УДК 631.423.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИПОЧВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ В ЧЕРНОЗЕМАХ АГРОЛАНДШАФТОВ УЙМОНСКОЙ МЕЖГОРНОЙ КОТЛОВИНЫ (БАССЕЙН Р. КАТУНЬ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛТАЙ)

Бабошкина С.В., Пузанов А.В., Ельчининова О.А., Рождественская Т.А., Кузнецова О.В., Балыкин С.Н., Трошкова И.А.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, e-mail: svetlana@iwep.ru

Полуэмпирическим расчетным методом педотрансферных функций получены основные гидрофизические характеристики (ОГХ), а также функции влагопроводности черноземов обыкновенных Уймонской котловины (бассейн р. Катунь, Центральный Алтай), различного сельскохозяйственного назначения. Параметры аппроксимации ОГХ уравнением Ван Генухтена определены в программе RETC, на основе экспериментальных данных о гранулометрическом составе почвы, ее плотности сложения, влажности завядания и наименьшей влагоемкости. Границы гранулометрических фракций почв, определенные по методу Качинского, для использования в RETC были приведены к международной классификации FAO методом линейной интерполяции. С использованием компьютерной программы HYDRUS-1D зарубежных авторов (J. Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina) выполнено моделирование вертикального движения влаги в почвах Уймонской степи и рассчитаны объемы снижения запасов влаги в результате ее инфильтрации в нижние слои за время 10-дневного периода без осадков, с учетом корневого водопотребления. Показано, что в черноземе пашни промачивание всех слоев почвы в ситуации после первоначального атмосферного увлажнения происходит заметно быстрее, а общие влагопотери из верхнего горизонта более существенны, что определяет в нем лучшие условия для выщелачивания при достаточном увлажнении верхнего горизонта, что выражено в сдвиге pH среды в кислую сторону. Вертикальному оттоку влаги в более глубокие слои в почве под сенокосом препятствуют более плотные и хуже проводящие влагу B и C горизонты (с щелочной реакцией среды). При моделировании движения влаги с учетом корневого потребления растениями оказалось, что транспирационный фактор в большей степени корректирует динамику влажности в черноземе под залежью.

Ключевые слова: чернозем, Уймонская котловина, почвенная влага, ОГХ, RETC, HYDRUS-1D, влагопроводность, вертикальное распределение влаги, функция Ван Генухтена, инфильтрация, транспирация

MODELING OF MOISTURE INTERPROFILE MOVEMENT IN CHERNOZEMS E OF AGROLANDSCAPES OF UIMON INTERMOUNTAINE DEPRESSION (KATUN BASIN, CENTRAL ALTAI)

Baboshkina S.V., Puzanov A.V., Elchininova O.A., Rozhdestvenskaya T.A., Kuznetsova O.V., Balykin S.N., Troshkova I.A.

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, e-mail: svetlana@iwep.ru

Water retention curves (WRC) and hydraulic conductivity functions of ordinary chernozems of Uimon intermountain depression (r. Katun basin, Central Altai) were obtained, using semi-empirical calculation methods of pedotransfer functions. Approximation parameters of WRC by Van Genuhten`s equation were determined in RETC program, on the basis of experimental data: particle size distribution of the soil, its density, wilting point and field capacity. The boundaries of soils grain-size fractions determined by the method of Kachynskii, for use in the RETC, were made equal to the International FAO classification by the linear interpolation method. Using a computer program HYDRUS-1D (authors: J. Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina) the modeling of moisture vertical movement in agrochernozems was executed and volumes of moisture reserves reduce due to its infiltration into the lower layers during the dry 10-days period with root water uptake factor were calculated. It is shown that in all soil layers of arable land chernozem wet faster and the general moisture loss from its upper horizon after initial atmospheric wetting up to 10 days without rainfall are more significant (than in the soil of hayfields), that determine better conditions for leaching, during good wetting of A gorizont, which represent by pH change to acidic condition. Vertical outflow of moisture to the deeper layers of the haying soil prevent by high density of B and C horizons with alkaline reaction and less coefficient of hydraulic conductivity. The simulation of moisture movement with the root plants uptake consumption showed that transpiration factor corrects the dynamics of moisture in chernozem of haymaking largely, than in chernozem of plowed field.

Keywords: chernozem, Uinon intermontane depression, soil moisture, water retention curve, RETC, HYDRUS-1D, hydraulic conductivity, moisture vertical distribution, Van Genuhten function, infiltration, transpiration

Экологическое состояние и качество подземных и поверхностных вод в значительной степени определяется состоянием и характером использования водосборной территории, поскольку на ней протекают основные процессы, формирующие химический состав водных объектов. Для адекватной оценки количественного и качественного влияния водосбора на водоток необходимо точно рассчитывать характеристики стока с водосбора и уметь моделировать процессы влагопереноса в почвах.

Таблица 1

Физико-механические и физико-химические показатели агрочерноземов Уймонской котловины

Объект	Горизонт	Гранулометрический состав (%) и классификация по Качинскому			Гранулометрический состав (%) и классификация FAO				Плотность, г/см^3	Порозность, %	Содержание гумуса,%	pH
		Ил, < 0,001	Физич. глина, < 0,01	Принадлежность	Clay < 0,002	Silt 0,002–0,05	Sand > 2	Принадлежность				
Чернозем (сенокос)	Ад	7,1	29,6	л-сугл.	12,0	51,1	36,9	Silt loam	0,88	62,9	4,7	7,1
	В	12,2	40,8	ср.-сугл.	19,8	42,6	37,6	Loam	1,26	51,1	2,1	8,0
	С	16,2	38,1	ср.-сугл.	21,0	40,2	38,8	Loam	1,36	48,0	1,1	7,9
Чернозем (пашня)	Ап	7,2	34,5	ср.-сугл.	15,3	45,0	39,7	Loam	1,07	58,7	9,5	6,8
	В	7,7	27,0	л-сугл.	13,0	41,9	45,1	Loam	1,14	55,4	5,4	6,6
	С	4,8	16,9	супесь	10,0	33,4	56,6	Sandy loam	1,17	57,8	3,6	7,7

Модели почвенных гидрологических процессов и режимов, опираясь на специальное гидрофизическое экспериментальное обеспечение, позволяют рассчитывать процессы переноса влаги и растворенных веществ в почвах. При этом получение соответствующего обеспечения модели является весьма важным этапом в гидрологическом исследовании [9].

Процесс поступления в почву воды и ее последующее распределение является важной составляющей режима любой почвы. В почвах сухих степей, где практически единственным источником поступления воды является атмосферная влага, особый интерес представляет процесс впитывания воды и ее дальнейшее перераспределение в ненасыщенной влагой сухой почве (инфильтрация) [8]. Количественной характеристикой водоудерживающей способности почв является основная гидрофизическая характеристика (ОГХ), как зависимость между капиллярно-сорбционным давлением влаги (Р*к-с*) и влажностью. Вертикальное движение влаги в ненасыщенных влагой степных почвах характеризуется функцией влагопроводности – зависимостью между коэффициентом влагопроводности (К*вл*) и Р*к-с* [8].

Целью работы является анализ водно-физических свойств черноземов обыкновенных агроландшафтов Уймонской котловины различного режима сельскохозяйственного использования, а также моделирование процесса нисходящего движения в них влаги в ситуации после осадков, с учетом транспирационного фактора.

Материалы и методы исследования

Объектами данного исследования были выбраны черноземы обыкновенные Уймонской котловины – одного из межгорных понижений Центрального Алтая (бассейн р. Чендек, левый приток р. Катунь). В настоящее время почвенный покров котловины представлен в основном черноземами обыкновенными распаханными. Рассматриваемые нами агроландшафты занимают выровненный и топографически однородный участок с уклоном поверхности около 0°. Первый вариант – пашня, посевы овса, стадия – выход в трубку. Второй вариант – залежь, разнотравно-злаковая ассоциация. На этих двух полях были заложены почвенные разрезы на расстоянии не более 100 м друг от друга. Отбор проб проводился 8 июля 2014 года. По архивным данным сайта www.rp5.ru 5 июля 2014 года шли ливневые дожди и выпало в сумме 14 мм осадков, а с 6 по 8 июля выпало еще 3,5 мм осадков. На момент наблюдений верхний горизонт изучаемых нами черноземов был отчетливо более влажный, чем нижние слои.

Полевые и лабораторные исследования были проведены общепринятыми стандартизированными методами. Полевая влажность определялась термостатно-весовым методом, плотность почвы – методом режущего кольца, плотность твердой фазы – пикнометрически. Гранулометрический состав почв определяли пипеточным методом по Качинскому. Общую пористость определяли через соотношение плотности сложения почвы и плотности ее твердой фазы [1]. Определение наименьшей влагоемкости в поле проводили через 24 ч после окончания заливочных экспериментов на водопроницаемость [1, 9]. Содержание гумуса в почве определяли методом мокрого сжигания по Тюрину, pH – потенциометрически [2].

Для аппроксимации функции ОГХ (основной гидрофизической характеристики) агрочерноземов использовали наиболее широко известное в настоящее время в мировом почвоведении уравнение Ван Генухтена:

$$\theta(P) = \frac{\theta s - \theta r}{\left(1 + (\alpha P)^n\right)^m} + \theta r,$$

где $m = 1 - 1/n$, θ – равновесная влажность (влажность, соответствующая определенному давлению почвенной влаги P, θs – влажность, близкая к влажности насыщения, θr – остаточная влажность, α – величина, обратная величине капиллярно-сорбционного давления, приближающегося к давлению входа воздуха, n – крутизна кривой [8, 9]. Восстановление ОГХ проводилось полуэмпирическим расчетным методом

с помощью педотрансферных функций (ПТФ) – зависимостей, позволяющих восстановить ОГХ по традиционно определяемым базовым свойствам почв (как правило, это гранулометрический состав, а также плотность, порозность, содержание органического вещества и др.) [8]. В данной работе использовались ПТФ Rosetta Lite 1.1, заложенные в программе RETC [10]. Для получения параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена использовались экспериментально полученные данные гранулометрического состава, плотности, порозности, наименьшей влагоемкости и влажности завядания. Границы фракций гранулометрического состава были приведены к границам международной классификации FAO методом линейной графической интерполяции [7].

Процесс вертикального перемещения влаги из черноземов обыкновенных Уймонской степи различного сельскохозяйственного использования в ситуации первоначального насыщения только верхних горизонтов влагой описан с помощью системы компьютерного моделирования влагопереноса в почвах HYDRUS-1D (США, авторы: J. Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina, адрес: www.hydrus2d.com). Расчеты проводили для почв, каждый горизонт которых обладал своими водно-физическими свойствами. Гидрологический режим черноземов моделировали для периода в 10 (июльских) дней без последующих атмосферных осадков. Верхнее граничное условие задавалось как «Постоянный поток», а на нижней границе принималось «Постоянное давление». Моделирование отрицательного (нисходящего) передвижения влаги проводилось с учетом поглощение воды корнями растений. В этом случае выбрали подмодель этого процесса в Main process, а в команде The Root Water Uptake Parameters – параметры корневого потребления для определенного вида культуры из встроенной базы данных: в случае пашни под посевами овса – «Corn – vegetative period», в случае сенокоса – «Grass». Распределение плотности корневых систем строилось в графическом редакторе (Soil Profile – Graphical Editor). Далее, в команде Water Flow (Constant Boundary) на верхней границе задавали интенсивность потенциальной транспирации [7] – максимальное испарение, которое может происходить при данных погодных условиях над конкретным растительным покровом сельскохозяйственной культуры, находящейся в оптимальных агрономических условиях (без стрессов). Величину Root water uptake 1,4 мм/сут. мы принимали, исходя из сравнений с величинами потенциальной транспирации (а также эвапотранспирации, испарения) и расчетов через величины урожайности и коэффициенты водопотребления, приводимыми в работах других авторов [3–6].

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам нашего исследования, в черноземе под сенокосом верхний А*д* горизонт более рыхлый, менее плотного сложения, наиболее пористый и отличается облегченным гранулометрическим составом (табл. 1). С глубиной в этом варианте чернозема плотность сложения и содержание глинистой и илистой фракций растет. В профиле чернозема пашни, наоборот, с глубиной происходит облегчение гранулометрического состава со среднесуглинистого до супесчаного, хотя плотность и порозность почвы при этом не снижаются. Сравниваемые варианты черноземов существенно отличаются по содержанию гумуса – в почве пашни его содержание в 2 раза выше, чем в почве под сенокосом. При этом почва под посевами овса отличается нейтральным pH среды, тогда как в почве под сенокосом реакция среды слабощелочная.

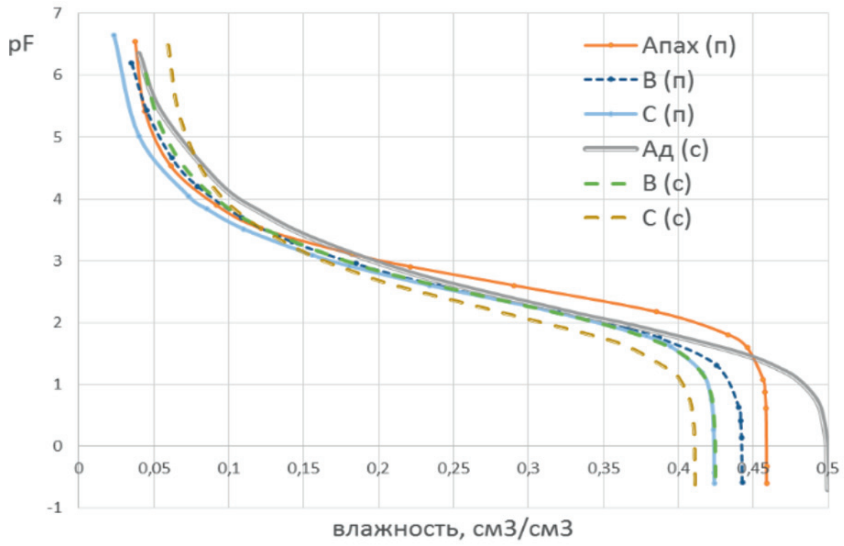


Рис. 1. Кривые ОГХ различных горизонтов агрочерноземов Уймонской степи различного режима использования – под пашней (посевы овса) и под залежью (сенокос, разнотравье)

Таблица 2

Гидрофизические свойства чернозема обыкновенного под залежью.
Параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван Генухтена и коэффициенты фильтрации

Горизонт (глубина, см)	θ_s, см^3/см^3	θ_r, см^3/см^3	n	α	Кф, см/сут
А*д* (2–16)	0,500	0,0255	1,3196	0,0245	161,2
В (16–26)	0,4248	0,0365	1,4145	0,0112	31,4
С (26–40)	0,4112	0,0556	1,4228	0,0165	23,72

Таблица 3

Гидрофизические свойства чернозема обыкновенного под пашней.
Параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван Генухтена и коэффициенты фильтрации

Горизонт (глубина, см)	θ, см^3/см^3	θ_r, см^3/см^3	n	α	Кф, см/сут
А*п* (0–26)	0,459	0,0354	1,5362	0,0054	88,26
В (26–40)	0,4427	0,0283	1,3922	0,013	76,95
С (40–55)	0,4241	0,0193	1,4281	0,010	84,67

Для расчетов и моделирования процесса движения влаги в HYDRUS 1D было решено применить параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван Генухтена и коэффициенты фильтрации, полученные по ПТФ Rosetta программы RETC с использованием данных гранулометрического состава (приведенные к международной классификации FAO методом линейной интерполяции) (SSC), плотности (BD), наименьшей влагоемкости (TH33), влажности завядания (TH1500) (табл. 2–3).

Кривые водоудерживания изученных нами суглинистых черноземов Уймонской степи, как правило, имеют выраженную S-образность и наиболее дифференцированы в области капиллярной и гравитационной форм влаги (рис. 1).

В состоянии, близком к насыщению (P < – 50), наибольшей влагоудерживающей способностью отличается верхний гумусово-аккумулятивный горизонт чернозема под залежью – наиболее легкий по гранулометрическому составу и наиболее рыхлый. В области капиллярной (pF = 1,7–3) и пленочно-капиллярной малоподвижной влаги (pF = 3–4,5) наибольшей влагоудерживающей способностью отличается среднесуглинистый, наиболее гумусированный и довольно пористый верхний А*п* горизонт пашни. Наилучшими влагоудерживающими свойствами в области пленочной и адсорбированной форм влаги (pF > 4,5) обладает один из наиболее тяжелых по гранулометрическому составу и наиболее плотный С*к* горизонт под сенокосом, что объясняется увеличенным содержанием в нем мелких пор, которые удерживают влагу при низких значениях давления [8].

В области полного насыщения почвы влагой наибольшей влагопроводностью (и наибольшим коэффициентом фильтрации) отличается наиболее легкий по гранулометрическому составу и наиболее рыхлый А*д* горизонт почвы под сенокосом (рис. 2). При этом значительно более плотные В и С горизонты этого варианта чернозема отличаются самыми низкими влагопроводящими свойствами, что, очевидно, будет затруднять вертикальное нисходящее движение влаги в этих почвах. В области от капиллярного механизма удержания влаги (P > – 10 см водн. ст.) лучшими влагопроводящими свойствами отличается чернозем, используемый под посевы овса (пашня). Почва под сенокосом в условиях иссушения будет проводить влагу заметно хуже.

Для расчета движения влаги в почве в качестве начальных условий взяли природную полевую ситуацию, когда, на момент отбора проб (на 8 июля 2014 года) влажность верхних горизонтов была порядка 30 %, а подпахотных В горизонтов – 16–18 %. Судя по ОГХ (график (рис. 1) и матрица из программы RETC), в рассматриваемых почвах эти значения влажности соответствовали значениям давления порядка – 270 – – 290 см водн. ст. в верхних горизонтах и – 640 – – 660 см водн. ст. в подпахотных В горизонтах. Однако, при практически одинаковых величинах капиллярно-сорбционного давления более суглинистый, гумусированный и более плотный А*п* горизонт почвы под посевами овса изначально будет содержать больше объемной влаги (0,325 см^3/см^3), т.к. отличается большей влагоемкостью (рис. 1, 4).

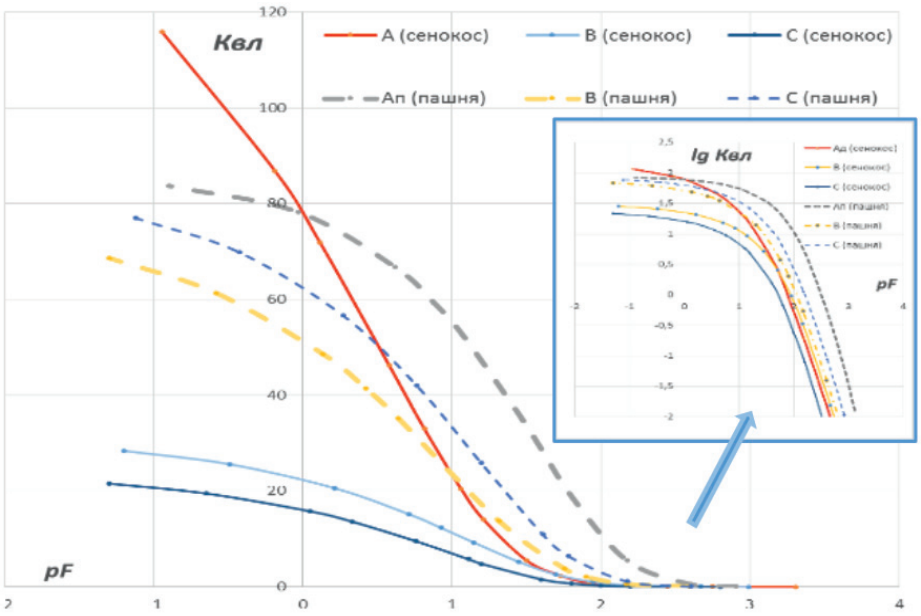
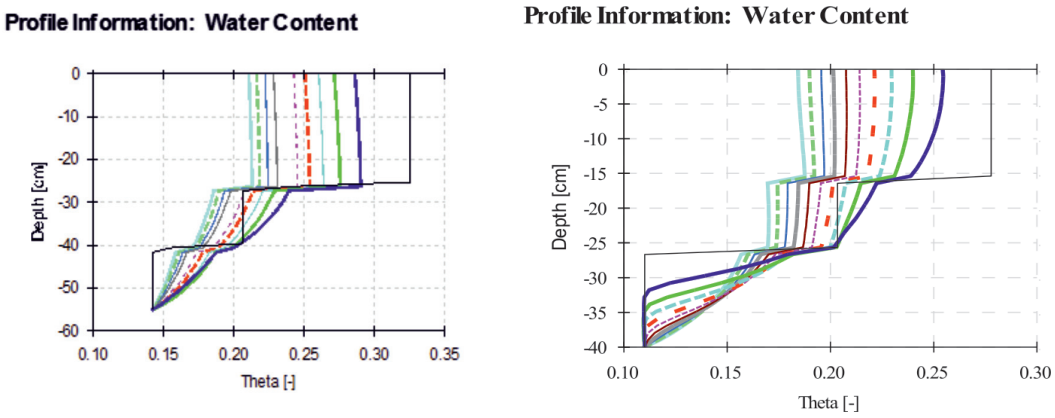


Рис. 2. Функции влагопроводности для А, В и С горизонтов черноземов агроландшафтов Уймонской степи



а) чернозем под пашней *б) чернозем под залежью*

Рис. 3. Динамика профильного распределения влажности (см³/см³) в черноземах обыкновенных различных агроландшафтов Уймонской котловины (результат моделирования за 10-дневный период без осадков, с учетом корневого потребления растениями)

Характер и динамика распределения влаги в рассматриваемых условиях в агрочерноземах различного сельскохозяйственного использования Уймонской котловины заметно различаются (рис. 3, а–б). Можно отметить, что в почве пашни за первые двое суток за счет большего К*вл* нижележащих горизонтов В и С происходит довольно быстрое промачивание всех слоев почвы (рис. 3, а) – нисходящее движение влаги в почве пашни по макропорам и трещинам, очевидно, происходит более интенсивно, чем в почве под залежью.

В последующие дни (в отсутствие дополнительного атмосферного увлажнения) нижележащие горизонты В и С почвы под пашней полученную из верхнего горизонта влагу постепенно теряют, происходит

постепенное иссушение всех слоев почвы, причем до значений ниже исходной величины. Что касается чернозема под залежью, то, несмотря на более легкий гранулометрический состав верхнего А*д* горизонта, в первый день влага не проникает на всю глубину почвенной толщи, а только до глубины 32 см (рис. 3, б). Очевидно, вертикальному внутрипочвенному стоку препятствуют существенно более низкие К*вл* в менее пористых и более плотных В и С горизонтах (рис. 2).

В целом за 10 суток, последующих после дождей, с учетом корневого потребления влаги растениями, почва под пашней теряет из верхнего А*п* горизонта глубиной 26 см 0,114 $см^3/см^3$ влаги или 29,5 мм водного слоя что на 5,5 мм больше в случае моделирования простого вертикального внутрипочвенного оттока, без учета транспирации. Объемная влажность изменяется в А*п* горизонте с учетом корневого потребления от 0,325 до 0,211 $см^3/см^3$ или (на весовую влажность) от 30,4% до 22,5%. Потери влаги в почве под сенокосом, особенно в А*д* горизонте – более рыхлом и легком по гранулометрическому составу и с более плотным распределением корней, оказались более существенным, по сравнению с простым вертикальными оттоком, без учета транспирации, что особенно заметно по А*д* и В горизонтам. За 10 суток влажность А*д* горизонта с учетом корневого потребления изменится от 0,279 $см^3/см^3$ до 0,183 $см^3/см^3$ (или с 31,8% до 16,1%), влагопотери составят 0,096 $см^3/см^3$ или 15,4 мм водного слоя (для 16 см почвенной толщи), что на 6,8 мм (почти в 2 раза) больше, если корневое потребление при моделировании не учитывать.

Очевидно, в условиях достаточного начального увлажнения в рыхлой и крупнопористой почве пашни формируются более благоприятные условия для вертикального оттока влаги, а значит, для выщелачивания различных солей и соединений (например, карбонатов), что выражено в снижении уровня pH до нейтральных величин (табл. 1). В почве под залежью, в которой значения pH существенно выше, потери влаги в результате вертикального оттока в целом менее существенны – вертикальному оттоку в более глубокие слои препятствуют уплотненные В и С горизонты. Существенные коррективы в водный баланс почвы под разнотравной залежью вносит корневое потребление влаги.

Заключение

Моделирование вертикального нисходящего движения влаги в черноземах обыкновенных Уймонской котловины в ситуации начального атмосферного увлажнения верхних горизонтов и корневого потребления влаги растениями с применением пакета HYDRUS-1D показало, что из двух сравниваемых участков (под залежью и под посевами овса) в черноземе пашни промачивание всех слоев почвы более быстрое и происходит уже в первые сутки. Полученная во время атмосферных осадков влага сравнительно быстро двигается вниз по почвенным порам пахотного варианта чернозема. В результате в почве пашни формируются более благоприятные условия для выщелачивания, что находит свое отражение, например, в снижении уровня pH до нейтральных величин, по сравнению с почвой под залежью. В почве под разнотравьем, в которой pH существенно выше и наблюдается щелочная реакция среды всех горизонтов, вертикальному оттоку влаги в более глубокие слои препятствуют уплотненные В и С горизонты, кроме того, значительная доля поступившей в нее атмосферной влаги поглощается корнями растений.

Список литературы

1. Агрохимические методы исследования почв. / Отв. ред. А.В. Соколов. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 655 с.

2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. Отв. ред. А.И. Бусев. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.

3. Архангельская Т.А. Математическое моделирование водного режима двух агрочерноземов с различным уровнем залегания карбонатов / Т.А. Архангельская, О.С. Хохлова, Т.Н. Мякшина // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – т. 8. № 2. – С. 401–410.

4. Зерновые культуры (Выращивание, уборка, хранение и использование) / Под ред. Д. Шпаара. – М.: ИД ООО «DLV АГРОДЕЛО», 2008. – 656 с.

5. Козырева Л.В. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом / Л.В. Козырева, Ю.Р. Ситдикова, А.Е.Ефимов, А.В.Доброхотов // Агрофизика. – 2013. – № 4(12). – С. 12–19.

6. Смагин А.В. Моделирование гидрологической функции лесной подстилки / А.В. Смагин // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 10–20.

7. Шеин Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций / Е.В. Шеин // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 309–317.

8. Шеин Е.В. Курс физики почв. / Е.В. Шеин. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.

9. Шеин Е.В. Моделирование процесса водопроницаемости черноземов каменной степи / Е.В. Шеин, Д.И. Щеглов, В.В. Москвин // Почвоведение. – 2012. – № 6. – С. 648–657.

10. Scaap M.G. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions / M.G. Scaap, F.J. Leij, M.Th. Van Genuchten // Journal of Hydrology. – 2001. – Vol. 251. – № 3–4. – P.163–176.