

УДК 631.423.2

DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4617

Шифр специальности ВАК: 03.02.13, 25.00.27

Моделирование водного режима почвы под насаждениями яблони горного сада (на примере чернозема выщелоченного опытной станции «Горно-Алтайское»)

С.В. Бабошкина^{1✉}, О.А. Ельчининова², А.В. Пузанов¹, Т.А. Рождественская¹

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, г. Барнаул

² Горно-Алтайский филиал Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, с. Кызыл-Озек

✉ svetlana@iweper.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования водного режима почв сельскохозяйственных обусловлена их прогрессирующей деградацией: эрозией, засолением, опустыниванием. *Цель:* выявить особенности водно-физических свойств и связанные с ними закономерности профильного распределения влаги в черноземе выщелоченном под яблоневым садом в летний период в условиях дефицита осадков. *Методы.* Содержание влаги в почвенных горизонтах определялось термостатно-весовым методом. Для определения гранулометрического состава почв использовали пипеточный метод. Плотность сложения почвы определяли методом режущего кольца, плотность твердой фазы – пикнометрическим методом. При переходе от отечественной к зарубежной классификации гранулометрического состава почв применяли метод графической интерполяции. Моделирование движения влаги в почве выполнялось в программе HYDRUS-1D. Параметры аппроксимации основной гидрофизической характеристики почв уравнением Ван-Генухтена получали расчетным методом педотрансферных функций «Rosetta Lite» программы RETC с использованием данных о плотности почвы и ее гранулометрическом составе. *Результаты.* Установлено, что большей водоудерживающей способностью отличаются верхние хорошо структурированные горизонты чернозема выщелоченного под яблоневым садом, их кривые водоудерживания более выположены. Основная гидрофизическая характеристика более легкого по гранулометрическому составу бесструктурного В2к горизонта смещена в сторону меньшей влажности. Дефицит влаги в почве в период жаркого и сухого летнего периода отмечен только в верхней двадцатисантиметровой толще (14 мм); уровень увлажненности нижних горизонтов, где сосредоточена основная масса корней деревьев, удовлетворительный. В условиях почвенно-мелиоративного эксперимента наименьшие расхождения с измеренными показателями влажности модель демонстрирует через сутки после начала исследования. Быстрому нисходящему проникновению влаги в нижние почвенные слои препятствует низкое давление в глинистых А и АВ горизонтах. Подбор входных параметров и отладка модели по экспериментальным данным позволяет использовать ее для моделирования дальнейших процессов, происходящих в почве. Выявлено, что существенное влияние на распределение влаги в черноземе под яблоневым садом оказывает формирование положительных (восходящих) потоков, обеспечивающих «подтягивание» солей и веществ из нижней части профиля в верхние слои во время засушливых периодов года.

Ключевые слова: почвенная гидрология, основная гидрофизическая характеристика, чернозем выщелоченный, HYDRUS-1D, педотрансферные функции, гранулометрический состав, дефицит влаги, внутрипочвенное движение влаги

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН по проекту FUFZ-2021-0003.

Для цитирования: Моделирование водного режима почвы под насаждениями яблони горного сада (на примере чернозема выщелоченного опытной станции «Горно-Алтайское») / С.В. Бабошкина, О.А. Ельчининова, А.В. Пузанов, Т.А. Рождественская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 1. – С. 147–159. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4617

UDC 631.423.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4617

Computer simulation of the soil water regime under an apple orchard in a mountainous area (using the example of the leached chernozem of the experimental agricultural station Gorno-Altayskoe)

S.V. Baboshkina^{1✉}, O.A. Elchinina², A.V. Puzanov¹, T.A. Rozhdestvenskaya¹

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

² Gorno-Altai branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Kyzyl-Ozek, Russian Federation

✉svetlana@iwep.ru

Abstract. Relevance. Progressive degradation of farmland soils – erosion, salinization, desertification. **Aim.** To establish features of water-physical properties of leached chernozem under an apple orchard and associated patterns of soil profile moisture distribution in summer period when precipitation deficiency observed. **Methods.** Moisture content in soil horizons was determined by the gravimetric method. To determine the granulometric composition of soils, the pipette method was used. The soil bulk density was determined by the cutting ring method. For solid phase density determination the pycnometric method was used. The method of graphic interpolation was used for transition the soil texture classification from Russian to international one. Water infiltration modeling into the soil profile was carried out using the HYDRUS-1D program. The parameters of approximating of the water retention curve of soils by the Van Genuchten equation were obtained by the calculation method of pedotransfer functions «Rosetta Lite» of the RETC program, using data on soil density and soil texture. **Results.** It has been established that the upper well-structured horizons of leached chernozem under an apple orchard have a greater water-holding capacity; their water-retention curves are more flattened. The water retention curve of the more structureless B2k horizon, the soil texture of which is dominated by sandy fractions, is shifted towards lower humidity. During hot and dry summer period the moisture deficiency in the soil was noted only in the upper twenty-centimeter soil column (14 mm). The moisture of the lower horizons, where the bulk of tree roots are concentrated, is satisfactory. The model demonstrates the smallest discrepancies with the moisture values measured during the soil reclamation experiment one day after the start. The downward moisture penetration into the lower soil layers is prevented by low pressure in the clayey A and AB horizons. Selection of input parameters and debugging of the model based on experimental data allows it to be used to simulate further processes occurring in the soil. It was revealed that the formation of positive (upward) water flows, which ensure the “pull-up” of salts and substances from the lower part of the profile to the upper layers during dry periods of the year, has a significant impact on moisture distribution in the chernozem under the apple orchard.

Keywords: soil hydrology, basic hydrophysical characteristics, leached chernozem, HYDRUS-1D, pedotransfer functions, soil texture, moisture deficiency, moisture movement in soil profile

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state task of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS under project FUFZ-2021-0003.

For citation: Baboshkina S.V., Elchinina O.A., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. Computer simulation of the soil water regime under an apple orchard in a mountainous area (using the example of the leached chernozem of the experimental agricultural station Gorno-Altayskoe). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 1, pp. 147–159. DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4617

Введение

Влага в почве является основным фактором всех происходящих в ней процессов. В связи с проблемами, вызванными прогрессирующей деградацией почвенного покрова, миграцией токсичных веществ в почвах, ухудшением состояния почв сельскохозяйственных, их эрозией, засолением и опустыниванием, актуальность исследования водного режима почв в последнее время возрастает. Важность изучения процессов хранения и транспортировки влаги поверхностью суши подчеркивают и ожидаемые вследствие потепления климата изменения коли-

честв осадков [1]. Одним из современных методов изучения водных режимов почв является моделирование – относительно молодое научное направление, которое начало развиваться с середины 60-х гг. прошлого столетия в связи с необходимостью предвидеть последствия, рассчитывать эффективность и выбирать оптимальный вариант мелиоративных мероприятий [2].

Основой для расчетов состояния и переноса влаги в ненасыщенных влагой почвах является модифицированное Л.А. Ричардсом уравнение А. Дарси, описывающее движение влаги в насы-

щенных пористых средах со скоростью потока, пропорциональной гидравлическому напору и коэффициенту фильтрации. В российской физике почв подход с использованием дифференциального уравнения переноса влаги в условиях вадозной зоны стал распространяться в конце 80-х гг. прошлого столетия благодаря работам А.М. Глобуса [3], и гидрофизика почв стала центральной концепцией количественной почвенной гидрологии.

Вертикальное движение влаги в ненасыщенных влагой почвах характеризуется функцией влагопроводности – зависимостью между коэффициентом влагопроводности ($K_{вл}$) и капиллярно-сорбционным давлением влаги в почве ($P_{к-с}$) [4]. В свою очередь, зависимость между $P_{к-с}$ и влажностью описывается главной количественной характеристикой влагоудерживающей способности почв – ее основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) [3], отражающей практически все основные особенности состава и структуры почвенного горизонта. В современной количественной гидрологии почв для расчета переноса влаги в почве на основе ОГХ принято использование прогнозных математических моделей, например, удобной и доступной программы HYDRUS-1D, представляющей собой физически обоснованную модель влаго-, тепло- и солепереноса [5]. ОГХ, аппроксимированная уравнением Ван-Генухтена, и коэффициент фильтрации являются ее основным экспериментальным обеспечением.

Закономерности формирования режима влажности почвы определяются ее гидрофизическими свойствами, которые зависят от плотности, порозности, дисперсности почвенных горизонтов [6]. Внутрипрофильное распределение почвенных частиц различного размера определяет особенности водного, а также воздушного и теплового режимов почв [7].

Яблоня является одним из самых урожайных фруктовых деревьев, но ее выращивание в условиях горной страны во всем мире считается сложной задачей. Горное садоводство – научное направление, за которым стоит огромный труд и постоянное решение различных агротехнических проблем, связанных в том числе с дефицитом тепла, питательных веществ и влаги в субстрате. Так, согласно исследованиям китайских ученых, урожайность яблоневых садов в горных районах северного Китая после достижения максимума (на ранней стадии роста деревьев) существенно снижается, что определяется в том числе возникновением водного стресса на поздних стадиях развития деревьев, особенно в условиях плотной их посадки, когда урожайность сильно зависит от количества осадков. Интересно, что влажность почвы в корнеобитаемом слое при разной плотности произрастания деревь-

ев, согласно этому исследованию, одинаково постепенно снижалась с глубиной [8].

Цель исследования: выявление особенностей водно-физических свойств чернозема выщелоченного под горным яблоневым садом и установление закономерностей профильного распределения влаги в нем в летний период в условиях дефицита осадков.

В задачи исследования входило: 1) определение основных водно-физических и физико-химических свойств почвы под яблоневым садом; 2) проведение почвенно-заливочного эксперимента с построением профилей влажности; 3) выполнение перехода от отечественной (двухмерной) классификации гранулометрического состава почв к международной (трехмерной) методом графической интерполяции с использованием треугольника Ферре текстурных классов почв; 4) получение кривых влагоудержания почвенных горизонтов на основе их базовых физико-химических свойств расчетным методом педотрансферных функций; 5) выделение критически важных состояний почвенной влаги и оценка оптимальности водного режима почвы; 6) моделирование процесса распределения влаги в черноземе выщелоченном под яблоневым садом в HYDRUS-1D с использованием полученных параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена.

Объекты и методы исследования

Алтай обладает богатыми, но главное – в значительной степени уникальными природными условиями для развития горного садоводства. Сегодня садовые хозяйства Горного Алтая с успехом выращивают плоды, ягоды и устойчивый к суровым природным условиям горной страны посадочный материал, за производством которого стоит огромный, в том числе научный труд.

Объектом нашего исследования была выбрана почва под яблоневым садом, который был заложен в 2011 г. на территории ФГУП Опытная станция «Горно-Алтайское», – агрочернозем выщелоченный среднемошный среднегумусный суглинистый, подтаежного эрозионно-денудационного ландшафта Северного Алтая, на карбонатных глинисто-щебнистых делювиально-пролювиальных отложениях. Расположенная в северной низкогорной части Алтая, на высокой наклонной левобережной террасе р. Катунь, на восточной окраине г. Горно-Алтайска, опытная станция «Горно-Алтайское» по почвенно-климатическим факторам является наиболее благоприятной для садоводства территорией Горного Алтая. Сейчас это одно из крупнейших питомниководческих хозяйств Сибири. Рассматриваемый нами агроландшафт занимает чуть наклоненный и топографически однородный уча-

сток, находящийся на склоне юг-юго-восточной экспозиции на высоте 418 м над ур. м. (N 51°56'30''. E 085°59'48,6''). Почвенный разрез (рис. 1) был заложен во вспаханном четыре года назад междурядье шириной 5,5 м в яблоневых насаждениях, в которых встречается в качестве примеси клен, а также другие типичные представители осиново-березово-сосновых разреженных лесов низкогорий Алтая: береза, осина, калина, сосна, липа. Проективное покрытие травянистого яруса составляет не более 50 %, видовой состав фитоценоза в целом соответствует составу типичных в данных природно-климатических условиях злаково-разнотравных полидоминантных лугов (еланей) на лугово-черноземных почвах: ежа сборная, мятлик, земляника, подмаренник северный, осочка, пырей ползучий, золотарник, клевер розовый, клевер белый, горошек мышиный, подорожник ланцетовидный, лапчатка обыкновенная, вероника дубравная.

Верхние горизонты изученной нами почвы под яблоневым садом имеют неоднородную темно-серую до бурой окраску (особенно АВ горизонт, из-за затеков гумуса), хорошо оструктурены. Плотность сложения почвы сверху вниз увеличивается.

Горизонты В чернозема выщелоченного плотные, бесструктурные, окарбоначенные.

Исследования проводились в середине июня 2023 г., в период сильной жары, сопровождавшейся в некоторых районах Алтая интенсивным таянием ледников, что вызвало тогда существенный подъем уровня воды в реках и привело к подтоплению некоторых территорий Республики Алтай. В ходе исследования был проведен почвенно-мелиоративный (заливочный) эксперимент, при котором почва проливалась водой в количестве, эквивалентном выпадению 20 мм осадков. В рассматриваемом случае горизонтальное передвижение влаги считалось малым в сравнении с вертикальным.

Влажность почвы определялась термостатно-весовым методом, гранулометрический состав почв – пипеточным методом по Н.А. Качинскому, плотность сложения почвы определяли методом режущего кольца, плотность твердой фазы – пикнометрически. Общую пористость рассчитывали через соотношение плотности сложения почвы и плотности ее твердой фазы [9].



Рис. 1. Карта-схема расположения и фото объекта исследования: А) Республика Алтай на карте Российской Федерации; В) г. Горно-Алтайск на карте Республики Алтай; С) ОПХ «Горно-Алтайское» на карте г. Горно-Алтайска; D) фото разреза чернозема выщелоченного на участке ОПХ «Горно-Алтайское»

Fig. 1. Research object location map and photo: А) Altai Republic on the Russian Federation map; В) Gorno-Altaysk town on the Altai Republic map; С) experimental agricultural station Gorno-Altayskoe on the Gorno-Altaysk town map; D) leached chernozem section at the Gorno-Altayskoe experimental station plot

Отметим, что в определении плотности сложения почвы существуют некоторые методические нюансы. Известно, что на результат определения плотности сложения (но не на саму плотность) влияет влажность почвы, из-за способности почвы к объемным изменениям (набуханию) под воздействием воды. Почвенные образцы одной и той же почвы, различающиеся по содержанию влаги, различаются и по объему. В идеале эту динамику объема нужно учитывать при определении плотности почвы, т. е. различать плотность сухой почвы на пределе усадки и плотность влажной почвы на пределе набухания [10]. Но еще в 1960-х гг. было предложено определять плотность сложения при значениях влажности, соответствующих наименьшей влагоемкости почвы [11]. В нашей работе в качестве входных данных мы выбрали значения плотности почвенных горизонтов при влажности, соответствующей «физической спелости почвы» – от 23 до 25 % (расхождения измеренных результатов и вычисленных значений увлажненности почвенного профиля при такой плотности оказались минимальны).

Расчет и моделирование процессов влагопереноса в почве с учетом ее физико-химических свойств были выполнены с использованием программы HYDRUS-1D [5]. При расчете параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена по педотрансферным функциям Rosetta Lite 1.1 программа подразумевает использование данных гранулометрического состава по международной классификации FAO, границы фракций которой не совпадают с границами фракций отечественной классификации. Переход от отечественной классификации к международной выполнялся методом графической интерполяции: для каждого горизонта в равномерно-логарифмическом масштабе шкалы была построена интегральная (кумулятивная) кривая гранулометрического состава [4], по которой находилось содержание частиц диаметров по классификации FAO: <0,002 мм – глина, 0,002–0,05 мм – пыль, >0,05 мм – песок. По треугольнику Ферре были найдены соответствующие названия почв по гранулометрии.

Чрезвычайно важен при изучении водного режима плодовых садов (особенно в период отсутствия осадков) показатель эвапотранспирации (ЕТ – *evapotranspiration*). Однако его измерения и расчеты трудно выполнимы и часто не производятся [12]. По литературным данным, для супесчаных садовых почв расчетное (в т. ч. по формуле Пенмана–Монтейна) значение ЕТ составляло 4,2–6,9 мм, а измеренное с помощью весовых лизиметров – 5,7 мм, что указывает на возможность адекватной оценки ЕТ по уравнениям [12]. В нашем исследовании интенсивность потенциальной транспирации

для экосистемы яблоневого сада приняли 2,5 мм/сут. (или 0,000175 см/мин.), исходя из того, что, например, интенсивность потенциальной транспирации для напочвенного покрова лесных экосистем может составлять 3 мм/сут. [13], а для поля с кукурузой – 1,6 мм/сут. [14] (транспирация растениями лесных экосистем больше, чем растениями степей, а испарение с поверхности лесных почв ниже). Эвапотранспирацию, как сумму эвапорации и транспирации, можно рассчитать в программе автоматически, по формуле Пенмана–Монтейта, которая аппроксимирует значение по метеорологическим данным. Для этого во вкладке Метрологические параметры нужно задать высоту (в нашем случае 418 м), широту (51°), скорость ветра (1 м/с), максимальные (25 °С) и минимальные (7 °С) температуры в период исследования. Полученные такими способами результаты моделирования распределения влаги в профиле почвы различались несущественно, хотя на последнем этапе наблюдались расхождения в выраженности положительных потоков влаги.

Задавали равномерно-убывающее распределение корней в почве.

Общие запасы влаги (в мм) в почвенных горизонтах определяли по формуле: $3B=W(\%)*\rho*N(\text{см})*0,1$, где W – влажность в процентах; ρ – плотность; N – мощность почвенного слоя; 0,1 – поправочный коэффициент пересчета в мм водного столба. Дефицит влаги определялся как разница между содержанием влаги в данный момент и показателем наименьшей влагоемкости почвы (НВ), найденной по кривой ОГХ, соответствующей давлению –330 см водн. ст.

Результаты исследования и обсуждение

Содержание гумуса в почве под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское» достигает 4,4 % в верхнем горизонте Ад. Уровень pH верхних горизонтов варьирует от 5,3 до 5,5, реакция среды нижних окарбонатенных слоев щелочная, pH=8,3 (табл. 1). Общая пористость верхних горизонтов с выраженной комковатой структурой достигает 52 % и заметно выше пористости нижних плотных и бесструктурных карбонатных горизонтов В. Есть научные исследования, подтверждающие положительное влияние опавшей листвы яблони (больше, чем других семечковых плодовых деревьев) на физические свойства почв – константы влажности и пористость [15]. Есть мнение, что для выращивания яблони очень важна структура верхнего слоя почвы, его физические свойства (влажность, порозность, плотность) и содержание в нем углерода [16].

Плотность горизонтов изученной нами почвы под яблоневым садом изменяется от 1,18–1,21 г/см³

в верхних А горизонтах до $1,51 \text{ г/см}^3$ в В2к горизонте, показатель постепенно увеличивается с глубиной. Считается, что для выращивания яблоневых культур важным является низкая плотность и высокая гидравлическая проводимость А1 горизонта почвы – особенно в садах, где используются подвой [17]. По мнению австралийских исследователей, при плотности $1,32 \text{ г/см}^3$ и выше А1 горизонты почв яблоневых садов имеют недостаточную воздухопроницаемость, а структура их сильно нарушена [16].

Изученный нами чернозем выщелоченный яблоневое сада опытной станции «Горно-Алтайское» является легкоглинистым по гранулометрическому составу (по отечественной классификации), за исключением горизонта В2к. С глубиной наблюдается изменение гранулометрического состава почвенных слоев (рис. 2): в горизонтах А, АВ и В1к преобладает илистая фракция, но в Вк горизонтах ее доля в гранулометрическом составе заметно уменьшается. В В2к горизонте происходит накопление фракции крупной пыли с размерами частиц $0,05\text{--}0,01 \text{ мм}$, а в нижнем окарибончатом слое, примыкающем к подстилающим карбонатным глинисто-щебнистым отложениям, возрастает участие фракции мелкой пыли.

Неравномерность распределения гранулометрических элементов по почвенному профилю является важным аспектом и играет заметную роль в водном режиме почв: различные по гранулометрическому составу почвенные горизонты могут формировать гидрологические экраны [7], создавать в профиле почвы застойные гидрологические условия, определяя особенности вертикального движения влаги в почве.

По литературным данным, в черноземах выщелоченных под старыми яблоневыми садами Липецкой области гранулометрический состав существенно изменяется, с заметным снижением содержания физической глины. Постепенное замещение глини-

стых фракций почв старых яблоневых садов на песчаные, как и снижение их наименьшей влагоемкости, свидетельствуют, по мнению авторов, о подзолаобразующей активности корней яблони [18].

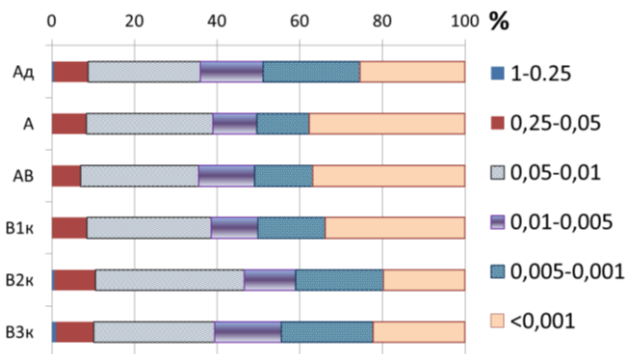


Рис. 2. Диаграмма распределения гранулометрических фракций (по [9]) с глубиной в профиле чернозема выщелоченного под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское»

Fig. 2. Diagram of the granulometric fractions distribution (according to [9]) in the leached chernozem under the apple orchard of the experimental station Gorno-Altaiiskoe

Как уже упоминалось выше, расчет параметров аппроксимации ОГХ почв по педотрансферным функциям Rosetta Lite v.1.1 программы RETC подразумевает использование данных гранулометрического состава почв в границах международной классификации, основанной на пропорциональном содержании песка, пыли и глинистых частиц. Принадлежность к классам в ней находят по равностороннему треугольнику (рис. 3, А), на осях которого отложены процентные содержания песка, пыли и глины – по пересечению линий, отражающих их содержание, можно определить текстурный класс почв.

Таблица 1. Физические и химические свойства агрочернозема под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское»

Table 1. Physical and chemical properties of agrochernozem under the apple orchard of the Gorno-Altaiiskoe experimental station

Горизонт Soil horizon	Содержание гранулометрических фракций, % Content of granulometric fractions, %						ρ, г/см³ g/cm³	ε	Содержание гумуса Humus content	pH
	по Качинскому According to Kachynskii		по классификации FAO according to FAO classification							
	<0,001	<0,01	Глина Clay	Ил Silt	Песок Sand	Название Textural class				
	мм/mm									
Ад	25.3	64,0	33,5	57,7	8,8	Silty clay loam	1,18	52,0	4,4	5,3
А	37.6	60,9	40,5	51,5	8,0	Silty clay	1,20	53,6	2,5	5,4
АВ	36.8	64,4	40,5	52,0	7,5	Silty clay	1,21	52,5	1,4	5,5
В1к	33.8	61,4	39,7	52,0	8,3	Silty clay	1,36	44,8	0,7	6,1
В2к	19.7	53,3	27,0	62,5	10,5	Silt loam	1,51	44,9	0,3	8,3
В3к	22.2	60.5	29.0	60.8	10.2	Silt loam	1.29	48.7	0.5	8.3

Примечание: ρ – плотность сложения, ε – общая пористость.

Note: ρ – bulk density, ε – total porosity.

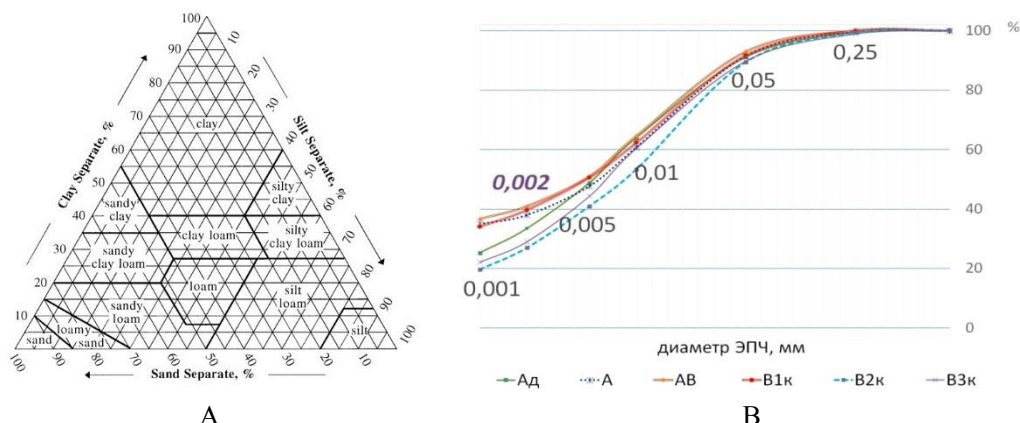


Рис. 3. Применение метода графической интерполяции для определения процентного содержания почвенных частиц в границах международной классификации: А) треугольник Ферре с названиями классов почв по международной классификации; В) интегральные кривые распределения содержания элементарных почвенных частиц разного размера в горизонтах чернозема выщелоченного агроландшафта яблоневого сада опытной станции «Горно-Алтайское»

Fig. 3. Application of the graphic interpolation method to determine the certain sizes soil particles percentage within the international classification: А) soil texture triangle with the names of soil classes according to FAO classification; В) integral curves of the different sizes soil particles distribution in the horizons of the apple orchard leached agrochernozen of the Gorno-Altayskoe experimental station

Однако прямой переход от отечественной «двухмерной» классификации почв к международной «трехмерной» невозможен, т. к. границы классов не совпадают (в отечественной методике не определяется содержание частиц менее 0,02 мм). Поэтому, используя полученные по методу Качинского данные о содержании гранулометрических фракций, мы построили кумулятивные кривые гранулометрического состава почвенных горизонтов (рис. 3, В). Далее методом графической интерполяции [4] были определены содержания почвенных частиц тех размеров, которые используются в международной «трехмерной» классификации (рис. 3, В, табл. 1).

Отметим, что названия частиц определенных размеров в зарубежной классификации почв по гранулометрии соответствуют названиям и диаметру фракций в отечественной классификации грунтов. Так, согласно [19], к глинистым частицам (clay) относятся фракции диаметром менее 0,002 мм, к пылеватым (silt) – частицы размером от 0,02 до 0,05 мм, а к песчаным – фракции размером более 0,05 мм. Классификационная принадлежность грунтов по ГОСТ 25100-2020 выполняется по двум параметрам – содержанию песчаных частиц и показателю пластичности (по аналогии с классификацией почв, в которую внесена «поправка» на тип почвообразования).

Данные гранулометрического состава, приведенные к международной классификации FAO, использовались при работе в программе HYDRUS-1D (рис. 4) и RETC 6.02 для получения по педотрансферным функциям Rosetta Lite v.1.1 параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена:

$$\theta(P) = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha P)^n)^m} + \theta_r$$
, где θ – равновесная влажность (влажность, соответствующая определенному давлению почвенной влаги P ; θ_s – влажность, близкая к влажности насыщения за вычетом объема, занятого заземленным воздухом; θ_r – остаточная влажность; α – величина, обратная величине капиллярно-сорбционного давления, приближающегося к давлению входа воздуха; n – коэффициент, определяющий крутизну кривой, $m = 1 - 1/n$.

Оказалось, что величины θ_s и θ_r , а также $K\phi$ (табл. 2) в большей степени зависят от сложения почвенного образца, чем от его гранулометрического состава: чем выше плотность сложения почвы, тем ниже значения ее полной и остаточной влагоемкости, и тем меньше $K\phi$ (коэффициенты корреляции изменяются от –0,81 до –0,96). Поэтому кривые ОГХ более плотных горизонтов В будут сдвинуты в сторону меньшей влажности. В свою очередь, коэффициент n в меньшей степени зависит от плотности сложения почвы и в основном определяется гранулометрическим составом, более высокое значение параметра n в почвах с повышенным содержанием песчаной фракции Sand ($r = +0,97$) определит в них больший угол наклона кривой ОГХ. Параметр α , обратно пропорциональный величине давления входа воздуха, в большей степени зависит от содержания в почве глинистой фракции, значения α минимальны в более легких по гранулометрическому составу, но плотных и бесструктурных горизонтах В2к и В3к.

Отметим, что расчетные величины полной влагоемкости θ_s практически для всех горизонтов (кроме В2к) совпали со значениями полной влаго-

емкости как почвенно-гидрологической константы (характерная влажность почвы, определяемая по ее состоянию или по состоянию контактирующих с ней объектов) по энергетической концепции Воронина [2], когда $\epsilon \rightarrow pF=0$, где ϵ – пористость почв (табл. 1).

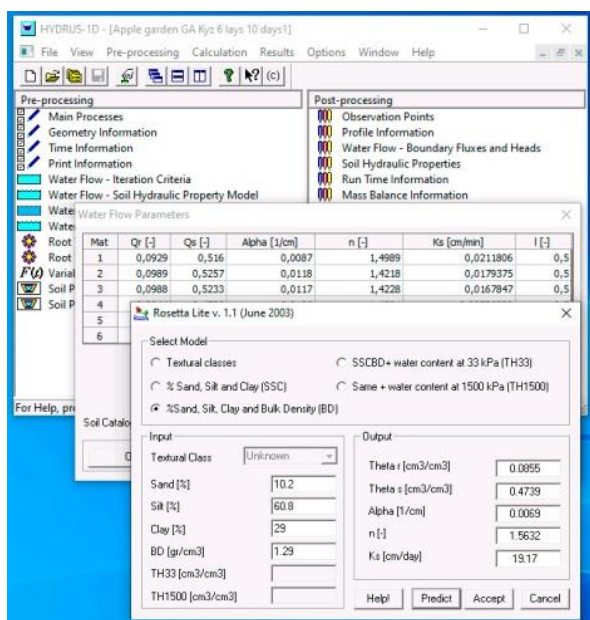


Рис. 4. Интерфейс программы Hydrus 1D, этап Pre-processing, вычисление параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена и коэффициента фильтрации (Кф)

Fig. 4. Interface of the Hydrus 1D program, Pre-processing stage, calculation of parameters for approximating the water retention curve (WRC) by the Van Genuchten function and the filtration coefficient (saturated hydraulic conductivity, Ks)

Полученные коэффициенты фильтрации для почвенных горизонтов чернозема выщелоченного легкоголинистого в целом укладываются в диапазон средних значений Кф для глинистых и тяжелосуглинистых почв [4].

Таблица 2. Гидрофизические свойства чернозема выщелоченного под яблоневым садом: параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена и коэффициенты фильтрации, полученные с помощью педотрансферных функций Rosetta Lite

Table 2. Hydrophysical properties of leached chernozem under an apple orchard: parameters for approximating the WRC by the Van Genuchten function and filtration coefficients obtained using Rosetta Lite pedotransfer functions

Горизонт (глубина, см) Soil horizon (depth, cm)	θ_s	θ_r	n	α	Кф, см/сут Ks, cm/day
	см³/см³/см³/см³				
Ад (0–7)	0,516	0,0929	1,4989	0,0087	30,5
A1 (8–20)	0,527	0,0989	1,4218	0,0122	25,8
AB (21–40)	0,524	0,0988	1,4227	0,0119	24,2
B1к (41–60)	0,479	0,0944	1,4361	0,0106	10,5
B2к (61–90)	0,415	0,0776	1,559	0,0068	6,64
B3к (91–130)	0,474	0,0855	1,5632	0,0069	19,17

Полученные кривые ОГХ почвенных горизонтов почвы под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское» (рис. 5) позволяют сказать, что разные по гранулометрическому составу почвенные слои при одном уровне влагосодержания могут существенно различаться по степени подвижности влаги и ее доступности для растений.

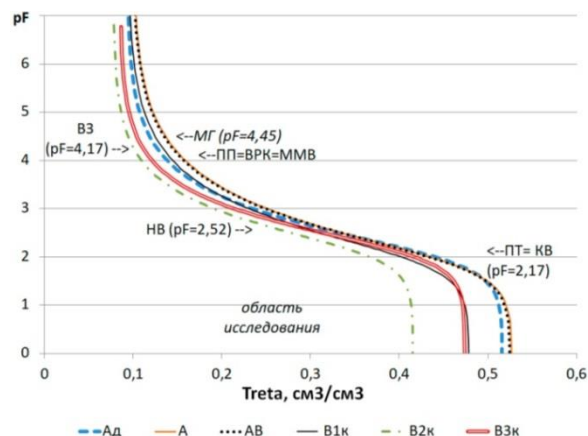


Рис. 5. Основные гидрофизические характеристики разных горизонтов почвы под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское» и критические состояния влажности. МГ – максимальная гигроскопичность (неподвижная прочносвязанная адсорбированная влага), В3 – влажность завядания, ВРК – влажность разрыва капиллярных связей (слабоподвижная пленочная влага); НВ – полевая или наименьшая влагоемкость, соответствующая капиллярно-сорбционной влагоемкости, КВ – капиллярная влагоемкость (подвижная влага, содержащаяся в крупных порах при почти плоских менисках) [2]

Fig. 5. Basic hydrophysical characteristics of different soil horizons under the apple orchard at the Gorno-Altai experimental station and critical moisture conditions. МГ – maximum soil hygroscopicity, В3 – wilting moisture, ВРК – moisture of breaking of capillary bonds (slowly mobile film moisture), НВ – field capacity or minimum moisture capacity, corresponding to capillary-sorption moisture capacity, КВ – capillary moisture capacity (mobile moisture contained in large pores) [2]

Таблица 3. Начальные значения содержания влаги и давления (P), наименьшая влагоемкость ($НВ$) и дефицит влаги ($ДВ$) на 17 июля 2023 г. в черноземе выщелоченном под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское»

Table 3. Initial values of moisture content and pressure (P), lowest moisture (field) capacity (FC) and moisture deficit (MD) as of July 17, 2023 in leached chernozem under an apple orchard at the Gorno-Altayskoe experimental station

Горизонт (глубина, см) Soil horizon (depth, cm)	ρ , г/см ³ g/cm ³	Влажность/Moisture		P , см водн. столба P , cm of water column	$НВ$, см ³ /см ³ (cm ³ /cm ³) ($pF=2,52$) FC	$ДВ$, мм, MD , mm
		весовая, % gravimetric, %	объемная, см ³ /см ³ volumetric, cm ³ /cm ³			
Ад (0–8)	1,18	20,1	0,247	–827	0,326	5,53
А1 (8–20)	1,20	21,2	0,252	–978	0,330	9,36
АВ (21–40)	1,21	21,8	0,264	–788	0,329	12,35
В1к(41–60)	1,36	24,8	0,338	–237	0,306	–6,08
В2к(61–90)	1,51	19,6	0,297	–249	0,274	–6,67
В3к(91–130)	1,29	23,6	0,303	–350	0,307	1,56

Например, при влажности $0,15 \text{ см}^3/\text{см}^3$ из более легких по гранулометрическому составу Вк2 и Вк3 почвенных горизонтов вода сможет свободно вытекать и будет доступна растениям, в частности корням древесных яблоневых культур, проникающим в возрасте от 10 лет на глубину 70 см и ниже [20]. Но в глинистых А, АВ, Вк горизонтах почвы такой уровень содержания влаги уже соответствует почвенно-гидрологической константе В3 при капиллярно-сорбционном давлении влаги $-15000 \text{ см водн. ст.}$ (или $pF=4,17$), травянистые растения при таком содержании влаги в верхних почвенных горизонтах будут испытывать ее недостаток.

Считается, что существует определенный начальный порог влажности почвы, с которого возможен вклад почвенной влаги в сток с водосборного бассейна. Например, пороговое значение содержания влаги в горных районах Китая составляет $0,28 \text{ см}^3/\text{см}^3$ [21]. Содержание влаги в черноземе выщелоченном под яблоневым садом ОПХ «Горно-Алтайское» на 17 июля 2023 г. в верхних гумусовых горизонтах не превышает $0,24 \text{ см}^3/\text{см}^3$, тогда как нижние горизонты увлажнены лучше, и содержание влаги на глубине 40 см уже достигает $0,29 \text{ см}^3/\text{см}^3$ и более. Повышенное испарение с поверхности почвы способствует потере влаги из ее верхних слоев.

Расчеты показали, что несущественный дефицит влаги в середине июня 2023 г. в черноземе выщелоченном под яблоневыми насаждениями опытной станции «Горно-Алтайское» отмечается только в верхних горизонтах (табл. 3). Уровень содержания влаги в В1к и В2к горизонтах на начало эксперимента превышал $НВ$, поэтому на глубине 40–90 см, где сосредоточена основная масса корней яблонь старше 10 лет, уровень увлажненности можно признать оптимальным. Для сравнения, в 2004 г. в черноземах под насаждениями яблони НИИСС им. Лисавенко (Алтайский край, г. Барнаул) водный дефицит в

верхнем пахотном горизонте мощностью 20 см достигал 37 мм в июне и 44 мм в августе [19]. В июле 2004 г. после дождей водная обстановка в почве под яблоневым садом НИИСС им. Лисавенко улучшилась, и дефицит влаги в пахотном горизонте, по данным авторов, составил только 4,5 мм под яблоней, что позволяло тогда исключить полив [20]. По нашим данным, дефицит влаги в почвенном 20-см слое чернозема выщелоченного под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское» составляет на момент начала эксперимента всего 14 мм. Влагосодержание изучаемого чернозема под яблоневым садом в середине июня 2023 г. можно признать удовлетворительным.

На рис. 6 приведены результаты послойного изменения содержания влаги во время проведения почвенно-мелиоративного эксперимента. Судя по представленным профилям движения влаги в изучаемой почве, в реальных условиях влага уже через 10 минут после дождения начинает медленно проникать в глубину, и влажность всех А горизонтов на этом этапе эксперимента уже становится выше, чем исходная (светлая толстая линия на рис. 6, а). Однако результаты моделирования в Hydrus-1D на этом этапе не вполне сходятся с реальными значениями: согласно модели, в первые 10 минут практически вся влага задерживается в верхнем горизонте, увлажняя его до $0,4 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (светлая толстая линия Т2, рис. 6, б). Из-за низкого давления в А горизонте ($P = -978 \text{ см водн. ст.}$, табл. 5) влага не может стекать вниз, в горизонт АВ с более высоким капиллярно-сорбционным давлением ($P = -788 \text{ см. водн. ст.}$), пока горизонт А не увлажнится и пока не возникнет соответствующий градиент давления. Некоторое несоответствие между измеренными и расчетными данными влажности, возможно, вызвано тем, что при моделировании мы не учитывали горизонтальное движение влаги на заливочной площадке.

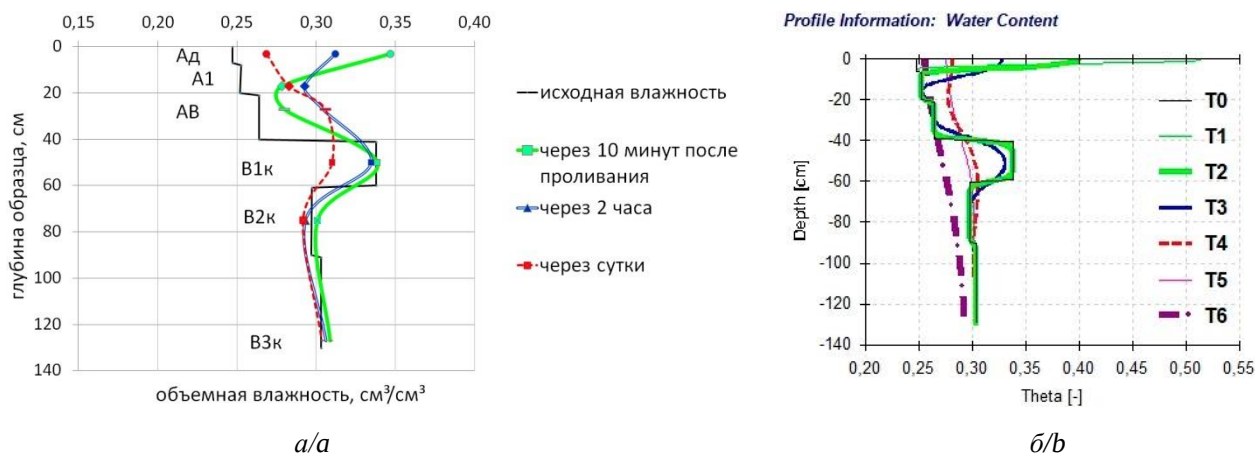


Рис. 6. Профильное распределение влаги в черноземе выщелоченном яблоневого сада опытной станции «Горно-Алтайское» после дождя (эквивалентно выпадению 20 мм осадков): измеренные содержания (а) и смоделированные в Hydrus-1D значения (б)

Fig. 6. Profile moisture distribution in leached chernozem of the apple orchard at the Gorno-Altayskoe experimental station after irrigation (equivalent to 20 mm of precipitation): measured contents (a) and values modeled in Hydrus-1D (b)

Так, например, в ходе экспериментальных исследований вертикального и горизонтального движения влаги в почвах крупных яблоневых садов Индии авторами было установлено, что в нижних супесчаных (Sandy loam) слоях вертикальное гравитационное движение влаги по капиллярам преобладало над горизонтальным и более легкие по гранулометрическому составу слои увлажнялись на большую глубину, в отличие от верхних суглинистых (Loam) горизонтов почвы, в которых был более выражен горизонтальный фронт смачивания и увлажнению которых в целом также препятствовало повышенное испарение с поверхности почвы [15].

Через два часа после начала эксперимента фронт увлажнения захватывает все большую глубину почвенного профиля. На этом этапе вычисленные значения лучше сопоставимы с реальными показателями влажности (рис. 6, темные синие графики, T3). Наилучшим образом программа воспроизводит реальные значения влажности на этапе через сутки после начала эксперимента (рис. 6, красные пунктирные линии, T4).

Можно считать, что физически обоснованная модель движения влаги в почве адаптирована к исследуемым условиям, т. к. дает небольшие отклонения в величинах влажности, по сравнению с экспериментальными значениями. Калибровка модели по почвенно-мелиоративному эксперименту дает основание для ее дальнейшего использования в данном агроландшафте для прогнозных расчетов динамики влажности почвы.

На рис. 7 приведен график изменения скорости потоков влаги разной направленности. Согласно расчетам Hydrus-1D, сразу после дождя скорость нисходящего водного потока достигала в верхнем

почвенном горизонте 3 мм в минуту (T1), но влага проникла всего лишь на 6 см в глубину. Из-за высокого P_k -с в B1к горизонте ($P = -237$ см водн. ст.), в течение всего эксперимента в этой части профиля происходит движение влаги вверх (рис. 7) и «подпитка» дефицитного по содержанию влаги АВ горизонта с низким P_k -с, градиент давлений между ними определяет положительный (вверх) переток. Считается, что восходящие потоки влаги в агрочерноземах создают благоприятные условия для конвективного переноса карбонатов в верхнюю часть профиля [14]. В черноземах выщелоченных в период засухи положительно (вверх) направленные потоки влаги особенно выражены в почвах тяжелого гранулометрического состава [22]. Есть мнение, что под орошаемыми яблоневыми садами в нижних горизонтах почв в корневой зоне из-за поливов и фертигации могут быть существенны потери питательных веществ [16].

Через 10 минут после дождя (рис. 7) скорость водного нисходящего потока снизилась в верхнем горизонте до 0,098 мм в минуту, или 1,4 см/сут. (T2, толстая светлая линия), но фронт увлажнения проникает уже на более значительную глубину – до 18 см, с постепенным снижением скорости водного потока на глубине до 0,0014 см/сут. Через 2 часа скорость водного нисходящего потока продолжала снижаться и составляла уже в верхнем горизонте не более 0,0067 мм/мин, или 0,95 см/сут. Скорость положительно направленного потока на глубине 40 см через 10 минут после начала эксперимента на достигала 2,16 см/сут. Через 24 ч во всей почвенной толще чернозема выщелоченного содержание влаги выравнивается, движение влаги практически на всей глубине происходит только

вверх (положительные потоки влаги) – от 0,000089 мм/сут. в глубоких слоях до 0,000175 мм/сут. в верхнем горизонте.

Profile Information: Water Flux

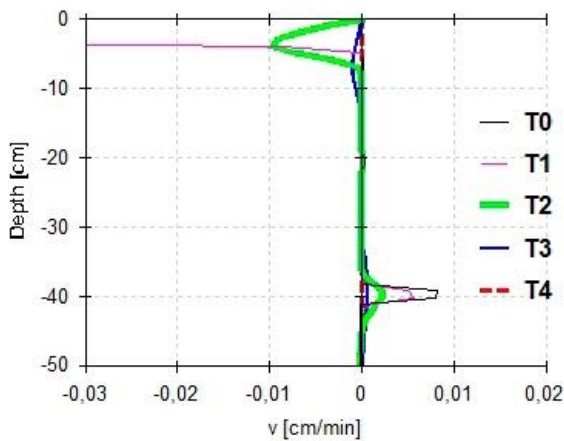


Рис. 7. Потоки влаги в верхних (до 50 см) почвенных слоях чернозема выщелоченного под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское»

Fig 7. Water fluxes in the upper (up to 50 cm) soil layers of leached chernozem under the apple orchard of the Gorno-Altaiiskoe experimental station

Коэффициент влагопроводности ($K_{вл}$), согласно модели, в первую минуту после пролива исследуемой нами почвы под яблоневым садом в самом верхнем горизонте достигает 10,2 см/сут. Через 10 минут после начала эксперимента влагопроводность верхнего горизонта снижается до 0,5 см/сут., а в горизонтах А и АВ коэффициент влагопроводности постепенно увеличивается. Через 2 часа $K_{вл}$ в верхнем горизонте почвы под яблоневым садом составляет 0,093 см/сут., как и в В1к горизонте (0,094 см/сут.), в АВ горизонте $K_{вл}$ не превышает 0,033 см/сут. По литературным данным, коэффициент влагопроводности, определенный экспериментально, в черноземе выщелоченном под сливой (НИИСС им. Лисавенко, г. Барнаул) в пахотном горизонте в июле снижался до 0,05 см/сут. [6].

Настроенную по почвенно-мелиоративному эксперименту модель использовали для прогноза динамики почвенной влаги через 10 суток, в отсутствие дождей (рис. 7, толстая штрихпунктирная линия Т6): согласно расчетам, содержание влаги во всем почвенном профиле будет изменяться от 0,256 до 0,293 см³/см³. Дефицит влаги в верхних горизонтах немного сократится, горизонты Вк станут дефицитными по уровню увлажнения из-за формирующихся преимущественно положительных (восходящих) потоков влаги, которые обеспечивают вертикальную восходящую миграцию во-

дорастворимых солей в черноземах в сухие периоды года. Общий дефицит влаги через 10 дней в 130 см почвенной толще в отсутствие дождей будет составлять 42 мм.

Заключение

Неоднородность гранулометрического состава почвенных горизонтов изученного чернозема выщелоченного под яблоневым садом опытной станции «Горно-Алтайское» определяет различия в формах нахождения, степени подвижности и доступности для растений почвенной влаги при одном и том же уровне влагосодержания. Верхние хорошо структурированные тяжелосуглинистые А горизонты исследованного чернозема выщелоченного обладают большей водоудерживающей способностью, их ОГХ сдвинуты вправо и более выположены, чем ОГХ более легких по гранулометрическому составу, но более плотных и бесструктурных В горизонтов. Полученные кривые ОГХ можно использовать для выделения критически важных состояний почвенной влаги – наименьшей влагоемкости и влажности завядания растений, служащих для оценки оптимальности водно-воздушного режима почвы. Расчеты показали, что в верхних горизонтах в середине июня 2023 г. отмечался дефицит влаги (14 мм в толще 20 см), тогда как на глубине 40–90 см, где сосредоточена основная масса корней яблонь старше 10 лет, влагосодержание было удовлетворительным.

Скорость нисходящих водных потоков в черноземе выщелоченном в первые минуты после обильных осадков достигает 3 мм/мин., однако влага не может быстро проникать на всю глубину почвенного профиля из-за отсутствия должного градиента давления в разных по гранулометрическому составу и плотности почвенных слоях.

Наиболее точно программа Hydrus-1D воспроизводит заливочный эксперимент через сутки после его начала, когда вычисленные значения влажности во всех горизонтах совпадают с измеренными показателями. Настроенную по почвенно-мелиоративному эксперименту модель движения влаги в черноземе выщелоченном можно использовать для дальнейших прогнозов и расчетов содержания влаги в почве. Так, через 10 суток в отсутствие дождей в почве будет наблюдаться дальнейшее снижение и выравнивание профиля содержания влаги. Преимущественными потоками влаги станут положительные (восходящие), с которыми обычно связывают процессы вертикальной восходящей миграции солей в черноземах в сухие периоды года. Дефицит влаги, по расчетам, составит 42 мм для 130 см почвенной толщи через 10 дней в условиях полного отсутствия атмосферных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plant and soil communities are associated with the response of soil water repellency to environmental stress / F. Seaton, D.L. Jones, S. Creer, P.B.L. George // *Science of the Total Environment*. – 2019. – № 687. – P. 929–938.
2. Шейн Е.В. Щеглов Д.И., Москвин В.В. Моделирование процесса водопроницаемости черноземов Каменной степи // *Почвоведение*. – 2012. – № 6. – С. 648–657.
3. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. – Л.: Гидрометеониздат, 1978. – 427 с.
4. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: МГУ, 2005. – 432 с.
5. Simunek J., Van Genuchten M.T., Sejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages // *Vadose Zone Journal*. – 2016. – № 15. – P. 1–25.
6. Макарычев С.В., Болотов А.Г., Гончаров И.А. Сезонная динамика коэффициента влагопроводности чернозема выщелоченного в садах Алтайского Приобья // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 5 (127). – С. 47–52.
7. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледниковой района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) / Е.В. Шейн, Д.А. Иванов, А.Г. Болотов, А.В. Дембовецкий // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. – 2022. – Вып. 110. – С. 5–21.
8. Water productivity of apple orchards with different planting densities in semi-arid mountainous regions of Loess Plateau, Northwest China: a simulation study / L. Jun, F. Peng, C. Yu, G. Zheng, Y. Xiao-Li // *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*. – 2013. – № 24. – P. 2878–2887.
9. Агрохимические методы исследования почв / под ред. А.В. Соколова. – М.: Наука, 1975. – 655 с.
10. К вопросу об определении плотности сложения для оценки агрофизического состояния набухающих почв и грунтов / И.В. Морозов, В.Э. Болдырева, Д.Э. Варельджан, Н.А. Колесникова // *Живые и биокосные системы* (научное электронное периодическое издание ЮФУ). – 2020. – № 32. – С. 1–10.
11. Панин И.С. К вопросу о влиянии влажности на величину объемного веса почвы // *Почвоведение*. – 1960. – № 9. – С. 108–110.
12. Hess A.J., Waduk B., Welker A. Evapotranspiration estimation in rain gardens using soil moisture sensors // *Vadose Zone Journal*. – 2021. – Vol. 20. – P. 1–12. DOI: 10.1002/vzj2.20100
13. Смагин А.В. Моделирование гидрологической функции лесной подстилки // *Экологический вестник Северного Кавказа*. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 10–20.
14. Архангельская Т.А., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н. Математическое моделирование водного режима двух агрочерноземов с различным уровнем залегания карбонатов // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 401–410.
15. Aydemir M., Kara Z. The effect of soft core fruit tree leaves on some soil properties // *Journal of Agricultural Sciences*. – 2023. – Vol. 7 (1). – P. 45–52 DOI: 10.5281/zenodo.769886
16. Health and characteristics of Australian apple growing soils / M. Hardie, G. Oliver, W. Cotching, B. Walker, R. Lancaster, N. Swarts // *Applied and Environmental Soil Science*. – 2024. – P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9479986>.
17. DuPont S.T., Granatstein D., Sallato B. Soil health in orchards. – Pullman, WA, USA: Washington State University, 2020. – P. 1–13
18. Granulometric composition and moisture capacity of the soil in old-age apple orchards of the Lipetsk region / V. Zakharov, V. Gulidova, V. Kravchenko, B. Sotnikov // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 420. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003004
19. ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». – М.: Стандартинформ, 2020. – 37 с.
20. Гефке И.В., Макарычев С.В. Яблоневый сад: водно-почвенный режим и поливные нормы // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2022. – № 11 (217). – С. 16–22.
21. Li Y., Cong Zh., Yang D. The ecohydrological response to soil moisture based on the distributed hydrological assimilation model in the mountain region // *Ecohydrology*. – 2023. – Vol. 17 (1). – P. 1–11. DOI: 10.1002/eco.2606
22. Сенькова Л.А. Восходящее движение почвенной влаги при испарении в черноземе выщелоченном // *Агартный вестник Урала*. – 2007. – № 6 (42). – С. 44–55.

Информация об авторах

Светлана Вадимовна Бабошкина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. svetlana@iwer.ru, arsenida@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9904-991X>

Ольга Анатольевна Ельчинова, доктор сельскохозяйственных наук, директор Горно-Алтайского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 649105, с. Кызыл-Озек, пер. Мирный, 8. eo59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4482-9000>

Александр Васильевич Пузанов, доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по науке Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. puzanov@iwer.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1340-486X>

Тамара Анатольевна Рождественская, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. rtamara@iwer.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8487-2495>

Поступила в редакцию: 14.03.2024

Поступила после рецензирования: 27.03.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Seaton F., Jones D.L., Creer S., George P.B.L. Plant and soil communities are associated with the response of soil water repellency to environmental stress. *Science of the Total Environment*, 2019, no. 687, pp. 929–938.
2. Shein E.V., Shcheglov D.I., Moskvina V.V. Simulation of water permeability processes in chernozems of the Kamennaya steppe. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 45, no. 6, pp. 578–587. (In Russ.)
3. Globus A.M. *Soil-hydrophysical support of agroecological mathematical models*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 427 p. (In Russ.)
4. Shein E.V. *Soil physics course*. Moscow, MGU Publ., 2005. 432 p. (In Russ.)
5. Simunek J., Van Genuchten M.T., Sejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 2016, no. 15, pp. 1–25.
6. Makarychev S.V., Bolotov A.G., Goncharov I.A. The seasonal dynamics of hydraulic conductivity coefficient of leached chernozem in the gardens of the Priobye (the Ob river area) of the Altai region. *Vestnik AGAU*, 2015, no. 5 (127), pp. 47–52. (In Russ.)
7. Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V. Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region). *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, vol. 110, pp. 5–21. (In Russ.)
8. Jun L., Peng F., Yu C., Zheng G., Xiao-Li Y. Water productivity of apple orchards with different planting densities in semi-arid mountainous regions of Loess Plateau, Northwest China: a simulation study. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 2013, no. 24, pp. 2878–2887.
9. *Agrochemical methods of soil investigation*. Ed. by A.V. Sokolov. Moscow, Nauka Publ., 1975. 655 p. (In Russ.)
10. Morozov I.V., Boldyreva V.E., Vareldzhan D.E., Kolesnikova N.A. On the issue on the determination of bulk density for the estimation of agrophysical state of swelling soils. *Living and Bioinert Systems (scientific electronic periodical)*, 2020, no. 32, pp. 1–10. (In Russ.)
11. Panin I.S. On the issue of humidity impact on soil volumetric weight. *Pochvovedenie*, 1960, no. 9, pp. 108–110. (In Russ.)
12. Hess A., Wadzuk B., Welker A. Evapotranspiration estimation in rain gardens using soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal*, 2021, vol. 20, pp. 1–12. DOI: 10.1002/vzj2.20100
13. Smagin A.V. Modeling of litter fall hydrological function. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 10–20. (In Russ.)
14. Arkhangelskaya T.A., Khokhlova O.S., Myakshina T.N. Mathematical modeling of soil hydrology in two arable chernozems with different depth to carbonates. *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 401–410. (In Russ.)
15. Aydemir M., Kara Z. The effect of soft core fruit tree leaves on some soil properties. *Journal of Agricultural Sciences*, 2023, vol. 7 (1), pp. 45–52 DOI: 10.5281/zenodo.769886
16. Hardie M., Oliver G., Cotching W., Walker B., Lancaster R., Swarts N. Health and characteristics of Australian apple growing soils. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2024/9479986
17. DuPont S.T., Granatstein D., Sallato B. *Soil health in orchards*. Pullman, WA, USA, Washington State University, 2020. pp. 1–13.
18. Zakharov V., Gulidova V., Kravchenko V., Sotnikov B. Granulometric composition and moisture capacity of the soil in old-age apple orchards of the Lipetsk region. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 420. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003004
19. *SS 25100-2020. Soils. Classification*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 37 p. (In Russ.)
20. Gefke I.V., Makarychev S.V. Apple orchard: water-soil regime and irrigation rate. *Vestnik AGAU*, 2022, no. 11 (217), pp. 16–22. (In Russ.)
21. Li Y., Cong Zh., Yang D. The ecohydrological response to soil moisture based on the distributed hydrological assimilation model in the mountain region. *Ecohydrology*, 2023, vol. 17 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1002/eco.2606
22. Senkova L.A. Upward movement of soil moisture during evaporation in leached chernozem. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2007, no. 6 (42), pp. 44–55. (In Russ.)

Information about the authors

Svetlana V. Baboshkina, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. svetlana@iwep.ru, arsenida@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9904-991X>

Olga A. Elchinina, Dr. Sc., Director, Gorno-Altai branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 8, Mirny Lane, Kyzyl-Ozek, 649105, Russian Federation. eoa59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4482-9000>

Alexander V. Puzanov, Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Research, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. puzanov@iwep.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1340-486X>

Tamara A. Rozhdestvenskaya, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. rtamara@iwep.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8487-2495>

Поступила в редакцию: 14.03.2024

Поступила после рецензирования: 27.03.2024

Принята к публикации: 28.11.2024