

УДК 632.934

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОЛОГИИ ПОЧВ В ТРУДАХ А.А. РОДЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ДВИЖЕНИЯ И РАВНОВЕСИЯ ВЛАГИ В ПОЧВАХ

© 2016 г. **Е. В. Шейн**^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева,
Россия, 119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Классическая российская гидрология почв создана трудами А.А. Роде, его коллег и соратников и имеет в своей основе концепцию форм воды в почве и почвенно-гидрологических констант. На современной стадии развития в гидрологии почв используются все разработанные А.А. Роде с соавторами концептуальные подходы, что позволяет характеризовать гидрологию почв как активно развивающуюся науку, имеющую свой исторический путь, принципы, границы применения, преимущества и возможные перспективные пути развития, использующую разработанные и экспериментально подтвержденные А.А. Роде понятия о “капиллярно-подвешенной” и “капиллярно-подпертой” влаге и, соответственно, о наименьшей и капиллярной влагоемкостях. Современный этап отличается активным применением количественных подходов. В современной гидрологии центральное место занимает равновесная основная гидрофизическая характеристика, на которой выделяется значение давления входа воздуха, как точки перелома, соответствующей капиллярной влагоемкости. Приводятся примеры описания нелинейной основной гидрофизической характеристики для тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почв, серых лесных почв и черноземов с четко выделяемыми величинами давления входа воздуха. Такие образные гидрологические характеристики А.А. Роде, как капиллярно-подвешенная и капиллярно-подпертая влага, продолжают активно использоваться в современном научно-образовательном процессе.

Ключевые слова: гидрология почв, почвенно-гидрологические константы, основная гидрофизическая характеристика.

DOI: 10.19047/0136-1694-2016-83-11-21

Вода в почве – основной фактор всех происходящих в почве процессов. Это непререкаемая истина, всеми разделяемая. Теоре-

тические положения, узловые понятия, экспериментальные подходы этого раздела физики почв имеют принципиальное значение для всего почвоведения и смежных наук. Понятийный аппарат гидрологии почв, теория гидрологических процессов всегда были в центре научных дискуссий, полемики, согласования научных позиций и требований практики. Так, понятие “наименьшей (предельно полевой или полевой) влагоемкости” в трудах А.А. Роде имело строго теоретическое обоснование, связанное с равновесными формами воды в почве, с тщательным рассмотрением сил, действующих на воду в почве, потоков влаги. Необходимо отметить, что А.А. Роде рассматривал эту гидрологическую константу почвы, которая “...создается либо внутренними силами, присущими системе: твердая часть почвы – почвенная влага (силами сорбционными и капиллярными), которые противостоят внешней силе – силе тяжести, стремящейся удалить влагу из почвы, либо сопротивлением (водонепроницаемостью) водоупорного слоя, на который опирается влага водоносного слоя...” (Роде, 1969, с.159). Отметим, что понятия “водоудерживающей способности”, “равновесной влажности” активно используются в современной гидрологии. Однако истоки современных представлений и математических выражений лежат в трудах А.А. Роде, возможно, и не в явном виде.

О двойственной природе водоудерживания в почве в трудах А.А. Роде. Современная гидрология почв: взаимосвязь водоудерживания и влагопроводности почв.

Важно отметить, что А.А. Роде вносил в понятие “водоудерживающей способности” не только удержание воды силами, возникающими на контакте твердая фаза–почвенная влага, но и водопроявляющими свойствами самого рассматриваемого или нижележащего почвенного слоя. В этом случае А.А. Роде рассматривал две причины возникновения водоудерживающей способности почв: возникновение водоудерживающих сил внутренней (межфазной) природы и причину, связанную с условиями влагопроводности почвенного профиля. В этой двойственной природе водоудерживания заключается гениальная догадка А.А. Роде, связывающая собственно равновесие влаги в почве и ее подвижность, влагопроводность почв. Эти два свойства почвенной влаги, ее равновесное состояние в поле действия сил различной природы и

ее подвижность находятся в сопряженном состоянии в центре современной гидрологии, связывая водоудерживание и влагопроводность в единый экспериментально-расчетный блок. В происхождении этого блока, современного центрального понятия почвенной гидрологии и лежит идея А.А. Роде о двойственной природе водоудерживания почв. Действительно, эта идея А.А. Роде нашла прямое воплощение в современной гидрологии благодаря единой системе рассмотрения порового пространства почв. Рассмотрим, как реализовалась идея А.А. Роде о двуединой природе водоудерживания влаги в почве в современной гидрологии почв, как современная гидрология описывает взаимосвязь водоудерживания и влагопроводности почв.

Современная почвенная гидрология в полной мере впитала термодинамические представления о давлении (потенциале) влаги в почве. Эта идея оказалась чрезвычайно плодотворной, так как была в центре количественных расчетов движения влаги в почве. Центральное место в этих расчетах было отведено именно почвенной (или, как указывал А.А. Роде, внутренней) составляющей водоудерживания. В основе данной составляющей лежала кривая водоудерживания (water retention curve): зависимость объемной влажности от капиллярно-сорбционного (матричного) давления влаги. [А.М. Глобусом \(1969, 1987\)](#) эта зависимость очень точно названа основной гидрофизической характеристикой (**ОГХ**). Действительно, ОГХ оказалась в центре нового понимания всей почвенной гидрологии, причем не только расчетов движения и характеристики состояния влаги. [Л.А. Ричардсом \(Шеин, 2005; Horn, 2008\)](#) предложено модифицировать уравнение Дарси, относящееся к насыщенной влагой почве, к условиям ненасыщенной зоны. В результате, к современному этапу развития количественной гидрологии почв удалось совместить основное уравнение переноса и уравнение баланса в виде уравнения неразрывности. Это привело к дифференциальному уравнению, не имеющему аналитических решений, но которое может быть решено численными методами:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{\text{вл}}(P_{\text{к-с}}) \left(\frac{\partial P_{\text{к-с}}}{\partial z} - 1 \right) \right].$$

Приведенная запись основного уравнения движения влаги и носит название уравнения Ричардса (уточним, эта запись для переноса в вертикальном направлении, по оси z , когда градиент гра-

витационного давления равен 1 при одинаковых единицах измерения расстояния и давления). Нетрудно заметить, что в этом уравнении две переменные: влажность (θ) и капиллярно-сорбционное давление влаги ($P_{к-с}$), а также величина влагопроводности почв, зависящая от давления влаги $K_{вл}(P_{к-с})$, t – время. Решения этого уравнения даже специальными методами невозможно. Для его решения численными методами вводят понятие дифференциальной влагоемкости $C(\theta, P_{к-с}) = \frac{d\theta}{dP_{к-с}}$. Если внимательно проанализировать выражение дифференциальной влагоемкости, оказывается, что эта величина есть не что иное, как дифференциальная кривая распределения объемов пор по их диаметрам (или радиусам). Действительно, изменение объемной влажности, $d\theta$, это – объем воды, содержащейся в почве при изменении давления влаги, $dP_{к-с}$, которое представляет собой изменение радиусов пор в определенном диапазоне. Такие образом, если есть ОГХ, то дифференцируя эту кривую, т.е. определяя дифференциальную влагоемкость, фактически получаем распределение пор по размерам. А последняя характеристика почвенных пор отвечает именно за влагопроводность. Получается, что, имея ОГХ, мы получаем основу для количественной характеристики не только сил водоудерживания внутренней (по А.А. Роде) природы, но распределения пор по размерам, характеризующее способность почвы проводить поток влаги, в том числе и ненасыщенный, т.е. влагопроводность.

В современной гидрологии и математическом моделировании движения влаги в почве эта идея А.А. Роде о двуедином характере водоудерживания в почве приобрела математические взаимосвязанные выражения в виде двух уравнений: Ван Генухтена и Муалема ([Simunek et al., 2001](#), [2003](#)), которые взаимосвязаны и представляют собой основу для расчета переноса влаги в почве. Уравнение Ван Генухтена описывает водоудерживание в широком диапазоне давлений влаги, а уравнение зависимости влагопроводности от давления влаги (уравнение Муалема) использует некоторые параметры уравнения Ван Генухтена, например, распределение пор по размерам. В результате в современной гидрологии реализовалась основополагающая идея А.А. Роде о двуединой природе удержания влаги в почве. Она оказалась чрезвычайно плодотворной, и большинство современных расчетных и управляющих

моделей используют взаимосвязанные вышеприведенные уравнения (Ван Генухтена и Муалема) для описания и прогноза переноса влаги в почвах. Не забудем, что в основе всех моделей переноса влаги, веществ и тепла в почве лежит идея, высказанная А.А. Роде, о двуединой природе водоудерживания в почве, о взаимосвязи собственно удержания влаги силами почвенной природы (капиллярными, менисковыми и пр.) и способностью почвы проводить поток влаги, ее влагопроводностью.

Учение А.А. Роде о наименьшей и капиллярной влагоемкостях и современные направления оценки гидрологических констант. Нельзя не отметить центральное положение в гидрологии почв, обоснованное и развитое А.А. Роде – учение о наименьшей влагоемкости (НВ) почв. Этой гидрологической константе А.А. Роде уделял огромное внимание, придавая ей чрезвычайно важное как гидрологическое, так и почвенно-генетическое значение. Действительно, А.А. Роде считал, что “влажность почвы, т.е. содержание в почве влаги, можно определить как нормальную, если она не превышает НВ, и как повышенную, если она больше этой величины” ([Соколова, 2011](#), с. 123). Алексей Андреевич связывал с величиной НВ граничное состояние гидрологии почв: если почва имеет некоторое определенное время влажность выше НВ, то она (или отдельные почвенные горизонты) уже может быть отнесена к гидроморфной.

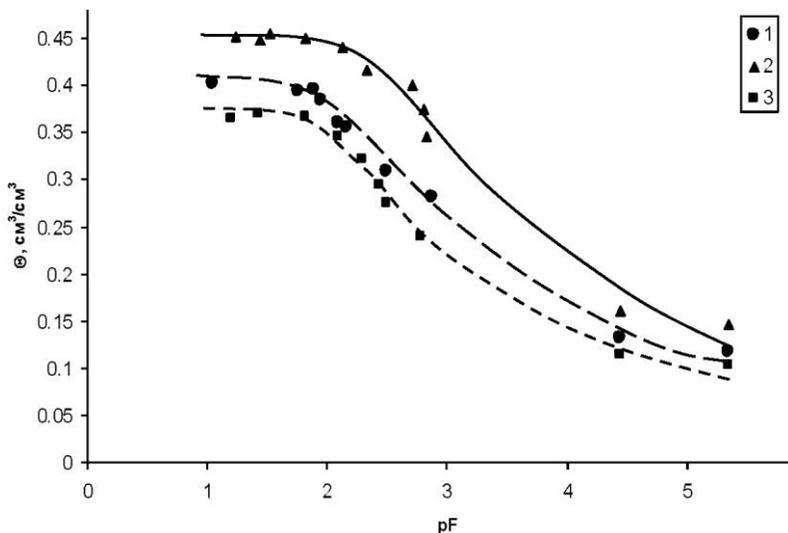
Но особо важное значение для последующего развития почвенной гидрологии имело положение А.А. Роде об истинной наименьшей влагоемкости. А.А. Роде четко указывал, что наименьшая влагоемкость “... представляет собой скорее узкий интервал величин влажности”, чем строго определенную величину (константу). Более или менее определенной величиной является лишь истинная НВ. Варьирование НВ вызывается, во-первых, ее естественной пространственной изменчивостью, а во-вторых, и это самое главное, постепенностью прекращения стекания гравитационной влаги” ([Роде, 1969](#), с. 172). Алексей Андреевич доказывает это многочисленными, длительными и тщательными экспериментами: стекание влаги под действием гравитационных сил происходит весьма длительно, поэтому в полевых экспериментах достичь теоретического значения НВ практически невозможно, а истинная НВ – понятие во многом теоретическое, концептуальное. Для прак-

тических целей лучше указывать диапазон, точнее, интервал значений влажности, полученной на 1- и 10-й день свободного внутрипочвенного стекания после заливки пробных площадок.

Что же следует из этого положения А.А. Роде об истинной НВ? Очевидно то, что трудно получить равновесную величину НВ. На данный момент понятно, что найти значение НВ из равновесной изотермической кривой ОГХ теоретически невозможно, если точно следовать определению НВ как наибольшему количеству влаги, которое почва в природном залегании может удержать в неподвижном состоянии после обильного или искусственного увлажнения и стекания влаги. Как доказал А.А. Роде длительными, многолетними (!) экспериментами, гравитационный перенос существует долгое время, и истинной однозначной НВ может быть только в теории. А ведь целая эпоха в почвенной гидрологии связана с попытками определить величину давления влаги, при которой создается влажность, соответствующая НВ, идеи о взаимосвязи величины влагоемкости с определенными давлениями влаги. В большинстве зарубежных школ влажность, соответствующая давлению влаги -330 см водн. ст., считалась (и в ряде случаев, до сих пор считается) равной наименьшей влагоемкости. Это позволяло в лаборатории на образцах быстро и массово определять эти величины, практически важные для расчета режимов орошения, диапазона доступной влаги. В российской школе [А.Д. Ворониным \(1984\)](#) разработан подход, когда с помощью линейных уравнений (секущих) можно рассчитать из ОГХ различные влагоемкости. Этот подход фундаментально обоснован, проверен на многих объектах и как теоретико-сравнительный применяется и поныне. Однако сейчас в целом достигнуто понимание того, что нельзя приписывать влажности при определенном давлении, либо влажности, полученной из равновесной ОГХ, смысл влагоемкости и впоследствии использовать ее для расчетов ([Пачепский, 1992](#); [Теории и методы..., 2007](#)). Видимо, этот подход по определению почвенно-гидрологических констант нельзя признать строго физически обоснованным, а, следовательно, перспективным для современной гидрологии. Именно об этом и писал А.А. Роде, указывая, что строго теоретически можно говорить лишь об истинной НВ; достичь же ее в практических экспериментах невозможно. Это теоретическое предсказание А.А. Роде мож-

но считать откровением для почвенной гидрологии, истинное значение которого открывается только в настоящее время.

Не меньшее внимание А.А. Роде уделял и еще одной почвенно-гидрологической константе в области капиллярной влаги – капиллярной влагоемкости. Здесь необходимо сделать некоторое упоминание о формах капиллярной влаги в почве – о капиллярно подвешенной и капиллярно-подпертой влаге (отметим, образы-то какие!). Капиллярно-подвешенная влага остается в почве после стекания гравитационной влаги при свободном ее оттоке. Это состояние соответствует наименьшей влагоемкости, а если “...в процессе увлажнения почвы гравитационная влага смыкается с влагой капиллярной каймы и вследствие этого накапливается в почвенной толще в форме подпертой капиллярной влаги, наступает второй случай насыщения – капиллярное насыщение почвы водой. Давление почвенной влаги и здесь остается отрицательным” (Роде, 1969, с. 160). Это случай капиллярно-подпертой влаги, когда процесс оттока влаги не лимитирует наступление равновесия, ведь капиллярная влага подперта уровнем грунтовых вод, а значит процесс равновесия наступил, нет необходимости ждать окончания процесса оттока, как в случае с наименьшей влагоемкостью. Но Алексей Андреевич подчеркивает: “Давление почвенной влаги и здесь остается отрицательным” (Роде, 1969, с. 160). Значит можно говорить о равновесном значении давлении влаги и соответствующей влажности почвы, т.е. о некоторой точке на кривой ОГХ, соответствующей капиллярной влагоемкости. И такая точка по современным представлениям о равновесии почвенной влаги имеется – это давление входа воздуха (или давление барботирования). Это действительно особая точка на кривой ОГХ, точка перегиба этой кривой при полулогарифмическом изображении. Рассмотрим несколько примеров (рисунок) экспериментально полученных методом капилляриметров и равновесия над насыщенными растворами солей KCl и K₂SO₄ (Теории и методы..., 2007) ОГХ гумусовых горизонтов суглинистых почв. Во всех приведенных примерах в области давлений влаги pF от 1 до 2 происходит смена формы кривой: она резко, практически параллельно оси абсцисс (оси pF) ниспадает к оси ординат (оси объемной влажности, θ).



Основные гидрофизические характеристики пахотных горизонтов тяжелосуглинистых почв (1 – агросерой лесной, Владимирская область, 2 – чернозема типичного (Курская область), 3 – дерново-подзолистой Московская область Зеленоградский стационар Почвенного института им. В.В. Докучаева, с. Ельдигино).

Обычно в современной гидрологии почв эту точку называют точкой давления входа воздуха; эта величина варьирует в пределах от $-10(-15)$ до $-180(-200)$ см водн. ст. ([Шеин, 2005](#); [Brooks, Corey, 1964](#)). В приведенных примерах она изменяется от -23 см водн. ст. для серой лесной почвы и -29 см водн. ст. для дерново-подзолистой до -87 см водн. ст. для чернозема типичного.

Действительно, в этот момент давление влаги понижается настолько, что капиллярные силы уже не в состоянии удерживать влагу в крупных капиллярах, в них входит воздух; в почве уже в полной мере представлена трехфазная капиллярная система: твердая фаза–почвенная капиллярная влага–почвенный воздух. Но давление влаги в этот момент отрицательно (и на указывал А.А. Роде).

Этот резкий перегиб ОГХ оказался серьезным “камнем преткновения” для описания ОГХ с помощью математического выражения. А такая необходимость возникла при использовании ОГХ в качестве экспериментального обеспечения математических

моделей влагопереноса, в которых эта функция в процессе расчетов непрерывно дифференцируется, рассчитывается дифференциальная влагоемкость.

Точно и прогрессивно поступили в этом случае Брукс и Кори ([Brooks, Corey, 1964](#)), разделив весь диапазон ОГХ на участки до давления входа воздуха и для остальной области давлений, вплоть до давлений, соответствующих остаточной влажности (θ_r):

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} |\alpha P_{k-c}|^{-n} & \text{для } P_{k-c} \leq -\frac{1}{\alpha} \\ 1 & \text{для } P_{k-c} \geq -\frac{1}{\alpha} \end{cases},$$

где α – эмпирический параметр, равный обратной величине давления входа воздуха, или давления барботирования; $S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ – относительная влажность; $\theta_s, \theta_r, \theta_i$ – влажности насыщения, остаточная и соответствующая капиллярно-сорбционному давлению влаги (P_{k-c}); n – положительный, более 1, эмпирический параметр.

Вторая, весьма удачно и наиболее часто используемая функция для описания ОГХ в широкой области давлений влаги или в области влажностей от влажности насыщения до остаточной влажности, была предложена в 1980 г. американским физиком почв ван Генухтенем ([van Genuchten, 1980](#)):

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{1}{1 + (\alpha P_{k-c})^n} \right)^m & \text{для } P_{k-c} < 0 \\ \theta_s & \text{для } P_{k-c} \geq 0 \end{cases},$$

где $m = 1 - 1/n$, $n > 1$ также является эмпирическим параметром, характеризующим крутизну наклона ОГХ.

Таким образом, в случае равновесия капиллярно-подпертой влаги, в случае капиллярной влагоемкости, найдено соответствующее равновесное состояние давление влаги – влажность на кривой ОГХ в виде точки, соответствующей давлению входа воздуха или давлению барботирования. Впоследствии [А.Д. Воронин](#) ([1984](#)) было показано, что прямая, параллельная оси влажностей и соответствующая давлению входа воздуха, отсекает на кривой ОГХ значения, указывающие на наличие в почве гравитационной влаги и открывающие область капиллярной влаги.

Следует отметить и еще один важный момент в преемственности понятийного аппарата, разработанного А.А. Роде, относительно наименьшей и капиллярной влагоемкостей и его значения

для современной гидрологии почв. В настоящее время нечасто в научной литературе, докладах, сообщениях встретишь такие разные термины, как “капиллярно-подпертая”, “капиллярно-подвешенная влага”. Считается, что это некий рудимент, словесный атавизм, не имеющий к современной количественной, строго цифровой гидрологии отношения. Однако, это не так. До настоящего времени эти образы состояния почвенной влаги хорошо воспринимаются студентами, легко доносятся до аудитории преподавателями, как яркие, понятные и строго научные образы. Повсеместно в курсах “Физики почв”, “Гидрологии почв”, “Математического моделирования в почвоведении” эти образы А.А. Роде составляют ярчайшую палитру преподавателя, с помощью которой он рисует сложную многокрасочную и яркую картину почвенной гидрологии.

Благодарность. Работа осуществлена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-04-01624, литературный обзор и теоретические исследования) и РНФ (проект № 14-16-00065, экспериментальные исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронин А.Д.* [Основы физики почв](#). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 205 с.
2. *Глобус А.М.* [Экспериментальная гидрофизика почв](#). Л.: Гидрометеоздат, 1969. 356 с.
3. *Глобус А.М.* Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 427 с.
4. *Пачепский Я.А.* [Математические модели в мелиорируемых почвах](#). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 65 с.
5. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Т. II. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 286 с.
6. *Соколова Т.А.* Алексей Андреевич Роде – человек, ученый, борец. Тула: Гриф и К, 2011.
7. [Теории и методы физики почв](#) / Под ред. Шеина Е.В., Карпачевско-го Л.О. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
8. *Шейн Е.В.* [Курс физики почв](#). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
9. *Brooks R.H., Corey A.T.* Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper 3. Colorado St. Univ. Fort Collins, 1964.
10. *Horn R.* Soil water – storage potential, accessibility and flux as key functions for land use planning at various scales – do we need a paradigm change? // Book of Abstracts, Eurosoil / Eds. Blum W.H., Gerzabek M.H., Vodrazka M. Vienna, 2008. P. 41.

11. *Simunek J., Wendroth O., Wypler N., van Genuchten M.T.* Non-equilibrium water flow characterized by means of upward infiltration experiments // *Euro-p. J. Soil Sci.* 2001. V. 52. P. 13–24.
12. *Simunek J., Jarvis N.J., van Genuchten M.T., Gardenas A.* Nonequilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone: review and case study // *J. Hydrology.* 2003. V. 272. P. 14–35.
13. *van Genuchten M.T.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. V. 44. P. 892–898.

THEORETICAL BASIS OF SOIL HYDROLOGY IN THE WORKS A.A. RODE AND MODERN APPROACHES TO THE DESCRIPTION OF WATER MOVEMENT AND EQUILIBRIUM IN THE SOIL

E. V. Shein^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119991, Moscow, Leninskiye Gory, 1*

²*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskii 7, bld. 2*

Classical Russian soil hydrology created by works of A.A. Rode, his colleagues and associates is based on the concept of water forms in the soil and soil hydrological constants. At the present state of development the soil hydrology uses all conceptual approaches designed by A.A. Rode and his colleagues which allow us to characterize the soil hydrology as an actively developing science, which has its own historical path, principles, application limits, benefits and possible long-term development path, which uses the developed and experimentally confirmed by A.A. Rode concept of “capillary-suspended” and “capillary-backed” water and, accordingly, the field and the capillary soil water capacities. The current stage of soil hydrology is characterized by the active application of quantitative approaches. At the present, in hydrology the soil water retention curve takes the central place, which stand out as the break point corresponding to the capillary water capacity and values of “air entrance pressure”. The examples describe the nonlinear characteristics the water retention curves with clearly dedicated air inlet pressure for heavy soddy-podzolic soil, gray forest soil and chernozem. Shaped hydrological characteristics of A. A. Rode such as “capillary-suspended” and “capillary-backed” soil water are still actively used in actual educational process.

Keywords: soil hydrology, soil hydrological constants, soil water retention curve.