

4. Lunin A.I., Makarychev S.V. Ispol'zovanie impul'snykh metodov v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve dlya opredeleniya teploemkosti pochv. – Barnaul, 1977. – Tr. Altaiskogo SKhl. – Вып. 28. – S. 135-138.

5. Serykh G.M. Pribor dlya ekspressnogo izmereniya teplofizicheskikh kharakteristik nemetallicheskikh materialov // Pribory i

tekhnika eksperimenta. – 1982. – № 2. – S. 229-231.

6. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izdvo MGU, 2005. – 432 s.

7. Arkhangel'skaya T.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. – M., 2008. – 50 s.



УДК 631.423.2

С.В. Бабошкина, А.В. Пузанов, О.А. Ельчинова,  
Т.А. Рождественская, И.А. Трошкова  
S.V. Baboshkina, A.V. Puzanov, O.A. Yelchinina,  
T.A. Rozhdestvenskaya, I.A. Troshkova

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИПОЧВЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ  
В ЧЕРНОЗЕМАХ ОБЫКНОВЕННЫХ  
УЙМОНСКОЙ МЕЖГОРНОЙ КОТЛОВИНЫ (БАССЕЙН Р. КАТУНЬ)  
В УСЛОВИЯХ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ ПОЧВЫ ВЛАГОЙ**

**MODELING OF MOISTURE SUBSURFACE VERTICAL MOVEMENT IN ORDINARY CHERNOZEMS  
OF THE UYMON INTERMOUNTAINE DEPRESSION (THE KATUN RIVER BASIN)  
UNDER INITIAL MOISTURE SATURATION**

**Ключевые слова:** чернозем обыкновенный, Уймонская межгорная котловина, бассейн р. Катунь, почвенная влага, основная гидрофизическая характеристика, RETC, функция Ван-Генухтена, HYDRUS-1D, динамика влажности, нисходящий поток влаги.

Исследованы основные физические и гидрофизические свойства черноземов обыкновенных, используемых под посевы овса и сенокос в Уймонской межгорной котловине Алтая (бассейн р. Чендек, левый приток р. Катунь). С помощью системы компьютерного моделирования влагопереноса в почвах HYDRUS-1D в исследуемых черноземах описан процесс вертикального нисходящего перемещения влаги в ситуации, возникающей после таяния снега, паводка продолжительных дождевых осадков (из первоначально насыщенной влагой почвенной толщи). Для информационного обеспечения модели полуэмпирическим расчетным методом педотрансферных функций в программе RETC, используя экспериментальные данные гранулометрического состава, плотности, наименьшей влагоемкости и влажности завядания, получены основные гидрофизические характеристики (ОГХ) образцов гумусовых и минеральных горизонтов исследуемых почв. Выявлено, что ОГХ, построенные по методу Воронина, для черноземов легкого гранулометрического состава в области капиллярной и пленочно-капиллярной влаги дают заниженные значения влажности, а в области насыщения – завышенные, по сравнению с ОГХ, построенных без использования почвенно-гидрологических констант; возможно, для изученных черноземов (с увеличенной, в результате распашки, скважностью) в качестве параметра

максимальной влажности ( $Q_s$ ) следует принимать не общую их пористость, а полную (предельную полевую) влагоемкость. Впервые на количественном уровне с использованием компьютерного моделирования показано влияние типа сельскохозяйственного использования на интенсивность и характер вертикального нисходящего потока влаги в почвах Уймонской степи. Отмечено, что в условиях начальной достаточной увлажненности потери влаги больше в Ап горизонте пашни, чем в Ад горизонте чернозема под сенокосом, что указывает на возможность менее нарушенных почв (несмотря на их более легкий гранулометрический состав) лучше переносить засушливые периоды.

**Key words:** chernozem, Uymon intermontane depression, the Katun River basin, soil moisture, water retention curve (WRC), RETC software, van Genuchten function, HYDRUS-1D software, moisture dynamics, moisture downflow.

The physical and hydrophysical properties of ordinary chernozems used as cropland and grassland in the Uymon intermontane depression of the Altai Mountains (the Chendek River basin, the left-bank tributary of the Katun River) were studied. By means of the HYDRUS-1D software for soil moisture transfer computer modeling, the vertical descending moisture transfer in the studied chernozems was described in the situations arising after melting of snow and floods caused by steady rains (moisture transfer from initially saturated soil layer) was described. For data support of the model, the basic hydrophysical characteristics (WRC) of the samples of humus and mineral horizons of the studied soils were obtained. The

WRCs were received by the semi-empirical calculation using pedotransfer functions from the RETC software and the experimental data of the granulometric composition, density, field capacity and wilting point. It has been found that the WRCs constructed according to Voronin's method for silt loam chernozems, the values of moisture content are under-estimated in the portion of the curve corresponding to capillary and film-capillary moisture; while in the saturation portion – the values are over-estimated compared to WRCs constructed without using the soil-hydrological constants. Perhaps, for

the studied chernozem (with increased porosity as a result of plowing) the parameter of the maximum moisture (the  $Q_s$ ) should be not the total porosity, but the total soil moisture capacity. For the first time, at quantitative level by mathematical modeling, the effect of the agricultural use type on the intensity and pattern of the vertical descending moisture downflow in the soils of the Uymon steppe is shown. It has been found that under initial sufficient moisture, the losses of moisture are greater in the Ap horizon (topsoil) of chernozem under crops than in the Ad horizon of chernozem under grasslands.

**Бабошкина Светлана Вадимовна**, к.б.н., с.н.с., лаб. биогеохимии, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-516. E-mail: svetlana@iwep.ru.

**Пузанов Александр Васильевич**, д.б.н., проф., ВРИО директора, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-445. E-mail: puzanov@iwep.ru.

**Ельчинина Ольга Анатольевна**, д.с.-х.н., директор, Горно-Алтайский филиал, Институт водных и экологических проблем СО РАН. Тел.: (38844) 2-93-25. E-mail: GAVivep@mail.GORNY.ru.

**Рождественская Тамара Анатольевна**, к.б.н., с.н.с., лаб. биогеохимии, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-516. E-mail: rtamara@iwep.ru.

**Трошкова Ирина Александровна**, м.н.с., лаб. биогеохимии, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-516. E-mail: egorka\_iren@mail.ru.

**Baboshkina Svetlana Vadimovna**, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Biogeochemistry Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-516. E-mail: svetlana@iwep.ru.

**Puzanov Aleksandr Vasilyevich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Deputy Director for Research, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-445. E-mail: puzanov@iwep.ru.

**Yelchininova Olga Anatolyevna**, Dr. Agr. Sci., Director, Gorno-Altaysk Branch, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci. Ph.: (38844) 2-93-25. E-mail: GAVivep@mail.GORNY.ru.

**Rozhdestvenskaya Tamara Anatolyevna**, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Biogeochemistry Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-516. E-mail: rtamara@iwep.ru.

**Troshkova Irina Aleksandrovna**, Junior Staff Scientist, Biogeochemistry Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-516. E-mail: egorka\_iren@mail.ru.

### Введение

Почвенный покров является одним из факторов, определяющих и оптимизирующих водный режим территории и качество водных ресурсов. Гидрологические свойства почв обеспечивают формирование количественной и качественной составляющих гидрохимического стока. Для прогнозного моделирования гидрологических процессов в почвах важнейшим этапом является получение и применение их экспериментального обеспечения плотности почвы, порозности, гранулометрического состава, основной гидрофизической характеристики (ОГХ), функции влагопроводности [1, 2].

Процесс инфильтрации и движения влаги в ненасыщенных влагой степных почвах определяется прежде всего давлением влаги в порах и обусловлен сложной совокупностью структурно-функциональных (физических и гидрофизических) свойств почвы, главными из которых являются функция влагопроводности (или ненасыщенная гидравлическая проводимость) и основная гид-

рофизическая характеристика – зависимость между капиллярно-сорбционным давлением почвенной влаги и ее содержанием в почве (объемной влажностью). Отметим, что для степных почв агроландшафтов снижение их водоудерживающей способности в результате агродеградации является довольно опасным явлением. Черноземы Уймонской котловины, практически полностью распаханной, ранее не изучались в отношении их водоудерживающей способности и движения в них влаги.

**Цель работы** – изучение функций влагоудерживания и моделирования процесса вертикального движения влаги в черноземах обыкновенных Уймонской межгорной котловины Алтая, различных по типам их сельскохозяйственного использования.

### Задачи:

- 1) исследование физических и гидрофизических свойств черноземов обыкновенных Уймонской межгорной котловины;
- 2) получение параметров аппроксимации основной гидрофизической характеристики

(ОГХ) функцией Ван-Генухтена для различных генетических горизонтов черноземов обыкновенных (под пашней и сенокосом) расчетными полуэмпирическими методами, используя различный набор входных данных;

3) сравнение изменений водоудерживающей способности черноземов Уймонской котловины в зависимости от типа их сельскохозяйственного использования и, соответственно, степени агрогенной нагрузки;

4) выполнение моделирования профильного распределения влажности в черноземах обыкновенных Уймонской котловины при начальных условиях, близких к насыщению почвы влагой (в ситуации, аналогичной состоянию почв после таяния снега, паводка, продолжительных дождей).

### Объекты и методы

Уймонская котловина – одно из межгорных понижений Центрального Алтая площадью 400 км<sup>2</sup>, протяженностью около 35 км и шириной 10-12 км, располагается на высоте около 900 м над ур.м., на территории Усть-Коксинского района Республики Алтай и представляет собой грабен-долину, окаймленную Катунским хребтом с юга и Терехтинским – с севера. Через котловину протекает река Катунь [3].

Дно котловины в настоящее время представляет собой обширную слегка вогнутую (за счет делювиальных шлейфов) слабоволнистую равнину, рельеф которой осложняется руслами рек (притоков р. Катунь), стекающими с вершин обрамляющих хребтов. Коренное ложе котловины погребено рыхлыми песчано-галечниковыми четвертичными отложениями: озерными, делювиально-пролювиальными, аллювиальными, которые сверху перекрываются облессованными карбонатными суглинками и супесями. В настоящее время почвенный покров котловины представлен в основном черноземами обыкновенными распаханными, которые делятся на пониженновскипающие, собственно обыкновенными и поверхностно-вскипающими (карбонатными).

Средняя годовая норма осадков в котловине 450-500 мм, причем за период с мая по июль выпадает 200-220 мм, коэффициент увлажнения в это время составляет 0,7-0,8. Окаймляющие котловину хребты увлажняются сильнее, нежели днище.

Объекты исследования – черноземы обыкновенные различного сельскохозяйственного использования Уймонской котловины (бассейн р. Чендек, левый приток р. Ка-

тунь) на пришейфовых суглинисто-щебнистых озерно-делювиальных отложениях – продуктах разрушения известково-песчано-глинистых и хлорито-серецитовых сланцев южных склонов Терехтинского хребта и последующей их транспортировки речными, дождевыми и талыми водами в дно котловины [3].



а



б

**Рис. 1. Разрез У05. Чернозем обыкновенный под посевами овса (вариант «пашня»)**

Гранулометрический состав почв определяли седиментометрическим пипеточным методом по Качинскому, с предварительной обработкой образца пирофосфатом Na [4]. Точность метода при использовании аналитических весов с третьим знаком составляет 0,4%. Определение плотности сложения выполнялось по ГОСТ 5180-84, методом режущего кольца, плотности твердой фазы – пикнометрически. Общую пористость определяли через соотношение плотности сложения почвы и плотности ее твердой фазы [4]. Содержание гумуса устанавливали по Тюрину, с титриметрическим окончанием, рН – потенциометрически.

Для построения ОГХ с помощью нескольких пар «давление-влажность» методом «секущих» по Воронину были определены почвенно-гидрологические константы

(ПГК – характерная влажность почвы, определяемая по ее состоянию или по состоянию контактирующих с ней объектов): влажность разрыва капилляров (ВРК) и капиллярная влагоемкость (КВ) – по пределам пластичности, а также максимальная гигроскопичность (МГ) и наименьшая влагоемкость (НВ). Пределы пластичности устанавливали как влажность почвы, при которой балансирный конус весом 79 г погружается в почву с определенной высоты на определенную глубину (по А.М. Васильеву). Наименьшую влагоемкость в поле проводили через 24 ч после окончания экспериментов на водопроницаемость, максимальную гигроскопичность почвы – по А.В. Николаеву [4]. Для перечисленных ПГК влажность определялась термостатно-весовым методом (ГОСТ 5180-84). Согласно энергетической концепции Воронина, каждой почвенно-гидрологической константе соответствует давление влаги, которое вычисляется по определенным уравнениям [5].



а



б

**Рис. 2. Разрез У06. Чернозем обыкновенный под залежью, разнотравно-злаковой ассоциацией (вариант «сенокос»)**

Для аппроксимации 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, приближающегося к давлению входа воздуха,  $n$  – крутизна кривой [1].

Параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена были получены полуэмпирическим расчетным методом петотрансферных функций (ПТФ). Педотрансферные функции – это эмпирические зависимости, позволяющие восстанавливать основные гидрофизические функции почв по традиционно определяемым базовым свойствам почв [1].

Известно несколько подходов определения ПТФ: метод физически обоснованной модели, точечно-регрессионный метод, функционально-параметрический регрессионный метод, а также метод искусственных нейросетей, который позволяет имитировать поведение сложных систем, варьируя степень взаимовлияния составных частей сети и меняя структуру связей между этими частями [2]. Для нахождения параметров уравнения Ван Генухтена и значений коэффициентов фильтрации мы использовали наиболее известные среди полученных методом нейронных сетей ПТФ Rosetta Lite v.1.1 программы RETC 6.02 [6], применяя следующие входные данные: процентное содержание песка, глины, пыли (SSC), плотность почвы (BD), значения наименьшей влагоемкости (ТНЗЗ) и влажности завядания (ТН1500).

Одной из особенностей работы в программе RETC является то, что для работы в ней необходимы данные о содержании в почве гранулометрических фракций определенных размеров, используемых зарубежной классификации FAO: <0,002 мм (глина), 0,002 – 0,05 мм (пыль) и 0,05 – 2 мм – песок. Зарубежная градация гранулометрического состава отличается от отечественной, границы фракций не совпадают. Переход был выполнен с помощью графической линейной интерполяции по построенным нами кумулятивным кривым гранулометрического состава почв [7-9]. Физическим обоснованием такого перехода является тот факт, что кумулятивная кривая содержания элементарных почвен-



ных частиц в области размеров <0,005 мм при полулогарифмическом выражении имеет вид, близкий к линейному, что позволяет приближенное вычисление промежуточных значений функции установить методом линейной интерполяции [7].

Моделирование процесса движения и распределения влаги в почвах осуществлялось с помощью физически обоснованной модели Hydrus-1D (США, авторы: J. Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina, адрес: www.hydrus2d.com), которая представляет собою современное интерактивное средство для компьютерного моделирования движения влаги, тепла и растворенных веществ в многофазной пористой среде. Численные расчеты одномерного движения влаги в Hydrus-1D осуществляются на базе уравнения Ричардса:

$$Q = K_{вл}(P_{к-с}) * \left( \frac{\Delta P_{к-с}}{\Delta z} - 1 \right),$$

где  $\Delta P_{к-с}$  – перепад капиллярно-сорбционного давления влаги между точками измерения давления;

$\Delta z$  – расстояние по вертикальной координате между этими точками;

$K_{вл}(P_{к-с})$  – коэффициент влагопроводности при определенном капиллярно-сорбционном давлении почвенной влаги [1].

Почвенным экспериментальным обеспечением для расчета служили полученные по описанным выше методикам гидрофизические свойства почв.

В качестве граничных условий предполагалось использование параметров, наиболее подходящих по физическому смыслу и соответствующих природно-климатической обстановке и почвенно-гидрологическим процессам в летний период в данном регионе. Рассмотрена ситуация вертикального нисходящего оттока влаги из почвенной толщи, находящейся в состоянии, близком

к полному ее насыщению влагой. Такое состояние в природных условиях может возникать после таяния снега, паводка или продолжительных дождевых осадков, когда почва вначале насыщается, а потом постепенно теряет влагу из верхних слоев по причине ее гравитационного оттока вглубь. Для имитации установления равновесного состояния влаги в почвенных профилях после свободного гравитационного оттока (аналог наименьшей влагоемкости, или field capacity) задавались условия нулевого потока на верхней границе и нулевого давления на нижней границе, а также начальные условия насыщенности почв влагой ( $P = -100$  см водн. ст. – состояние достаточной увлажненности) [10].

### Экспериментальная часть и обсуждение результатов

По результатам нашего исследования верхний горизонт чернозема под сенокосом является наиболее рыхлым (он наименее плотного сложения, наиболее пористый) и отличается облегченным гранулометрическим составом (табл. 1). С глубиной в этом варианте чернозема плотность сложения и содержание глинистой и илстой фракций растут.

В профиле чернозема пашни, наоборот, с глубиной происходит облегчение гранулометрического состава со среднесуглинистого (Loam) до супесчаного (Sandy Loam), хотя плотность и порозность почвы при этом не снижаются. Состояние порозности пахотных почв Уймона можно оценить как удовлетворительное.

По результатам нашего исследования восстановленные из физико-механических свойств с использованием различного набора входных данных, кривые ОГХ одних и тех же горизонтов почвы в некоторых случаях могут существенно различаться (рис. 3 а).

Таблица 1

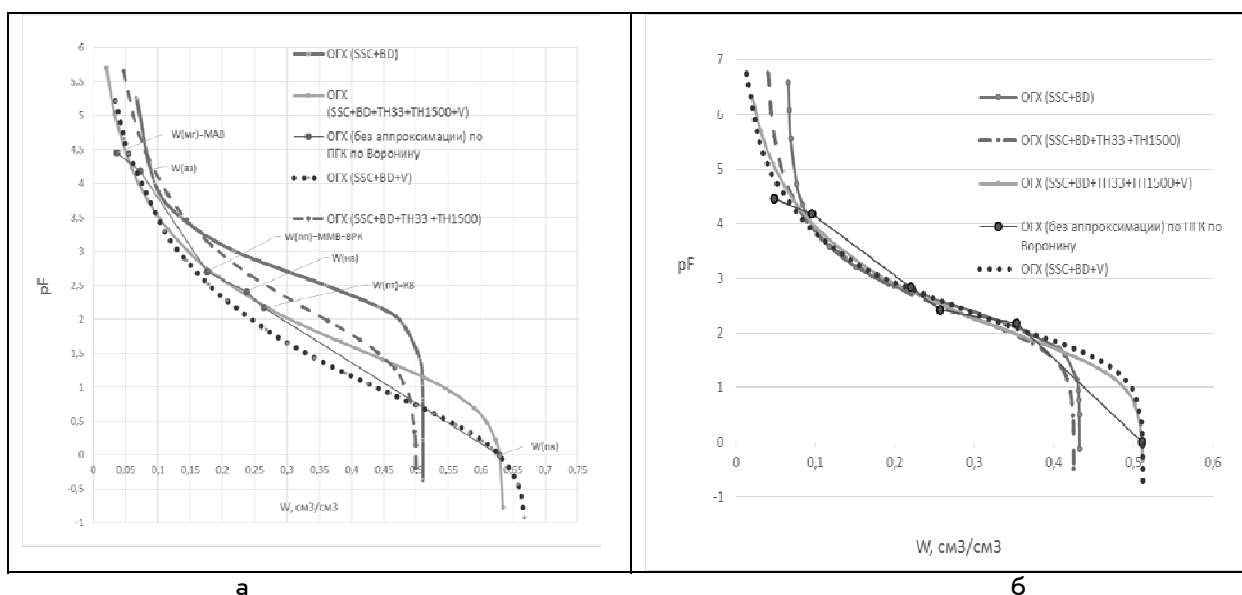
**Физико-механические и физико-химические показатели черноземов обыкновенных Уймонской котловины**

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

**Почвенно-гидрологические (в % влажности) показатели черноземов Уймонской котловины (пашня и сенокос), используемые для нахождения параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена полуэмпирическим методом по ПТФ Rosetta программы RETC и по методу Воронина**

| Объект                 | Горизонт | МГ   | ВЗ  | ПП   | НВ   | ПТ   | ПВ           |
|------------------------|----------|------|-----|------|------|------|--------------|
| Чернозем под сенокосом | Ад       | 4,15 | 8,3 | 20,1 | 27   | 30,3 | 43,8 (0,385) |
|                        | В        | 3,8  | 7,6 | 17,5 | 20,4 | 28,1 | 35,0 (0,44)  |
|                        | С        | 3,8  | 7,3 | 16,1 | 18,2 | 23,1 | 31,6 (0,37)  |
| Чернозем под пашней    | Ап       | 4,15 | 8,3 | 20,2 | 29,1 | 40,2 | 50,4 (0,539) |
|                        | В        | 3,6  | 7,2 | 18,3 | 21,9 | 33,0 | 41,1 (0,467) |
|                        | С        | 1,75 | 3,5 | 16,0 | 20,1 | 24,0 | 30,0 (0,351) |

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



**Рис. 3. Кривые основной гидрофизической характеристики легкосуглинистого Ад (а) и среднесуглинистого В (б) горизонтов чернозема обыкновенного (под сенокосом) Уймонской котловины, построенные разными расчетными методами с использованием разных наборов входных данных (SSC – гранулометрического состава; BD – плотности, TH33 (соответствует НВ) и TH1500 (соответствует ВЗ) с применением (и без) почвенно-гидрологических констант по методу Воронина (V) с аппроксимацией (и без) функцией Ван-Генухтена**

Так, в легкосуглинистом Ад горизонте чернозема под сенокосом отмечаем расхождения в расчетных (по методу А.В. Воронина) содержаниях влаги с данными, полученными из ОГХ, построенной по ПТФ Rosetta Life 1.1, с использованием только данных о гранулометрическом составе и плотности, без применения функции «Retention data» программы RETC: из рисунка а видно, что кривая ОГХ, полученная с применением ПГК (по методу Воронина), выше области насыщения (при  $P < -10$ ) заметно сдвинута влево, в сторону более низких значений влажности, чем кривые ОГХ, полученные по ПТФ программы RETC. Отметим, что в работах известных отечественных гидрологов ранее было выявлено, что подход Воронина по

выявлению равновесных состояний «давление-влажность» в грубодисперсных почвах дает заниженные значения содержания влаги [11, 12].

Стоит отметить, что в области высокого насыщения почв влагой (в нижней части графиков) кривые ОГХ, построенные по ПГК (по Воронину), существенно отклоняются в сторону большей влажности. Дело в том, что согласно этому методу, параметр  $Q_s$  (соответствующий максимальной влажности) теоретически должен быть равен общему объему пор, а пористость верхних горизонтов, используемых в сельском хозяйстве черноземов, довольно высокая (табл. 1), что, очевидно, дает завышенное значение  $Q_s$ . Отметим, что такие расхождения в значениях макси-

мальной влажности не обнаруживаются, например, в тяжелосуглинистых черноземах Каменной степи [5]. При полевом определении полной влагоемкости изученных нами почв полученные значения (табл. 2) ближе к значениям  $Q_s$ , рассчитанным в программе RETC по данным гранулометрического состава, плотности почв, НВ и ВЗ.

При построении ОГХ Ад горизонта чернозема обыкновенного под сенокосом с использованием параметров аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена, полученных по ПТФ Rosetta Lite 1.1 с применением данных только о гранулометрическом составе (Clay, Silt, Sand), плотности (BD), а также влажностей TH3 и TH1500, соответствующих наименьшей влагоемкости (НВ) и влажности завядания (ВЗ), полученная кривая в случае легкосуглинистого и рыхлого Ад горизонта занимает промежуточное положение (рис. 3 а).

Для среднесуглинистых почвенных горизонтов исследуемых черноземов установлена хорошая сходимость результатов построения кривых ОГХ при использовании различного набора данных (рис. 3 б), особенно в той части кривой, которая соответствует области капиллярной и пленочно-капиллярной влаги. Однако различия в области насыщения (по параметру  $Q_s$ ) остаются существенными. Возможно, для изученных нами сельскохозяйственных черноземов Уймонской степи при получении ОГХ методом ПГК (по Воронину) следует принимать, что максимальная влажность ( $Q_s$  при  $rF=0$ ) должна соответствовать реальному значению полной (предельной полевой) влагоемкости, а не общей порозности,

значение которой существенно увеличено из-за распашки почв и, очевидно, более существенно завышает реальное значение полной влагоемкости, чем её занижает полевое определение.

Для дальнейших расчетов и моделирования в HYDRUS 1D было решено использовать единый способ построения ОГХ с использованием данных гранулометрического состава (SSC), плотности (BD), НВ (TH33), ВЗ (TH1500), без пар «давление-влажность», полученных по ПГК (без «Retention data»), (табл. 3, 4).

По результатам нашего исследования вид кривых водоудерживания изученных нами черноземов Уймонской степи, как правило, имеет S-образную форму. Наиболее дифференцированы кривые влагоудерживания в области капиллярной и гравитационной форм влаги (рис. 4).

В состоянии, близком к насыщению ( $P<-50$ ), наибольшей влагоудерживающей способностью отличается верхний гумусово-аккумулятивный горизонт чернозема под сенокосом – наиболее легкий по гранулометрическому составу и наиболее рыхлый (с меньшей плотностью и наибольшей порозностью), а наименьшей – С горизонт под сенокосом (рис. 4), отличающейся, наоборот, наименьшей порозностью, но наибольшей плотностью (табл. 1).

В области давления в -15000 см водн. ст., соответствующего влажности завядания, лучшими влагоудерживающими свойствами отличается Ад горизонт сенокоса ( $W=0,098 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , или 11%). В то же время влажность завядания для Ап горизонта пашни составляет (по полученным кривым ОГХ)  $0,076 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , или 7%.

Таблица 3

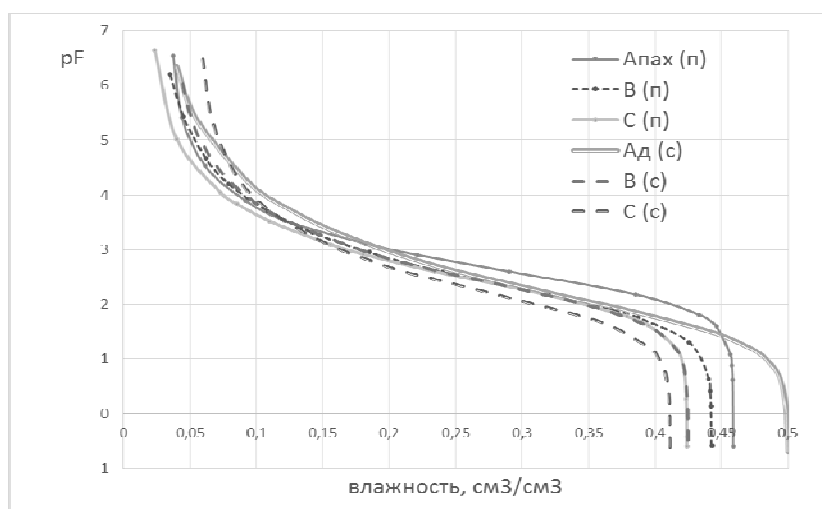
**Параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена и коэффициенты фильтрации черноземов обыкновенных Уймонской степи под сенокосом, полученные полуэмпирически по ПТФ программы RETC, с использованием данных гранулометрического состава и плотности, а также влажностей при наименьшей влагоемкости почвы (НВ) и влажности завядания (ВЗ)**

| Горизонт (глубина), см | $Q_s$  | $Q_r$  | n      | a      | Кф, см/сут. |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Ад (2-16)              | 0,500  | 0,0255 | 1,3196 | 0,0245 | 161,2       |
| В гор (16-26)          | 0,4248 | 0,0365 | 1,4145 | 0,0112 | 31,4        |
| С гор (26-40)          | 0,4112 | 0,0556 | 1,4228 | 0,0165 | 23,72       |

Таблица 4

**Параметры аппроксимации ОГХ функцией Ван-Генухтена и коэффициенты фильтрации, полученные для черноземов пашни Уймонской степи полуэмпирическим методом по педотрансферным функциям программы RETC, с использованием данных гранулометрического состава и плотности, влажностей при наименьшей влагоемкости почвы (НВ) и влажности завядания (ВЗ)**

| Горизонт (глубина), см | $Q_s$  | $Q_r$  | n      | a      | Кф, см/сут. |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Апах (0-26)            | 0,459  | 0,0354 | 1,5362 | 0,0054 | 88,26       |
| В гор (26-40)          | 0,4427 | 0,0283 | 1,3922 | 0,013  | 76,95       |
| С гор (40-55)          | 0,4241 | 0,0193 | 1,4281 | 0,010  | 84,67       |



**Рис. 4. Кривые ОГХ различных горизонтов черноземов обыкновенных под пашей (посевы овса) и под сенокосом (разнотравье)**

В области капиллярной и пленочно-капиллярной малоподвижной влаги большей водоудерживающей способностью отличается верхний А горизонт пашни – средне-суглинистый и довольно пористый. Наименьшей влагоудерживающей способностью в области пленочно-капиллярной влаги ( $pF$  3-4,5) отличается наиболее легкий по гранулометрическому составу карбонатный горизонт С<sub>к</sub> под пашней. Сдвиг кривых ОГХ засоленных почв в сторону меньшей влажности объясняется уменьшением толщины двойного диффузного слоя ионов при повышении минерализации порового раствора и снижением при этом определяющегося ими расклинивающего давления, за счет которого между почвенными частицами «накачивается» вода [1].

Наилучшими влагоудерживающими свойствами в области пленочной и адсорбированной форм влаги ( $pF > 4,5$ ) обладает один из наиболее тяжелых по гранулометрическому составу и наиболее плотный С горизонт под сенокосом, что объясняется наиболее высоким содержанием в нем мелких пор, участвующих в удерживании влаги при низких значениях давления. Считается, что для уплотненных почв (по сравнению с неуплотненными) характерно снижение влажности в области высоких давлений (в диапазоне крупных капилляров), но ее возрастание – при низких давлениях (в диапазоне тонких капилляров) [1].

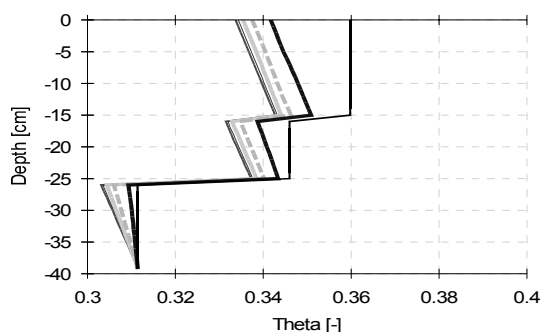
Моделирование движения влаги в почвах производили в среде Hydrus 1D (рис. 5 а, б). В работе рассматривался случай с предельным увлажнением (состояние почвы, близкое к полному влагонасыщению при  $P = -100$ ) и

последующим нисходящим перетоком влаги за 10 сут. при условии отсутствия осадков, испарения и транспирации (как, например, происходит в пасмурную погоду после продолжительных дождей) [10]. Информацию о профильном распределении влаги в почве приводим на графиках, построенных, для удобства сравнения, с одинаковыми шкалами, в одинаковых масштабах.

Из данных моделирования (рис. 5 а, б) следует, что и начальное содержание влаги, и вертикальный ее переток в почве под сенокосом за 10 дней в целом несколько ниже, чем и содержание и потери влаги из верхнего горизонта в почве под пашней (несмотря на самый высокий  $K_f = 161$ , табл. 4), причем переток заметно более продолжительный и растянут во времени. Так, за первые сутки влагопотери в Ад горизонте под сенокосом составляют  $0,0135 \text{ см}^3$  воды на каждый  $1 \text{ см}^3$  почвы или (в пересчете на почвенную толщу Ад горизонта в 16 см глубиной) 2,2 мм водного слоя. На второй день содержание влаги в этом горизонте снижается еще на  $0,0047 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , что составляет 0,75 мм водного слоя. За 3 сут. происходит отток еще 0,32 мм влаги ( $0,002 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ), а за 4-е сут. стекает 0,16 мм водного слоя. Общее количество потерянной за 10 дн. влаги из 16 см верхнего Ад горизонта чернозема под сенокосом, увлажненного первоначально до состояния, близкого к насыщению, составит (без учета потерь на испарение и транспирацию)  $0,0225 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , что соответствует оттоку 3,6 мм водного слоя (рис. 6).

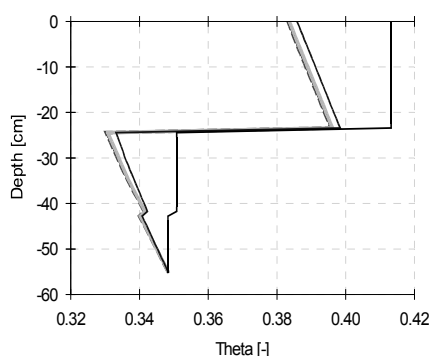


Profile Information: Water Content



а

Profile Information: Water Content

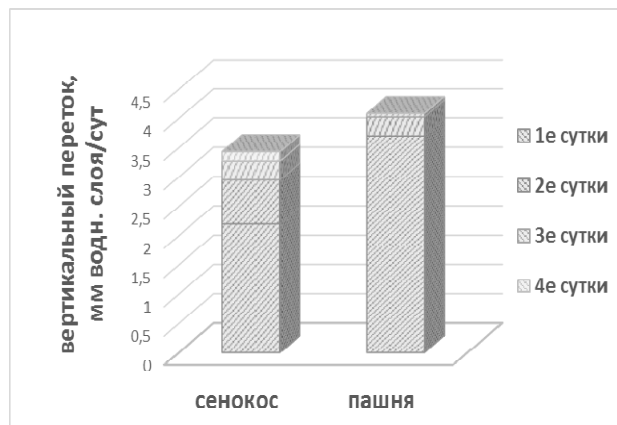


б

**Рис. 5. Графики динамики влажности в черноземах обыкновенных Уймонской степи (а – в сенокосе и б – в пашне) при условиях начальной насыщенности почв влагой**

Что касается пахотного варианта чернозема, то оказалось, что при его большей влагоудерживающей способности в области матричного давления от -50 до -1000 см водн. ст. вертикальный отток влаги в глубокие слои выражен в нем в большей степени, чем в варианте под сенокосом, причем происходит он более резко, практически за первый же день, а уже на 3-и сут. отток практически прекращается. Так, уже за 1-й день содержание влаги в верхнем 16-сантиметровом пахотном слое (для сравнения берем одинаковую глубину) на  $0,023 \text{ см}^3/\text{см}^3$  больше или происходит переток 3,7 мм водного слоя. На 2-й день содержание влаги в верхнем пахотном горизонте снижется на  $0,02 \text{ см}^3$  (в каждом куб. см почвы), что соответствует перетоку 0,32 мм водного слоя, на 3-и сут. снижение объемной влажности совсем

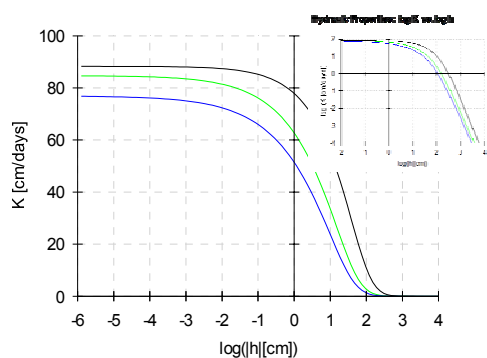
несущественно – на  $0,0004 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , или 0,06 мм водного слоя. Всего (в среднем) из верхнего 16 см слоя пашни за 10 сут. в нижние горизонты после полного насыщения влаги вертикально перетекает  $0,025 \text{ см}^3$  из каждого куб. см почвы, или 4 мм водного слоя.



**Рис. 6. Общее количество потерянной в результате вертикального перетока влаги за первые 4 сут. из верхнего 16-сантиметрового слоя черноземов обыкновенных (под сенокосом и пашней) Уймонской степи (после первоначального насыщения почв влагой и свободного гравитационного оттока)**

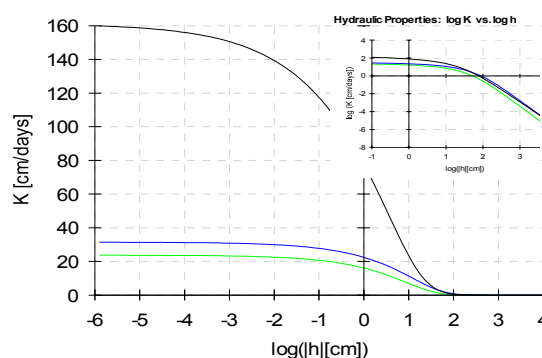
Более быстрый нисходящий отток влаги в почве пашни объясняется, во первых, большей разницей давления между А и В горизонтами в этой почве ( $\Delta P_{к-с}$  – значение, используемое в уравнении Ричардса). Кривая ОГХ Ап горизонта пашни в области  $P < -100$  смещена вправо, в сторону большей влажности, но при этом известно, что вертикальные градиенты капиллярно-сорбционного давления могут быстро нивелировать повышенное вододерживание горизонта в процессе массопереноса влаги [10]. В почве под сенокосом разница давления между А и В горизонтами при  $P < -100$  см. водн. ст. практически отсутствует (рис. 4). Кроме того, в почве пашни при  $P = -100$  см водн. ст. при более высоком общем содержании влаги заметно выше и коэффициенты влагопроводности (1,4 см/сут. в горизонте В), чем в почве под сенокосом, в которой коэффициент влагопроводности при  $P = -100$  см водн. ст. в В горизонте составляет только 0,8 см/сут. (рис. 7).

Hydraulic Properties: K vs. log h



а

Hydraulic Properties: K vs. log h



б

**Рис. 7. Функции влагопроводности черноземов обычных Уймонской степи под пашней (а) и под сенокосом (б) (маленькие графики – функции влагопроводности в логарифмической шкале)**

**Выводы**

1. Основные гидрофизические характеристики для горизонтов черноземов Уймонской степи легкого гранулометрического состава, полученные по методу Воронина, в области капиллярной и пленочно-капиллярной влаги дают заниженные значения влажности, а в области насыщения – завышенные, по сравнению с ОГХ, построенных без использования почвенно-гидрологических констант.

2. В условиях достаточного начального увлажнения (P=-100 см водн. ст.) чернозем под пашней содержит больше влаги, но и её нисходящий вертикальный отток из верхнего среднесуглинистого пахотного горизонта более существенен и происходит быстрее, чем из Ад горизонта чернозема под сенокосом, в котором поток влаги более плавный и менее выражен количественно.

**Библиографический список**

1. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.  
 2. Панина С.С., Шейн Е.В. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий // Вестник Московского ун-та. – Серия 17: Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 45-50.  
 3. Почвы Горно-Алтайской автономной области. – Новосибирск: Наука, 1973. – 352 с.  
 4. Агрохимические методы исследования почв. – М.: Наука, 1975. – 655 с.  
 5. Шейн Е.В., Щеглов Д.И., Москвин В.В. Моделирование процесса водопроницаемости черноземов каменной сте-

пи // Почвоведение. – 2012. – № 6. – С. 648-657.

6. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // J. Hydrol. – 2001. – Vol. 251. – P. 163-176.

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

8. Березин П.Н. Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород // Почвоведение. – 1983. – № 2. – С. 64-72.

9. Бабошкина С.В., Пузанов А.В., Ельчинова О.А., Рождественская Т.А. Воднофизические свойства и моделирование процесса движения влаги в черноземах южных Канской межгорной котловины (бассейн р. Чарыш, Северо-Западный Алтай) // Вестник Алтайского ГАУ. – 2016. – № 3 (137). – С. 47-54.

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

11. Смагин А.В. теория и методы оценки физического состояния почв // Почвоведение. – 2003. – № 3. – С. 328-341.

12. Болотов А.Г., Шейн Е.В., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Г., Початкова Т.Н. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 9. – С. 36-41.

References

1. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.
2. Panina S.S., Shein E.V. Matematicheskie modeli vlagoperenosa v pochve: znachenie eksperimental'nogo obespecheniya i verkhnikh granichnykh uslovii // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie. – 2014. – № 3. – S. 45-50.
3. Pochvy Gorno-Altayskoi avtonomnoi oblasti. – Novosibirsk, Nauka, 1973. – 352 s.
4. Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv. – M., Nauka, 1975. – 655 s.
5. Shein E.V., Shcheglov D.I., Moskvina V.V. Modelirovanie protsessa vodopronitsaemosti chernozemov kamЕННОй stepi // Pochvovedenie. – 2012. – № 6. – S. 648-657.
6. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // J. Hydrol. – 2001. – Vol. 251. – P. 163-176.
7. Shein E.V. Granulometricheskii sostav pochv: problemy metodov issledovaniya, interpretatsii rezul'tatov i klassifikatsii // Pochvovedenie. – 2009. – № 3. – S. 309-317.
8. Berezin P.N. Osobennosti raspredeleniya granulometricheskikh elementov pochv i pochvobrazuyushchikh porod // Pochvovedenie. – 1983. – № 2. – S. 64-72.
9. Baboshkina S.V., Puzanov A.V., El'chinova O.A., Rozhdestvenskaya T.A. Vodnofizicheskie svoystva i modelirovanie protsessa dvizheniya vlagi v chernozemakh yuzhnykh Kanskoi mezhgornoй kotlovinы (bassein r. Charysh, Severo-Zapadnyi Altai) // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – № 3 (137). – S. 47-54.
10. Smagin A.V. Modelirovanie gidrologicheskoi funktsii lesnoi podstilki // Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza. – 2011. – T. 7. – № 1. – S. 10-20.
11. Smagin A.V. teoriya i metody otsenki fizicheskogo sostoyaniya pochv // Pochvovedenie. – 2003. – № 3. – S. 328-341.
12. Bolotov A.G., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Tyugai Z.G., Pochatkova T.N. Osnovnye gidrofizicheskie kharakteristiki kashtanovykh pochv sukhoй stepi Altayskogo kraя // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 9. – S. 36-41.



УДК 631.445.4:631.42:631.742

**В.Е. Суховеркова**  
V.Ye. Sukhoverkova

**МОНИТОРИНГ ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ**

**MONITORING ARABLE CHERNOZEMS USING HISTORICAL SOIL DATA**

**Ключевые слова:** черноземы, мониторинг, морфологические признаки, пахотный горизонт, гумус, агрофизические свойства.

Исследованы агроландшафты Приобского плато. Почвенный покров изучаемой территории (в границах ОПХ им. В.В. Докучаева и опытного поля – более 4 тыс. га) представлен в основном черноземами обыкновенными, выщелоченными и оподзоленными. Распаханность территории составляет 85%. Сельскохозяйственное освоение земель в течение 40 лет привело к незначительным изменениям показателей плодородия распашанных черноземов. Основными критериями оценки трансформации черноземов, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот, были морфологические характеристики, содержание гумуса, кислотность, агрофизические характеристики. Верхний гумусовый горизонт Апах. оказывается для всех почв агроландшафта выровненным по

мощности (в пределах 25-30 см) и часто совпадает с мощностью перегнойно-аккумулятивного горизонта А, составляя в среднем 29,5 см. Причиной формирования антропогенного горизонта Апах. в профиле черноземов является подпахивание горизонтов АВ или В. Установлено, что фактическое содержание гумуса изменяется от 2,9 до 6,5%, что ниже оптимальных значений. Среднее содержание гумуса в пахотных горизонтах изучаемых черноземов составляет 4,76%. Исследования в период 1968-2008 г. показали, что мощность гумусовых горизонтов и содержание гумуса за 40 лет остались практически на прежнем уровне (содержание гумуса изменилось с 4,4 до 4,3%). Установлено, что плотность сложенности почвы и плотность твердой фазы почвы также мало изменились (1,10-1,16; 2,61-2,64 соответственно), однако произошло снижение содержания водопрочных агрегатов – увеличилась распыленность почв.