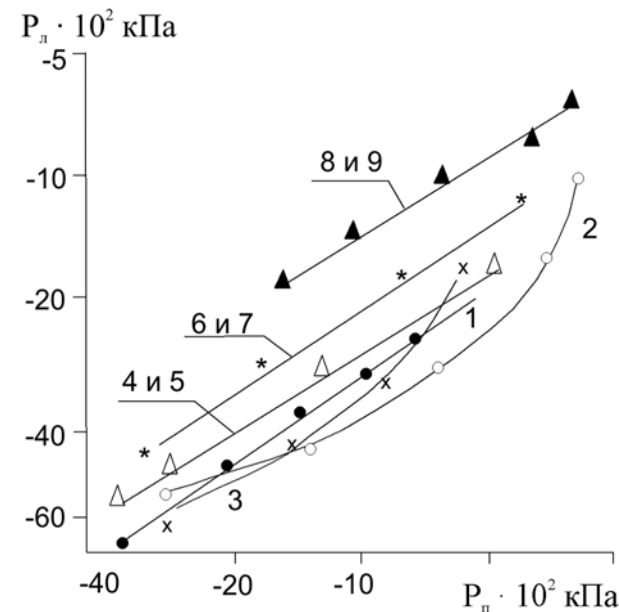


Рис. 1. Зависимость потенциала влаги в листьях различных растений (P_l) от потенциала почвенной влаги (P_n). Обозначения здесь и далее: *черноземовидная суглинистая почва*: 1 – пшеница, 3 – житняк, 4 – просо, 6 – овес, 8 – салат; *черноземовидная супесчаная почва*: 2 – пшеница, 5 – просо, 7 – овес, 9 – салат.

много корней, червоточин, кротовин; переход в следующий горизонт четкий по цвету и структуре.

Анализ рис. 1 и 2 свидетельствует о различной биолого-физиологической природе исследованных растений, наибольшая роль в которой принадлежит степени их засухоустойчивости, отражающей потенциальные возможности влагопотребления. Потенциал влаги в листьях растений в период, соответствующий процессу устойчивого завядания, составляет в пойменной суглинистой почве: в салате-гигрофите – -23×10^2 или -23 атм , овсе-мезофите -36×10^2 или -36 атм , в засухоустойчивых мезофитах (просе и пшенице) и житняке-ксерофите в пределах $-57 \dots -73 \times 10^2$ или $-57 \dots -73 \text{ атм}$.

Максимальные значения перепада потенциала влаги ($P_l - P_n$) в системе лист растения–почва в этой же почве составляют: -6 , -13 , -23 , -33 атм соответственно в салате, овсе, просе и пшенице.

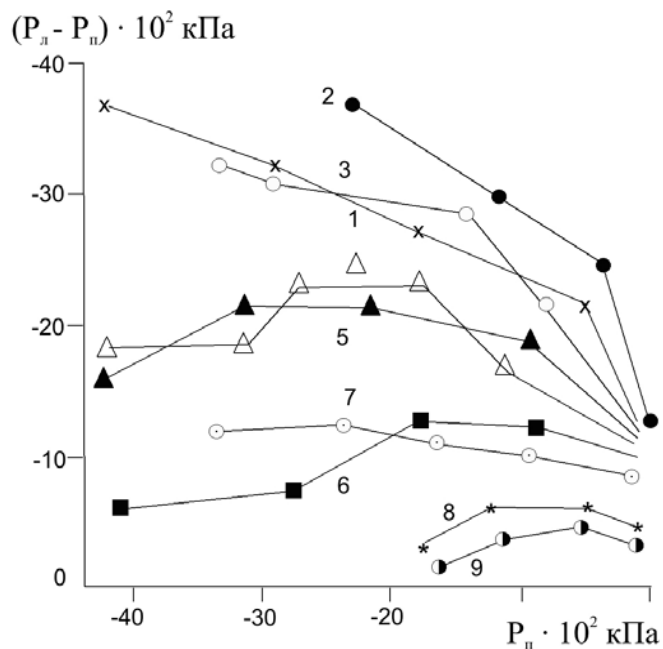


Рис. 2. Зависимость перепада потенциала влаги в системе почва – растение $(P_{л}-P_{п})$ от потенциала почвенной влаги $(P_{п})$.

При сравнительно высоком содержании влаги в почве, характеризуемом потенциалом влаги до -500 кПа (-5 атм), перепады полного потенциала влаги минимальны: в салате -5 атм, овсе -10 атм, а в просе, пшенице и житняке $-10...-13$ атм. По мере уменьшения содержания влаги и влагопроводности перепад потенциала плавно возрастает в салате и овсе и довольно резко в пшенице, просе и житняке, достигая в последних культурах значений в пределах $-23...-33$ атм. Характер изменения величин перепада потенциала таков: сначала он, возрастая, достигает максимального значения (различного для различных растений), затем с уменьшением влаги до влажности устойчивого завядания растений (для ксерофитов и засухоустойчивых растений до максимальной гигроскопичности и ниже) – снижается.

Конечные его значения, соответствующие состоянию устойчивого завядания растений, в овсе и салате ниже (по абсолютной величине) первоначального значения (при достаточно высоком со-

держании влаги в почве), а в ксерофитных растениях – выше. В соответствии с характером изменений $P_{п}$ и перепада полного потенциала функция $(P_{л}-P_{п})f(P_{п})$ характеризуется одним максимумом и двумя минимумами (рис. 2). Физическая сущность этого явления может быть представлена следующим образом.

В условиях высокого содержания влаги в почве (около НВ и немного ниже) поток ее в растение компенсирует расход на транспирацию. В это время «усилия» растений направлены в основном на преодоление сопротивления системы почва–ксилема стебля движению влаги, поскольку силы влагоудержания незначительны, и перепад потенциала минимален, но достаточен для обеспечения такой плотности потока, который компенсировал бы потери влаги на эвапотранспирацию (суммарное испарение). При дальнейшем уменьшении содержания влаги в почве ее потенциал ($P_{п}$) снижается интенсивнее с уменьшением количества влаги в почве. Это приводит к быстрому (интенсивному) понижению потенциала влаги в растениях ($P_{л}$), при этом скорость понижения $P_{л}$ превосходит скорость снижения $P_{п}$, в результате чего перепад потенциала в системе увеличивается до максимального значения. Наконец, содержание влаги в почве становится настолько малым, что скорость снижения $P_{п}$ достигает значений, равных скорости снижения $P_{л}$, а затем и превышает ее. В этих условиях возрастание перепада потенциала приостанавливается, и в дальнейшем происходит его уменьшение.

Зависимости $T/T_0 f(P_{п}, P_{л})$ представлены на рис. 3. В интервале T/T_0 , характеризуемом началом снижения потока влаги на границе раздела жидкость–воздух, функция аппроксимируется прямыми, причем для ксерофитных растений функция выражена в наиболее явном виде. Теснота связи очень высокая: $r=0.96-0.98$.

Начало снижения T/T_0 в различных растениях наблюдается при следующих значениях $P_{п}$ соответственно в супесчаной и суглинистой почвах: -200 кПа (-2 атм) и -400 кПа (-4 атм) в салате, -500 и -900 кПа в овсе, -13×10^2 кПа в просе, -700 и -800 кПа в пшенице и -10×10^2 кПа в житняке. Отсюда самое низкое значение $P_{п}$, соответствующее началу снижения T/T_0 , наблюдается при выращивании проса и житняка, а самое высокое – при выращивании салата.

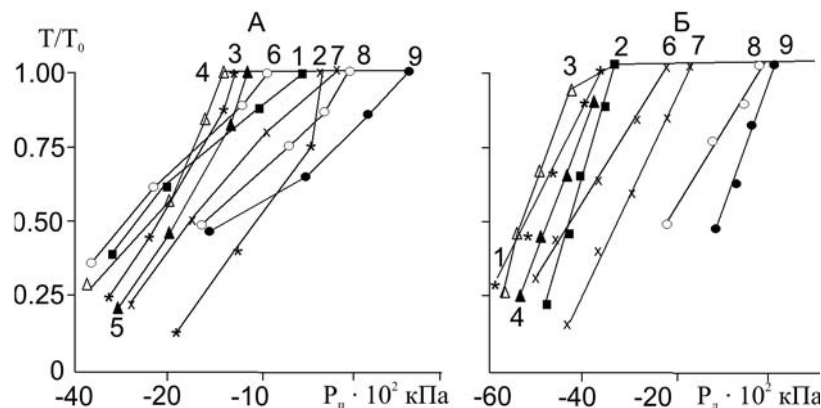


Рис. 3. Зависимость относительной транспирации (T/T_0) различных растений от потенциала влаги в почве (А) и листьях растений (Б).

Конечное значение T/T_0 , характеризующее устойчивое завядание растений ксерофитов, составляет 0,18–0,20, а салата $T/T_0 = 0,47$. Последняя цифра свидетельствует о том, что у гигрофитов (салата) влажность завядания (**ВЗ**) наступает не постепенно (более или менее плавно), а резко, с высокой интенсивностью. С физической точки зрения это можно объяснить тем, что у гигрофитов из-за высокой требовательности к воде не выработались в процессе эволюции соответствующие реакции на экстремальные условия среды, выражающиеся в данном случае в резком снижении доступности почвенной влаги. Поэтому потребление влаги этими растениями быстро прекращается при исчерпании потенциальных возможностей, характеризующихся отсутствием перепада потенциала, когда значения потенциала в листьях и почве равны между собой ($P_n = P_{\text{л}} = -17 \times 10^2$ кПа). Вместе с тем, потенциал при уменьшении влаги в почве до ВЗ, составляет в листьях овса, проса и пшеницы соответственно: -25×10^2 , -30×10^2 и -20×10^2 кПа в супесчаной и -36×10^2 , -40×10^2 и -40×10^2 кПа в суглинистой почвах.

Зависимость $T/T_0/P_{\text{л}}$ в полулогарифмическом масштабе также выражена прямыми линиями (с начала снижения T/T_0). Потенциал влаги, соответствующий началу снижения T/T_0 , составляет в листьях салата -900 и -1000 кПа в супесчаной и суглинистой почвах, в листьях овса соответственно -18×10^2 и -20×10^2 кПа; в ли-

стьях проса, пшеницы и житняка около -32×10^2 кПа. Предельное значение $P_{\text{л}}$, соответствующее ВЗ, достигает в супесчаных почвах в листьях салата -18×10^2 , овса и пшеницы -50×10^2 , проса и житняка -65×10^2 кПа. Аналогичные результаты получены и при анализе зависимостей T/T_0 от перепада потенциала ($P_{\text{л}} - P_{\text{п}}$). Видно, что с увеличением степени ксерофитности в направлении от салата к просу и житняку начало снижения T/T_0 «сдвигается» в сторону больших значений перепада потенциала влаги.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные материалы позволяют с учетом имеющихся в научной литературе данных сделать следующие выводы.

1. Поток влаги из почвы в растение должен удовлетворять потенциально возможной транспирации, соответствующей (равной) испаряемости, т.е. поток влаги ($I = AT = T_0 = E_0$). Однако из-за несоответствия скорости потока влаги через границу почва–корень растения скорости потока ее на границе лист растения–атмосфера в природных условиях часто имеем ситуацию:

$$\text{поток влаги из почвы в растение } (I) < AT < T_0 = E_0.$$

2. Для того чтобы иметь реальную и адекватно отражающую секундное состояние влаги в почве информацию ($I = AT < E_0$ или $I = AT = E_0$) – необходим динамический критерий влагообеспеченности растений, позволяющий получить информацию о степени влагообеспеченности растений практически в любой отрезок времени.

3. Потенциалы влаги в почве, листьях растений, перепады потенциала влаги в системе почва–растение и относительная транспирация связаны между собой функциональными зависимостями.

4. Интервал потребляемой влаги увеличивается, а «мертвый» запас уменьшается в направлении от гигрофитов к мезофитам и далее к ксерофитам. Снижение роста и накопление полезной продукции растениями проявляется при снижении содержания почвенной влаги до нижней границы оптимального увлажнения. Дальнейшее уменьшение влажности почвы приводит сначала к перманентному, а затем и к устойчивому завяданию растений.

5. Поскольку перепад потенциала влаги в системе почва–растение является движущей силой переноса влаги, а относительная транспирация представляет собой динамический критерий вла-

гообеспеченности растений, то они могут быть положены в основу методики оценки влагообеспеченности растений.

6. Оптимизация водного режима почв и влагообеспеченности растений сводится к определению и поддержанию во времени оптимального интервала потенциала влаги и относительной транспирации на уровне единицы. При этом в качестве критерия оптимальности водного режима могут быть использованы и значения потенциала влаги в системе почва–лист, и значения T/T_0 . Одновременно они будут являться и критериями (параметрами), необходимыми для решения вопроса о сроках и нормах полива.

7. Каждая группа растений (гигрофиты, мезофиты и ксерофиты) характеризуется определенным узким оптимальным интервалом потенциала почвенной влаги, при котором условия водного питания растений таковы, что значения T/T_0 не опускаются ниже оптимального уровня (1.0–0.9). Эти интервалы почти не зависят от свойств почв и метеорологических условий и могут быть использованы в качестве оптимального интервала влагообеспеченности растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронин А.Д.* Термодинамический метод исследования поведения воды в системе почва–растение // *Сельскохозяйственная биология*. 1966. №4. С. 538–548.
2. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
3. *Гусев Н.А.* Некоторые закономерности водного режима растений. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 779 с.
4. *Долгов С.И.* Исследование подвижности почвенной влаги и доступности ее для растений. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 208 с.
5. *Качинский Н.А.* Физика почвы. М.: Высшая школа, 1970. Ч. 2. 467 с.
6. *Максимов Н.А.* Физиологические основы засухоустойчивости растений. М.: Изд-во АН СССР, 1941. 347 с.
7. Мелиоративная энциклопедия. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. Т. 3. С.10–11.
8. *Мичурин Б.Н.* Энергетика почвенной влаги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 136 с.

9. *Муромцев Н.А.* Об использовании термодинамического потенциала почвенной влаги в исследованиях по гидрофизике почв и растений // *Почвоведение*. 1976. №3. С. 42–52.

10. *Муромцев Н.А.* Мелиоративная гидрофизика почв. Л.: 1991. Гидрометеоиздат, 272 с.

11. *Пенман Х.Л.* Растения и влага. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 243 с.

12. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Избр. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. Т. 3. 663 с.

13. *Семенов Н.А., Муромцев Н.А., Сабитов Г.А., Коротков Б.И.* Лизиметрические исследования в луговодстве. М.: Изд-во Аверс Пресс, 2005. 584 с.

14. *Слейчер Р.О.* Водный режим растений. М.: Мир, 1970. 365 с.

15. *Судницын И.И., Муромцев Н.А., Чан Конг Тау.* Психрометрический метод определения потенциала влаги в почве и растениях // *Почвоведение*. 1971. №4. С. 47–56.

16. *Судницын И.И.* Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 254 с.

17. Толковый словарь по почвоведению. М.: Наука, 1975. 286 с.