

alnom okruge / A.B. Ponomarev // Agroprodovolstvennaia politika Rossii. – 2019. – No. 1 (85). – S. 23-28.

4. Zhamalova, D.B. Priemy vozdelevaniia lna maslichnogo v usloviakh Severnogo Kazakhstana: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk: 06.01.01 / Zhamalova Dinara Bulatovna. – Ust-Kinelskii, 2017. – 19 s.

5. Shpaar, D. Iarovye maslichnye kultury / D. Shpaar, Kh.K. Ginapp, V. Shcherbakov [i dr.]. – Minsk: «FU Ainform», 1999. – 288 s.

6. Medvedev, G.A. Priemy povysheniia produktivnosti lna maslichnogo v podzone iuzhnykh chernozemov Volgogradskoi oblasti / G.A. Medvedev, N.G. Ekaterinicheva // Izvestiia Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyshee professionalnoe obrazovanie. – 2016. – No. 1 (41). – S.57-63.

7. Avdeenko, A.P. Produktivnost lna maslichnogo v zavisimosti ot normy vyseva i gerbitsidov / A.P. Avdeenko // Uspekhi sovremennoi nauki. – 2015. – No. 4. – S. 19-22.

8. Tishkov, N.A. Effektivnost primeneniia udobrenii na posevakh lna maslichnogo v usloviakh Severnogo Kavkaza / N.M. Tishkov [i dr.] //

Maslichnye kultury: nauch.-tekhn. biul. VNIIMK. – 2005. – Vyp. 2 (133). – S. 63-68.

9. Zundorf K. (1988). Hat der Olleinanbau bei uns Chancen. *Top agrar*. 6: 36-37.

10. Mamyрко, Iu.V. Sostoianie proizvodstva i puti povysheniia ekonomicheskoi effektivnosti vozdelevaniia lna maslichnogo v usloviakh iuga Rossii / Iu.V. Mamyрко [i dr.] // Maslichnye kultury: nauch.-tekhn. biul. VNIIMK. – 2018. – Vyp. 3 (175). – S. 64-71.

11. Latartsev, P.Iu. Effektivnost raznykh vidov azotnykh udobrenii pod len maslichnyi v usloviakh kolochnoi stepi Altaiskogo kraia / P.Iu. Latartsev, O.I. Antonova // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 10 (192). – S.13-19.

12. Bushnev, A.S. Realizatsiia geneticheskogo potentsiala semennoi produktivnosti novykh sortov maslichnogo lna s uchetom sovremennykh resursosberegaiushchikh tekhnologii luzhnogo Federalnogo okruga / A.S. Bushnev, T.N. Luchkina, G.I. Orekhov // Maslichnye kultury. – 2020. – Vyp. 3 (183). – S. 84-91.



УДК 631.423.2

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-218-12-55-65

**С.В. Бабошкина, А.В. Пузанов,  
Т.А. Рождественская, О.А. Ельчинова  
S.V. Baboshkina, A.V. Puzanov,  
T.A. Rozhdestvenskaya, O.A. Elchinina**

## ДИНАМИКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УЙМОНСКОЙ СТЕПИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

### AGRICULTURAL SOIL MOISTURE DYNAMICS IN THE UYMON STEPPE OF THE REPUBLIC OF ALTAI

**Ключевые слова:** Уймонская степь, чернозем обыкновенный, HYDRUS-1D, основная гидрофизическая характеристика, гидрологические параметры почвы, влажность, педотрансферные функции, компьютерное моделирование.

Интенсивная сельскохозяйственная эксплуатация степных ландшафтов приводит к прогрессирующей деградации их почвенного покрова: питательные свойства черноземов ухудшаются, развивается эрозия,

происходит засоление. В работе проанализированы гидрологические параметры и режим влажности черноземов агроландшафтов Уймонской степи в условиях естественного увлажнения за 7-дневный период лета 2022 г. В программе HYDRUS-1D выполнено моделирование изменения запасов влаги в верхних почвенных горизонтах сразу после осадков (25 мм за 2 дня), в условиях повышенной влажности воздуха, невысоких температур и минимальной эвапотранспирации, с учетом корневого водопотребления. Основные гидрологи-

ческие параметры почвы (параметры аппроксимации основной гидрофизической характеристики) чернозема обыкновенного сельскохозяйственного ландшафта получены с помощью педотрансферных функций Rosetta Lite в программе RETC с использованием данных о гранулометрическом составе, плотности, порозности, наименьшей влагоемкости, влажности завядания, влажности на пределе текучести. Установлено, что в верхнем пахотном горизонте параметр  $\alpha$  (величина, обратная величине давлению входа воздуха в капилляры при иссушении почвы) существенно ниже, чем в более плотных В и С горизонтах, что типично для почв, подверженных вспашке. В программе Surfer построены хроноизоплеты влажности, наглядно отражающие изменение состояния увлажненности почвенных горизонтов чернозема пашни Уймонской степи во время и после дождей. Выявлено, что данные моделирования хорошо соотносятся с экспериментальными данными об изменении влажности в почве в период с 11 по 17 июля 2022 г., что позволит в дальнейшем на основании полученных ОГХ черноземов Уймонской степи делать прогнозы и выполнить гидромелиоративные расчеты. Установлено, что уже на 4-й день после выпадения 25 мм осадков и начальном уровне влажности в верхнем пахотном горизонте 26% давление во всех почвенных слоях чернозема обыкновенного выравнивается, в отсутствие градиента давления нисходящий переток влаги между горизонтами практически прекращается. Показано, что хорошая водопроницаемость верхнего пахотного горизонта не означает оптимальный водный режим всей почвенной толщи.

**Keywords:** *Uymon steppe, ordinary chernozem, HYDRUS-1D software, water retention curve (WRC), soil hydrological parameters, moisture content, pedotransfer functions, computer simulation.*

Intensive agricultural exploitation of steppe landscapes leads to progressive degradation of their soils: the soil

nutritional values are reduced, erosion develops, and salinization occurs. This paper analyzes the hydrological parameters and moisture regime of the chernozems of the agrolandscapes in the Uymon steppe for a 7-day period with natural moisture in the summer of 2022. In the HYDRUS-1D software environment, we simulated the changes of moisture storage in the upper soil horizons immediately after precipitation (25 mm over 2 days) under the conditions of high air humidity, low temperatures and minimal evapotranspiration taking into account root water consumption. The main hydrological parameters of the soil (the parameters of the water retention curve approximation) of the ordinary chernozem of agricultural landscape were obtained using pedotransfer functions of Rosetta Lite in the RETC software using the data on particle-size distribution, density, porosity, the lowest water capacity, wilting moisture, and yield point moisture. It was found that in the upper arable horizon of chernozem, the parameter  $\alpha$  (the reciprocal of the pressure of air entering the capillaries when the soil dries) was significantly lower than in the denser B and C horizons, which was typical for soils subject to plowing. Moisture chronoisopleths created in the Surfer software clearly reflected the change of moisture in the soil horizons of the arable chernozem of the Uymon steppe during and after rains. It has been found that the simulation data are in good agreement with the experimental data on soil moisture changes in the period from July 11 to July 17, 2022. It will make it possible in the future, on the basis of the WRC obtained for the chernozems of the Uymon steppe, to forecast the moisture change and perform irrigation and drainage calculations. It has been found that already on the 4th day after the fall of 25 mm of precipitation and the initial level of moisture in the upper arable horizon of 26%, the pressure in all soil layers of the ordinary chernozem is equalized, and in the absence of a pressure gradient, the downward flow of moisture between the horizons practically stops. It is shown that good water permeability of the upper arable horizon does not mean the optimal water regime of the entire soil depth.

**Бабошкина Светлана Вадимовна**, к.б.н., ст. науч. сотр., Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: svetlana@iwep.ru, arsenida@rambler.ru.

**Пузанов Александр Васильевич**, д.б.н., профессор, директор, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: puzanov@iwep.ru.

**Рождественская Тамара Анатольевна**, к.б.н., ст. науч. сотр., Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: rtamara@iwep.ru.

**Ельчинова Ольга Анатольевна**, д.с.-х.н., директор, Горно-Алтайский филиал, Институт водных и экологических проблем СО РАН, с. Кызыл-Озек, Республика Алтай, Российская Федерация, e-mail: GA-Viver@mail.gorny.ru.

**Baboshkina Svetlana Vadimovna**, Cand. Bio. Sci., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul, Russian Federation, e-mail: svetlana@iwep.ru, arsenida@rambler.ru.

**Puzanov Aleksandr Vasilevich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Director, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul, Russian Federation, e-mail: puzanov@iwep.ru.

**Rozhdestvenskaya Tamara Anatolevna**, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul, Russian Federation, e-mail: rtamara@iwep.ru.

**Elchinova Olga Anatolevna**, Dr. Agr. Sci., Director, Gorno-Altayskiy Branch, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Kyzyl-Ozek, Republic of Altai, Russian Federation, e-mail: GA-Viver@mail.gorny.ru.

## Введение

Устойчивое управление почвами является важной глобальной проблемой XXI в. С одной стороны, для обеспечения пропитанием примерно 8 млрд чел. необходимо создание и поддержание экологически устойчивой производственной системы. С другой стороны, состоянием и характером использования водосборной территории в значительной степени определяется качество подземных и поверхностных вод. Потепление климата и ожидаемые изменения средних и экстремальных количеств осадков подчеркивают важность изучения процессов хранения и транспортировки влаги поверхностью суши [1]. Актуальность исследуемой проблемы обусловлена и прогрессирующей деградацией почвенного покрова, его интенсивной эксплуатацией, ухудшением водного и питательного режима почв сельхозугодий, эрозией, засолением и опустыниванием. Для поддержания биологической продуктивности почв степной зоны чрезвычайно важна точная информация об их водном режиме.

Процессы поступления воды в почву, ее последующего удержания и распределения являются важной составляющей режима любой почвы и значительно определяются физическими свойствами почвы – плотностью, порозностью, гранулометрическим составом. В настоящее время в почвоведении существует понятие «физическое качество почв», которое существенно определяет урожайность сельскохозяйственных культур. 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 почве (инфильтрация) [2] – ключевой процесс, который разделяет осадки на поверхности земли на поверхностный сток и воду, поступающую в почвенный профиль [3].

Главной количественной характеристикой водоудерживающей способности почв является основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) – зависимость между капиллярно-

сорбционным давлением влаги ( $P_{k-c}$ ) и влажностью. Вертикальное движение влаги в ненасыщенных влагой степных почвах характеризуется функцией влагопроводности – зависимостью между коэффициентом влагопроводности ( $K_{вл}$ ) и  $P_{k-c}$  [2].

Расчет и моделирование процессов влагопереноса в почве с учетом ее физико-химических и гидрофизических свойств позволяет выполнить модель HYDRUS 1D (США, авторы: J.Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina, адрес: [www.hydrus2d.com](http://www.hydrus2d.com), свободный доступ). Опираясь на специальное гидрофизическое экспериментальное обеспечение, HYDRUS 1D учитывает влияние структуры почвы на ее гидравлические свойства и позволяет довольно точно рассчитывать процессы переноса влаги в почвах [4].

**Целью** работы является изучение динамики влажности и процесса инфильтрации влаги в черноземе обыкновенном распаханном Уймонской межгорной котловины в условиях естественного увлажнения, после осадков.

## Объекты и методы исследования

Объектами данного исследования были выделены черноземы обыкновенные агроландшафтов Уймонской котловины (одно из межгорных понижений Центрального Алтая), на озерно-делювиальных суглинисто-щебнистых отложениях. Дно котловины является обширной слабо-волнистой равниной, рельеф которой осложнен руслами притоков р. Катунь. В настоящее время почвенный покров дна Уймонской котловины представлен в основном черноземами обыкновенными и южными, практически полностью распаханнами. Средняя годовая норма осадков в котловине 450-600 мм, основное их количество выпадает в период с мая по июль, коэффициент увлажнения в это время составляет 0,7-0,8.

Основным условием получения хорошего урожая в степных агроландшафтах является создание оптимальных режимов влаги и тепла в профиле их почв, ведь именно гидротермический режим обуславливает достаточное питание

растений, влияет на их рост и развитие [5]. В летнее время при недостатке влаги злаковые культуры плохо кустятся, отстают в росте, и в таком случае основные агроприемы должны быть направлены на создание запасов влаги в почве посредством гидромелиорации [6], однако ее применение невозможно без знания основных гидрологических свойств возделываемых почв.

Рассматриваемый агроландшафт занимает выровненный, топографически однородный участок и представлен участком пашни под посевами овса.

Полевые и лабораторные исследования были проведены общепринятыми методами. Полевая влажность определялась термостатно-весовым методом (ГОСТ 5180-84), плотность сложения почвы – методом режущего кольца, плотность твердой фазы – пикнометрически. Гранулометрический состав почв определяли пипеточным методом по Качинскому. Общую пористость устанавливали через соотношение плотности сложения почвы и плотности ее твердой фазы. Определение наименьшей влагоемкости (НВ) в поле проводили через 24 ч после окончания заливочных экспериментов на водопроницаемость [7], влажность устойчивого завядания (ВЗ) растений – методом вегетационных миниатюр (проростков) согласно ГОСТ 28268-89, предел текучести (ПТ) – по ГОСТ 5180-84, используя балансирный конус, максимальную гигроскопичность (МГ) почвы – методом насыщения почвы парообразной влагой согласно ГОСТ 28268-89.

Для аппроксимации основной гидрофизической характеристики агрочерноземов (ОГХ) использовали наиболее широко известное в настоящее время в мировом почвоведении уравнение Ван-Генухтена:  $\theta(P) = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha P)^n)^m} + \theta_r$ , где  $m=1-1/n$ ,  $\theta$  – равновесная влажность (влажность, соответствующая определенному давлению почвенной влаги  $P$ ,  $\theta_s$  – влажность, близкая к влажности насыщения,  $\theta_r$  – остаточная влажность,  $\alpha$  – величина, обратная величине капиллярно-сорбционного давления, приближающего-

ся к давлению входа воздуха,  $n$  – крутизна кривой [2, 4, 8]. Восстановление ОГХ проводилось с помощью педотрансферных функций (ПТФ) Rosetta Lite 1.1 – зависимостей, позволяющих построить кривую ОГХ по традиционно определяемым базовым свойствам почв [2]: показателям гранулометрического состава почв, приведенным к системе Международной классификации FAO, данных о плотности, НВ (ТН33 в Hydrus 1D) и ВЗ (ТН1500). Кроме того, при расчете параметров аппроксимации ОГХ в программе RETC для более точного построения кривой были заданы дополнительные параметры: показатель ПТ – влажность почвы в этом состоянии соответствует давлению  $pF=2,17$ , а также показатель МГ, соответствующее  $pF=4,5$ . Подробное описание получения параметров аппроксимации ОГХ черноземов Уймонской степи можно найти в наших предыдущих публикациях [9].

Моделирование вертикального влагопереноса в черноземах Уймонской котловины проводилось в HYDRUS-1D для 7-дневного периода, в котором в первый день было без осадков, затем два дня с различной интенсивностью шли дожди, после чего четверо суток осадков практически не наблюдалось.

В реальных условиях в Уймонской котловине в июле дожди проходят не чаще чем раз в 2-3-10 дней, причем за 1 раз выпадает, как правило, не более 20 мм осадков. Исследования проводились летом 2022 г.

Пробы почвы на влажность были отобраны вечером 10 июля, в трех повторностях за несколько дней до отбора проб (6 июля и утром 10 июля) шли дожди, и верхний пахотный горизонт был заметно более влажный, чем нижележащие слои почвы. Влажность Апах горизонта составляла 26% ( $0,279 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ), В горизонта – 18,5% ( $0,211 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) и С горизонта – 15% ( $0,176 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ). В последующие два дня (12, 13 июля) шли дожди и выпало 18 и 7 мм осадков. 14 и 15 июля выпало всего по 0,5 мм осадков. Последние 2 дня 16 и 17 июля рассматриваемого периода осадков не было. Второй раз пробы на влажность были отобраны че-

рез 4 дня после дождей, 17 июля (до вечернего дождя).

При моделировании движения влаги в черноземе обыкновенном распаханном Уймонской степи в Hydrus 1D в разделе Water Flow Boundary condition на нижней границе мы задали «свободный дренаж» – выбор этой опции производится, когда уровень грунтовых вод находится значительно ниже рассматриваемой области, за пределами интересов исследования. Верхнее граничное условие задавалось как «Атмосфера с поверхностным стоком» – это условие позволяет моделировать движение влаги в почве в периоды дождя и после него. В реальных условиях в Уймонской степи количество осадков, выпадающих летом, не насыщает почву влагой, что позволяет рассматривать только процесс инфильтрации влаги в почву. Долгих и интенсивных дождей летом в Уймонской степи практически не наблюдается, почва не бывает

увлажнена до показателя полной влагоемкости, чтобы можно было рассчитать сток.

Для моделирования движения влаги в почве в исследуемый промежуток времени в Time Variable Boundary Condition было задано 5 периодов, различающихся по количеству выпавших осадков. Температура в период исследования изменялась днем от 25°C 11 июля до 15-21°C 14 и 15 июля, 17 июля воздух днем прогревался всего до 16-18°C. В условиях повышенной влажности и невысоких дневных температур эвапотранспирация не будет существенно влиять на динамику влажности в верхнем горизонте, однако для начальных и конечных условий мы, ориентируясь на литературные данные [10, 11], приняли величину потенциальной транспирации 0,12 мм/день.

Таблица 1

**Периоды моделирования с различными условиями атмосферного увлажнения**

№ периода	Дни по счету	Даты	Осадки, мм	Температура дневная, °С	Потенциальная транспирация, мм/сут.
Старт	0	10.07.2022	0	17-23	1,2
1	1	11.07.2022	0	17-22	1,2
2	2	12.07.2022	18	22-26	0
3	3	13.07.2022	7	23-25	0
4	4-5	14-15.07.2022	1	11-15	0
5	6-7	16-17.07.2022	0	21-23	1,2

Чтобы учесть процесс поглощения воды корнями растений, в Main process выбирали опцию Root Water Uptake, а в The Root Water Uptake Parameters задавали подходящие показатели корневого потребления для определенного вида культуры из встроенной базы данных. Было выбрано «Corn – vegetative period», в котором оптимальное поглощение воды корнями овса (между давлением  $P_{opt}$  и  $P_2$ ) происходит в диапазоне давления влаги в почве от -25 до -500 см водн. ст., что соответствует исходным природным условиям содержания (и давления) влаги в изучаемых черноземах Уймонской степи на рассматриваемые даты исследования.

В графическом редакторе (Soil Profile – Graphical Editor) при построении распределения корневых систем на глубине 0-15 см плотность корней задавали постоянную, с ее линейным снижением на всю глубину профиля.

Хроноизоплеты влажности почвенной толщи строились в программе Surfer.

**Результаты исследования и обсуждение**

В таблице 2 представлены результаты физико-химического и физико-механического анализов образцов почв чернозема обыкновенного Уймонской степи: данные о плотности, порозности, гранулометрическом составе и расчетное содержание гранулометрических фракций по



международной классификации FAO. Плотность сложения рассматриваемой почвы увеличивается с глубиной, тогда как гранулометрический состав нижнего горизонта более легкий, чем верхнего и среднего.

В таблице 3 приведены показатели влажности почвы в различных ее критических состояниях, которые можно использовать для более точного расчета параметров аппроксимации

ОГХ. При построении кривой влагоемкости можно воспользоваться только данными о гранулометрическом составе почвы, а можно, для большей точности, согласно «методу секущих» Воронина [12] ввести и дополнительные данные, такие как плотность, ВЗ, НВ, а также ПТ (соответствующий состоянию капиллярной влагоемкости) и МГ.

Таблица 2

Физико-механические показатели агрочернозема Уймонской котловины

Объект	Горизонт	Гранулометрический состав: содержание фракций (%) и классификация по Качинскому			Гранулометрический состав: содержание фракций (%) по классификации FAO				Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Порозность, %
		ил, <0,001 (мм)	физич. глина, <0,01 (мм)	принадлежность	Clay <0,002 (мм)	Silt 0,002 –0,05 (мм)	Sand >2 (мм)	принадлежность		
Чернозем (пашня) [Chernozem(arable land)]	Ап	7,2	34,5	ср.-сугл.	15,3	45,0	39,7	Loam	1,07	58,7
	В	7,7	27,0	л-сугл.	13,0	41,9	45,1	Loam	1,14	55,4
	С	4,8	16,9	супесь	10,0	33,4	56,6	Sandy loam	1,17	57,8

Таблица 3

Почвенно-гидрологические показатели – данные для расчета параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена чернозема распаханного Уймонской котловины полуэмпирическим методом с использованием педотрансферных функций Rosetta программы RETC

Горизонт	МГ (pF=4,5)	ВЗ (pF=4,18)	НВ (pF=2,52)	ПТ (pF=2,17)	ПВ
Ап	6,1 (0,065)	9,0 (0,08)	33 (0,35)	43 (0,39)	43 (0,47)
В	5,2 (0,060)	6,1 (0,07)	23 (0,26)	33 (0,38)	38 (0,44)
С	4,3 (0,05)	5,5 (0,06)	21 (0,25)	28 (0,33)	36 (0,42)

Примечание. МГ – максимальная гигроскопичность, ВЗ – влажность завядания, НВ – наименьшая влагоемкость, ПТ – предел текучести, ПВ – полная влагоемкость (в скобках приведены объемные значения влажности, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>).

Считается, что величину влажности завядания можно определить и расчетным путем, умножая МГ исследуемой почвы на коэффициенты от 1,3 до 1,6. Например, для пшеницы используют коэффициент 1,35 [6]. Полученные

нами методом проростков (согласно ГОСТ 28268-89) значения влажности завядания соотносятся с показателем МГ в интервалах от 1,2 до 1,48.

Таблица 4

**Параметры аппроксимации ОГХ чернозема обыкновенного под пашней (Алтай, Уймонская степь)**

Горизонт (глубина, см)	$\Theta_s$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$\Theta_r$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$n$	$\alpha$	Кф, см/сут.
А <sub>р</sub> (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

По результатам исследования максимальные значения влагоудерживающей способности и остаточной влажности характерны для верхнего гумусового пахотного горизонта, а минимальные – для почвообразующей породы. В свое время такая же закономерность была обнаружена в черноземах выщелоченных Алтайского Приобья [13].

Использование дополнительных почвенно-гидрологических (в % влажности) данных для расчета параметров аппроксимации ОГХ (функцией Ван-Генухтена) чернозема распаханного Уймонской котловины существенно скорректировали форму полученной кривой влагоудержания. При расчетах параметров аппроксимации ОГХ с учетом ВЗ, МГ и ПТ показатели влажности насыщения, остаточной влажности,  $\alpha$  и  $n$  существенно изменялись, особенно в верхнем почвенном горизонте. Так, в А<sub>р</sub> горизонте оказалось очень низкое значение  $\alpha$  (табл. 2) – величина, обратная величине напора входа воздуха в крупные капилляры, при иссушении почвы сразу после ее насыщения влагой [2]. Сама величина давления входа воздуха в крупные капилляры графически соответствует месту первого изгиба кривой ОГХ: когда давление влаги в почве близко к 0 и при высыхании почвы начинает снижаться, влажность почвы изменяется не сразу, сначала происходит только изменение

кривизны менисков в капиллярах, после чего часть крупных капилляров опустошается, и в них входит воздух [2]. Считается, что способ обработки почвы влияет на ее физико-химические свойства и основные почвенно-гидрологические характеристики: например, показатель  $\alpha$  заметно ниже в почвах, которые постоянно испытывают воздействие вспашки, чем в почвах естественных ландшафтов. Учеными установлено [14], что величина  $\alpha$  в почвах с безотвальной обработкой ( $\alpha=0,0227$ ) выше, чем в традиционно вспахиваемых почвах ( $\alpha=0,0187$ ). В наших предыдущих исследованиях также показано, что в почве, которая не испытывает ежегодного вспахивания (под сенокосом), величина  $\alpha$  заметно выше, чем в почве под овсом [9].

Для моделирования динамики влажности в Hydrus 1D в графическом редакторе в пункте Исходные условия было задано начальное давление почвенной влаги для каждого горизонта (без плавного снижения), соответствующие начальному показателю влажности: в верхнем пахотном горизонте – 450 см водн. ст., в В горизонте – 600 и в нижнем горизонте – 900 см водн. ст. (табл. 5). Давление влаги в почве было определено, исходя из полученных в программе RETC кривых ОГХ и измеренных показателей влажности на момент отбора проб.

Таблица 5

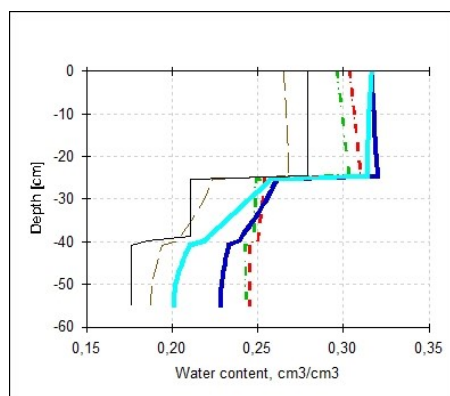
**Начальные условия влажности и давления в черноземе под пашней**

Горизонт (глубина, см)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность		P, см водн. ст.
		весовая, %	объемная, см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	
А пах (0-26)	1,07	26	0,261	-450
В гор (26-40)	1,14	18,5	0,211	-600
С гор (40-55)	1,17	15	0,176	-900

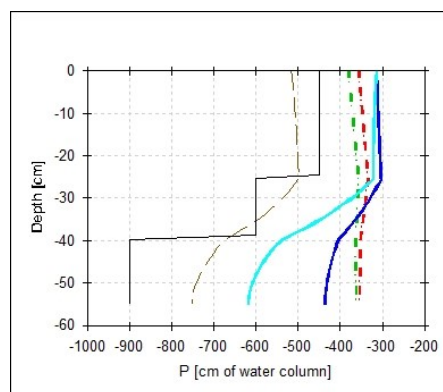
Моделирование в Hydrus 1D позволяет показать, как изменяются значения влажности и давления почвенной влаги в черноземе сельскохозяйственного использования под культурой овса за семидневный период, как происходит увеличение содержания влаги в верхнем почвенном горизонте, затем инфильтрация влаги в нижние горизонты (до выравнивания давления почвенной влаги) и далее, постепенное иссушение верхнего почвенного горизонта (рис. 1).

Поскольку интенсивность осадков 1,8 см/день значительно ниже коэффициента фильтрации в пахотном горизонте (88 см/день), полного насыщения почвы влагой (до уровня  $\theta_s=0,459$ ) в естественных условиях Уймонской степи произойти не может. Содержание влаги в черноземе обыкновенном после выпадения осадков 18+7 мм составило  $0,316 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , или 30%, что

немного ниже уровня наименьшей влагоемкости ( $0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , или 33%). Нижележащие слои (В и С горизонты) в условиях периодического увлажнения верхнего горизонта постепенно насыщаются влагой, нисходящий отток влаги из А в В и далее в С горизонт происходит даже в период отсутствия осадков. Однако высокая плотность В и С горизонтов препятствует быстрому проникновению в них влаги. Потеря воды верхним горизонтом в условиях высокой атмосферной влажности и незначительной эвапотранспирации (но с учетом корневого потребления влаги) происходит постепенно. В конце рассматриваемого периода давление во всех слоях почвы практически выравнивается и нисходящий переток влаги из верхнего горизонта в нижние на 7-й день практически прекращается (рис. 1).



а



б

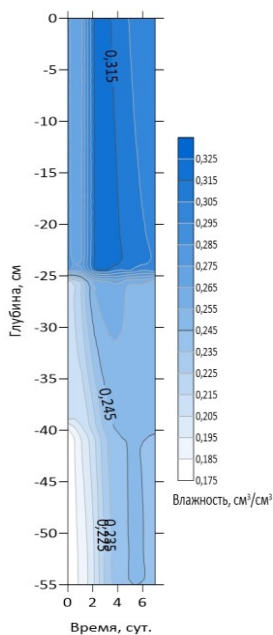
**Рис. 1. Динамика объемной влажности: а) и давления влаги; б) в черноземе обыкновенном, распаханном под посевами овса в июле 2022 г. в условиях естественного атмосферного увлажнения, после осадков 25 мм**

На рисунке 1 представлены изменения показателей содержания А) влаги (объемной, в  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ) и Б) давления почвенной влаги в профиле чернозема обыкновенного сельхозугодий. Видим, что в первый день после начала эксперимента, 11 июля (тонкая штрих-линия), когда не было осадков, содержание влаги в верхнем почвенном горизонте снижается за счет корневого водопотребления, транспирации и нисходящего перетока влаги. Последнее отражается в увеличении влажности В и С горизонтов и по-

степенном вертикальном выравнивании давления почвенной влаги. После дождя 12 июля (18 мм) (толстая сплошная светлая линия) содержание влаги во всех почвенных горизонтах заметно выросло. Второй дождь (7 мм) 13 июля уже не привел к существенному увеличению влажности верхнего Апах горизонта – влага продвигалась вглубь почвенного профиля (толстая темная линия на графике). В последующие 2 сут. (штрих-пунктирный график) в верхнем пахотном горизонте содержание влаги снижается



за счет корневого потребления, а также нисходящих потоков влаги, т.к. продолжают увлажняться В и С горизонты. Однако к 7-му дню эксперимента давление во всех почвенных слоях выравнивается (рис. 1 Б, двойной штрих-пунктирный график), при отсутствии разницы в давлении нисходящий переток влаги между горизонтами прекращается, и содержание влаги начинает постепенно снижаться не только в Апах горизонте, но и в В и С горизонтах (двойной штрих-пунктирный график) в результате корневого потребления и процесса эвапотранспирации.

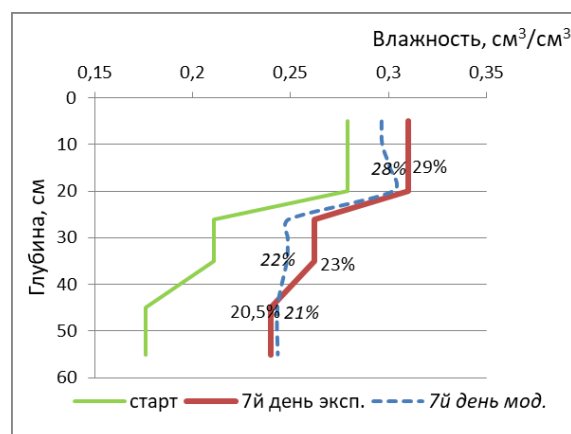


**Рис. 2. Хроноизоплеты влажности чернозема обыкновенного распаханного Уймонской степи в период с 10 по 17 июля 2022 г. (по результатам моделирования движения влаги в почве в Hydrus 1D)**

На рисунке 2 представлены хроноизоплеты влажности почвенной толщи чернозема пашни за период 7 дней. Здесь более наглядно видна разница между увлажненностью верхнего рыхлого и менее плотного пахотного горизонта, и В горизонтами. Проникновение влаги между ними затруднено в том числе из-за большей плотности В горизонта. Высокая влагоемкость верхнего рыхлого пахотного горизонта чернозема не обеспечивает оптимизации водного режима всей почвенной толщи. Перепад давления поч-

венной влаги довольно быстро выравнивается, и дальнейшее насыщение влагой В и С горизонтов замедляется, хотя различия в содержании влаги остаются заметными. Влагообмен между В и С горизонтами происходит довольно равномерно.

При сравнении данных о влажности, полученных экспериментальным путем и с помощью моделирования в HYDRUS 1D (рис. 3), оказалось, что сходимость результатов хорошая, расхождения небольшие (не более 5%). Модель несколько занижает значения содержания влаги в А и В горизонтах, что, возможно, объясняется завышенной величиной потери влаги в результате транспирации (в А горизонте).



**Рис. 3. Реальные и расчетные показатели влажности почвенных горизонтов чернозема обыкновенного Уймонской степи 10 и 17 июля 2022 г.**

Возможно, причиной расхождения данных является также неучтенный при моделировании эффект гистерезиса ОГХ. Известно, что при одном и том же давлении влаги влажность ОГХ, полученная при иссушении, будет выше, чем при увлажнении [2]. Возможно, поэтому реальный уровень увлажненности чернозема, который постепенно теряет влагу в процессе иссушения, оказался немного выше, чем расчетный.

### Заключение

С использованием педотрансферных функций программы RETC получены и проанализированы гидрологические параметры черноземов

агрорландшафтов Уймонской степи. Установлено, что параметр аппроксимации ОГХ Апах горизонта – показатель  $\alpha$  (величина, обратная величине напора входа воздуха) заметно ниже в верхнем горизонте, который постоянно испытывает воздействие вспашки, чем в В и С горизонтах. В программе Hydrus 1D смоделирована динамика влажности почвы в условиях естественного увлажнения за 7-дневный летний период. Установлено, что высокая влагоемкость одного верхнего пахотного горизонта чернозема под посевами овса не обеспечивает оптимальный водный режим всей почвенной толщи. Полученные в результате моделирования показатели динамики влажности чернозема обыкновенного хорошо сходились с экспериментальными значениями определения влажности в почвах, расхождение значений находилось в пределах 5%. Возможно, причиной расхождения данных является неучтенный при моделировании эффект гистерезиса ОГХ, и реальный уровень влажности в постепенно иссушающемся черноземе не много выше, чем расчетный.

#### Библиографический список

1. Seaton, F., Jones, D., Creer, S., et al. (2019). Plant and soil communities are associated with the response of soil water repellency to environmental stress. *Science of the Total Environment*. 687. 929-938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.052.
2. Шейн, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шейн. – Москва: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с. – Текст: непосредственный.
3. Vereecken, H., Weiermüller, L., Assouline, Sh., et al. (2019). Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling. *Vadose Zone Journal*. 18. DOI: 10.2136/vzj2018.10.0191.
4. Simunek, J., Van Genuchten, M., Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*. 6. DOI: 10.2136/vzj2016.04.0033.
5. Макарычев, С.В. О регулировании водного режима чернозема при возделывании озимых культур в целях ликвидации дефицита влаги / С.В. Макарычев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (195). – С. 49-55.
6. Макарычев, С. В. Орошение почвенного покрова поймы реки Алей паводковыми водами Гилевского водохранилища / С. В. Макарычев. – Текст: непосредственный // Владимирский земледелец. – 2022. – № 3 (101). – С. 17-21.
7. Агрохимические методы исследования почв. – Москва: Наука, 1975. – 655 с. – Текст: непосредственный.
8. Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
9. Baboshkina, S.V. Modeling of vertical moisture transfer in agricultural soils under two land use types. / S.V. Baboshkina, A.V. Puzanov, T.A. Rozhdestvenskaya, O.A. Elchinina, I.A. Troshkova, D.N. Balykin // *Soil and Environment*. – 2020. – V. 39, № 2. – P. 211-222.
10. Arkhangel'skaya, T.A. Modeling Water Regime of Arable Chernozems under Bare Fallow and under Corn for Two Growing Seasons with Contrasting Precipitation / T.A. Arkhangel'skaya, O.S. Khokhlova // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52(2). P. 180-186.
11. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом / Л. В. Козырева, Ю. Р. Ситдикова, А. Е. Ефимов, А. В. Доброхотов. – Текст: непосредственный // *Агрофизика*. – 2013. – № 4 (12). – С. 12-19.
12. Shein, E.V., Simulation of water permeability processes in chernozems of the Kamennaya steppe / E.V. Shein, D.I. Shcheglov, V.V. Moskvina // *Eurasian Soil Science*. – 2012. – T. 45, № 6. – С. 578-587.
13. Основная гидрофизическая характеристика черноземов выщелоченных Алтайского приобья в условиях сада / С. В. Макарычев, А. Г. Болотов, И. В. Гейфе [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета.

ственного аграрного университета. – 2014. – № 12 (122). – С. 35-39.

14. Fér, M., Kodešová, R., Hroníková, S., Nikodem, A. (2019). The effect of 12-year ecological farming on the soil hydraulic properties and repellency index. *Biologia*. 75. DOI: 10.2478/s11756-019-00373-1.

### References

1. Seaton, F., Jones, D., Creer, S., et al. (2019). Plant and soil communities are associated with the response of soil water repellency to environmental stress. *Science of the Total Environment*. 687. 929-938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.052.

2. Shein, E.V. Kurs fiziki pochv./ E.V. Shein. – Moskva: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.

3. Vereecken, H., Weiermüller, L., Assouline, Sh., et al. (2019). Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling. *Vadose Zone Journal*. 18. DOI: 10.2136/vzj2018.10.0191.

4. Simunek, J., Van Genuchten, M., Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*. 6. DOI: 10.2136/vzj2016.04.0033.

5. Makarychev, S.V. O regulirovanii vodnogo rezhima chernozema pri vozdeleyvanii ozimnykh kultur v tseliakh likvidatsii defitsita vlagi / S.V. Makarychev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 1 (195). S. 49-55.

6. Makarychev, S.V. Oroshenie pochvennogo pokrova poimy reki Alei pavodkovymi vodami Gilevskogo vodokhranilishcha / S.V. Makarychev // Vladimirsii zemledelets. – 2022. – No. 3 (101). – S. 17-21.

7. Agrokhimicheskie metody issledovaniia pochv. – Moskva: Nauka, 1975. – 655 s.

8. Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of*

*America Journal*. 44. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

9. Baboshkina, S., Puzanov, A., Rozhdestvenskaya, T., et al. (2020). Modeling of vertical moisture transfer in agricultural soils under two land use types. *Soil and Environment*. 39. 211-222. DOI: 10.25252/SE/2020/162260.

10. Arkhangel'skaya, T.A., Khokhlova, O.S. (2019). Modeling Water Regime of Arable Chernozems under Bare Fallow and under Corn for Two Growing Seasons with Contrasting Precipitation. *Eurasian Soil Science*. 52 (2): 180-186. DOI: 10.1134/S1064229319020029.

11. Kozyreva, L.V. Metodika otsenki biologicheskogo vodopotrebleniia posevov dlia resheniia zadach upravleniia vodnym rezhimom / L.V. Kozyreva, Iu.R. Sitdikova, A.E. Efimov, A.V. Dobrokhotov // Agrofizika. – 2013. – No. 4 (12). S. 12-19.

12. Shein, E.V., Shcheglov, D.I., Moskvina, V.V. (2012). Simulation of water permeability processes in chernozems of the Kamennaya steppe. *Eurasian Soil Science*. 45 (6): 578-587. DOI: 10.1134/S1064229312040102.

13. Osnovnaia gidrofizicheskaia kharakteristika chernozemov vyshchelochennykh Altaiskogo Priobia v usloviakh sada // S.V. Makarychev, A.G. Bolotov, I.V. Gefke, I.A. Goncharov, N.A. Goncharov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – No. 12 (122). – S. 35-39.

14. Fér, M., Kodešová, R., Hroníková, S., Nikodem, A. (2019). The effect of 12-year ecological farming on the soil hydraulic properties and repellency index. *Biologia*. 75. DOI: 10.2478/s11756-019-00373-1.

**Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН по проекту № 0306-2021-0003 (№ гос. регистрации 1021032424138-9).**

