

vaniya teplofizicheskikh svoystv pochv // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 6 (68). – S. 23-27.

6. Bolotov A.G. Teplofizicheskoe sostoyanie pochv i sovershenstvovanie instrumentalnoy bazy dlya ego issledovaniy: dis. ... kand. s.-kh. nauk / Altayskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. – Barnaul, 2003. – 148 s.

7. Akhmedov A.D., Galiullina Ye.Yu. Ekologicheskaya bezopasnost razvitiya sadovodstva v Volgogradskoy oblasti // Sotsialno-ekonomicheskie i prirodookhrannyye aspekty razvitiya selskikh munitsipalnykh obrazovaniy: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. GNU PNIIAZ. – M., 2010. – S. 271-273.

8. Trofimov I.T., Bekhovykh Yu.V., Bolotov A.G., Sizov Ye.G. Fizicheskie svoystva chernozemov pod khvoynymi lesopolosami // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 9 (107). – S. 23-27.

9. Drozdov O.A., Vasilev V.A., Kobysheva N.V. i dr. Klimatologiya: uchebnik. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 568 s.

10. Makarychev S.V., Bekhovykh Yu.V., Bolotov A.G., Ivanov A.N., Levin A.A., Sizov Ye.G., Trofimov I.T. Teplofizicheskoe sostoyanie pochv Altaya v usloviyakh antropogeneza. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 362 s.

11. Gefke I.V. Agrofizicheskie svoystva vyshchelochennykh chernozemov Altayskogo Priobya v plodovom sadu // Problemy zemelnogo zakonodatelstva, ratsionalnogo zemleustroystva i prirodoobustroystva, resursnogo pochvovedeniya v Dalnevostochnom Federalnom okruge: materialy konf. – Ussuriysk, 2006. – S. 56-60.

12. Makarychev S.V., Gefke I.V., Shishkin A.V. Teplofizicheskoe sostoyanie chernozemov plodovykh sadov Altayskogo Priobya: monografiya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2008. – 192 s.

13. Mazirov M.A., Shein Ye.V. Polevye issledovaniya svoystv pochv // Vladimir, 2012. – 159 s.

14. Simunek J., van Genuchten J.M.Th., Jacques D., Schaap M., Mattson E.D. Recent development in the Hydrus software: Overland flow and biogeochemical modules, SAHRA 4th Annual meeting, Albuquerque, New Mexico, 13-15 October 2004, 2005.



УДК 631.423.2

А.И. Белолобцев, А.Г. Болотов
A.I. Belolyubtsev, A.G. Bolotov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВ СКЛОНОВ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ

MODELING OF SOIL HYDRO-PHYSICAL PARAMETERS OF SLOPES OF THE NON-CHERNOZEM ZONE

Ключевые слова: эрозия почв, гидрофизические свойства почв, основная гидрофизическая характеристика, гидрофизические параметры.

Рассмотрены результаты моделирования гидрофизических параметров эродированных почв склонов Нечерноземной зоны. В качестве входных параметров модели использованы экспериментальные значения, полученные в стационарном полевом опыте, представляющем собой пятипольный почвозащитный зернотравяной севооборот, размещенный на дерново-подзолистых почвах в Подольском районе Московской области. Для моделирования гидрофизических параметров использованы данные по гранулометрическому составу и плотности сложения при обычной обработке почвы на момент возобновления вегетации озимой пшеницы. Процедуру численного моделирования проводили в программном пакете RETC с помощью нейросетевых педотрансферных функций

Rosetta. Основной величиной, влияющей на гидрофизические свойства склоновых почв, является плотность сложения, от которой зависит экологическая и производительная их устойчивость. Почвы склона крутизной 8° значительно уплотнены в сравнении с почвами склона 4°. Уплотнение эродированной почвы повлияло на изменение её гидрофизических параметров. Значения параметра минимальной влажности верхнего двадцатисантиметрового слоя больше, чем в слое 20-40 см независимо от крутизны склона. В зависимости от крутизны склона почвы 4° имеют более высокие значения данного параметра, чем почвы склона 8°. Параметр максимального насыщения также имеет более высокие значения в слое 0-20 см в сравнении со слоем 20-40 см. По крутизне склона значения θ_s также больше для уклона 4°, чем для 8°. Гидрофизический параметр, равный обратной величине давления барботирования, имеет наименьшие

значения в верхнем слое и на склоне 4°. Уменьшение значений гидрофизических параметров свидетельствует о физической деградации рассмотренных почв вследствие уплотнения пахотного горизонта, снижения величины общей пористости, потери гумуса и тонкодисперсного материала в результате эрозионных процессов. Параметр, характеризующий угол наклона основной гидрофизической характеристики, минимален для деградированных почв. По-видимому, в результате антропогенной нагрузки, а именно уплотнения почвы, возросла доля капиллярных пор, что требует проведения дополнительных исследований. Результаты моделирования показали, что при долговременной агрогенной нагрузке дерново-подзолистых почв склоновых земель происходит уменьшение их водоудерживающей способности. При увеличении крутизны склона гидрофизические параметры, характеризующие физическое состояние почв, уменьшаются, а проявление физической деградации в этом случае более выражено.

Keywords: soil erosion, soil hydro-physical properties, soil water retention curve, hydro-physical parameters.

The results of modeling hydro-physical parameters of eroded soils of slopes of the Non-Chernozem zone are discussed. The experimental values obtained in the stationary field experiment were used as input parameters of the model; the field experiment was represented by a five-course soil-protecting cereal crop and grass rotation located on sod-podzolic soils in the Podolskiy District of the Moscow Region. To simulate hydro-physical parameters, the data on the particle-size composition and bulk density were used for conventional tillage at the time of spring growth of winter wheat. The computing simulation was performed in the *RETC* soft-

ware package by using *Rosetta* neural network pedotransfer functions. The main value that affects the hydro-physical properties of slope soils is the bulk density; the ecological and productive stability of soils depends on this value. The soils of 8° steep slope are considerably compacted as compared to the soils of 4° steep slope. The consolidation of eroded soil affected the change in its hydro-physical parameters. The values of the minimum moisture parameter of the upper twenty-centimeter layer are greater than those in the 20-40 cm layer regardless of the slope steepness. Depending on slope steepness, the soil of 4° has higher values of this parameter than the soils of 8° slope. The maximum saturation parameter also has higher values in the 0-20 cm layer as compared to the 20-40 cm layer. Depending on the slope steepness, the values θ_s are also greater for 4° slope than for 8°. The hydro-physical parameter that equals to the inverse value of the bubbling pressure has the lowest values in the upper layer and on 4° slope. Decreased values of the hydro-physical parameters are indicative of physical degradation of the examined soils due to the compaction of the arable horizon, decreased total porosity value, loss of humus and finely dispersed material caused by erosion processes. The parameter characterizing the angle of inclination of soil water retention curve is minimal for degraded soils. Apparently, due to anthropogenic impact, namely soil compaction, the percentage of capillary pores has increased, and this should be investigated further. The simulation results showed that at long-term agrogenic load of sod-podzolic soils of slope lands, their water retention capacity decreases. With increased slope, the hydro-physical parameters characterizing the physical state of soils are reduced, and the manifestation of physical degradation in this case is more pronounced.

Белолубцев Александр Иванович, д.с.-х.н., проф., зав. каф. метеорологии и климатологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева. E-mail: belolyubcev@mail.ru.

Болотов Андрей Геннадьевич, д.б.н., проф. каф. метеорологии и климатологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Belolyubtsev Aleksandr Ivanovich, Dr. Agr. Sci., Prof., Head, Chair of Meteorology and Climatology, Russian State Agricultural University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy. E-mail: belolyubcev@mail.ru.

Bolotov Andrei Gennadyevich, Dr. Bio. Sci., Prof., Chair of Meteorology and Climatology, Russian State Agricultural University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Введение

В повышении культуры земледелия на склоновых землях значительная роль принадлежит агрофизике почв, изучающей совокупность физических свойств и всех физических процессов и режимов, протекающих в почве, и обеспечивающей направленное их регулирование. Эти показатели служат научным обоснованием для необходимости применения противоэрозионных агротехнических мероприятий на эрозионно-опасных территориях [1].

В современной физике почв используется подход, при котором гидрофизические функции почв

(основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) и функция влагопроводности) характеризуют всю совокупность физических свойств и являются своеобразным интегральным «паспортом почвы» реагирующим на любые внешние воздействия и изменения [2]. Также гидрофизические параметры, полученные в результате аппроксимации гидрофизических функций почв, используются при сравнительном анализе физических свойств почв [3].

С другой стороны, использование математических моделей влагопереноса требует простых недорогих методов определения гидрофизических

характеристик почвы. В результате многочисленных исследований было выявлено, что на гидрофизические характеристики почвы наибольшее влияние оказывают плотность почвы, содержание гумуса и распределение гранулометрических элементов по размеру. Наряду с чисто эмпирическими методами появлялись физически обоснованные подходы к расчету дифференциальной пористости из размера и формы, слагающих почву частиц. Поэтому в настоящее время одновременно развиваются три направления получения гидрофизических характеристик по физическим свойствам почвы [4]: 1) физически обоснованные методы расчета ОГХ; 2) регрессионные методы расчета почвенно-гидрологических констант; 3) методы расчета параметров аппроксимационных зависимостей ОГХ.

Наиболее широкое распространение получила третья группа расчетных методов основной гидрофизической характеристики и функции влагопроводности. Этому способствовало относительно небольшое число активно используемых аппроксимационных зависимостей гидрофизических характеристик почвы, одна из которых – модель ван Генухтена [5]. Данный подход применен в настоящей работе.

Цель работы – расчет гидрофизических параметров эродированных почв склонов Нечерноземной зоны.

Задачи:

- 1) формирование массива входных параметров, необходимых для работы модели;
- 2) проведение численного эксперимента для получения искомых параметров.

Объекты и методы

В качестве основного метода выбран метод моделирования. Вопросы моделирования водного режима почв, их гидрофизических параметров, процессов влаго- и солепереноса в почвах рассмотрены в литературе [6, 7]. Эффективность применения программных пакетов для адекватного решения вышеуказанных задач неоднократно подтверждалась на практике [8-10].

В качестве основной модели использована аппроксимационная зависимость гидрофизических характеристик почвы, модель ОГХ ван Генухтена-Муалема [5]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha P)^n\right]^m}; \quad (1)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^m\right]^2; \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad (3)$$

где θ – объемная влажность почвы, $см^3/см^3$;

θ_r – параметр минимальной влажности, соответствующий прочносвязанной, неподвижной для вязкого течения влаги, $см^3/см^3$;

θ_s – объемная влажность почвы, соответствующая полному влагонасыщению, $см^3/см^3$;

α – величина, обратно пропорциональная давлению входа воздуха (давлению барботирования), $1/см^3$;

n – индекс распределения пор по размерам, характеризующий наклон ОГХ;

K_s – коэффициент фильтрации, $см/сут$.

Константы α и n широко используются при сравнительном анализе физических свойств, классификации почв, расчете функций влаго- и теплопроводности [11, 3]. Параметр α – величина обратная давлению (потенциала) барботирования P_b , являющаяся критическим состоянием увлажнения, выше которого наблюдается угнетение растений [4].

В качестве входных параметров модели использованы экспериментальные значения, полученные А.И. Белолобцевым [1] в стационарном полевом опыте (1981-2005 гг.), представляющем собой пятипольный почвозащитный зернотравяной севооборот во времени, размещенный на дерново-подзолистых почвах в Подольском районе Московской области: 1 – овёс; 2 – ячмень с подсевом многолетних трав; 3 – многолетние травы 1-го года использования; многолетние травы 2-го года использования; 5 – озимая пшеница.

Для моделирования гидрофизических параметров использованы данные по гранулометрическому составу и плотности сложения при обычной обработке почвы на момент возобновления вегетации озимой пшеницы. Название почвы по гранулометрическому составу приведено к американской номенклатуре (Sandy clay loam). Процедуру численного моделирования проводили в программном пакете *RETIC v.6.02* с помощью нейросетевых педотрансферных функций *Rosetta Lite v.1.1* [12]. Современная вычислительная база с использованием педотрансферных функций обеспечивает простоту, скорость и удешевление получения почвенных характеристик математиче-

скими расчетами, так как исходными данными являются свойства почв. Следовательно, имея в своем арсенале апробированную для различных классов почв модель, можно рассчитать интересные характеристики.

Обсуждение результатов

Основной величиной, влияющей на гидрофизические свойства склоновых почв, является плотность сложения, от которой зависит экологическая и производительная их устойчивость. Как показали длительные исследования, общая динамика средней плотности эродированной почвы по пятилетним ротациям зернотравяного севооборота складывается отрицательной [1]. Рассмотрим последнюю ротацию, при которой, согласно полученным данным, установлено некоторое улучшение этого показателя (рис. 1).

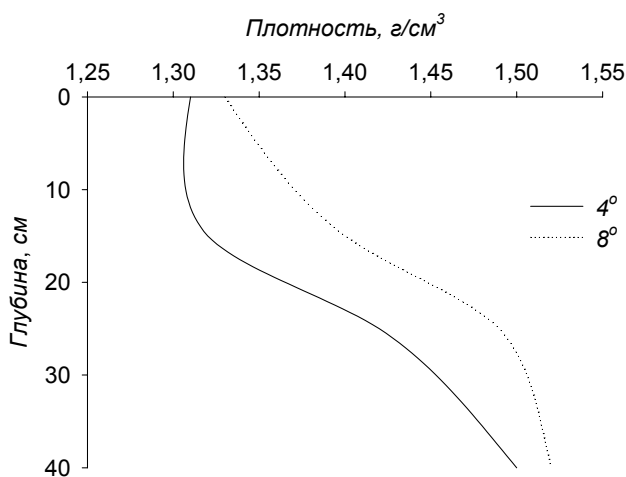


Рис. 1. Профильное распределение плотности сложения в почвах склонов различной крутизны: 4° и 8° (Белолюбцев, 2009)

На рисунке 1 видно, что почвы склона крутизной 8° значительно уплотнены в сравнении с почвами склона 4°. Несмотря на уменьшение плотности сложения почвы общая тенденция её уплотнения в целом не изменилась. Уплотнение эродированной почвы повлияло на изменение её гидрофизических параметров (рис. 2-5).

На рисунке обозначены ■ 4° □ 8° – склоны крутизной 4° и 8°.

На рисунке видно, что значения параметра θ_r верхнего двадцатисантиметрового слоя больше, чем в слое 20-40 см, независимо от крутизны склона. В зависимости от крутизны склона почвы 4° имеют более высокие значения θ_r , чем почвы склона 8°. Параметр θ_s также имеет более высо-

кие значения в слое 0-20 см в сравнении со слоем 20-40 см. По крутизне склона значения θ_s также больше для уклона 4°, чем для 8°.

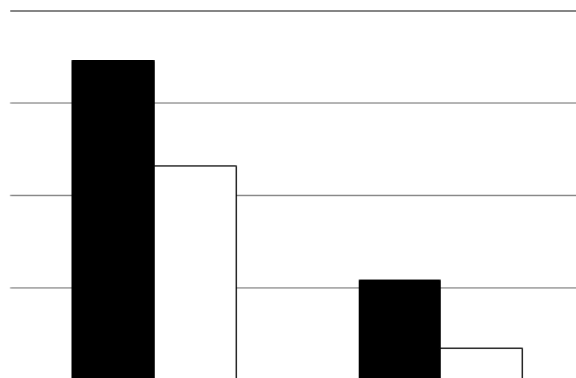


Рис. 2. Изменение параметра θ_r почв склонов различной крутизны

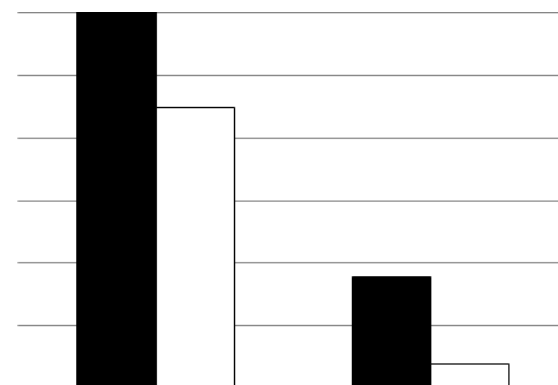


Рис. 3. Изменение параметра θ_s почв склонов различной крутизны

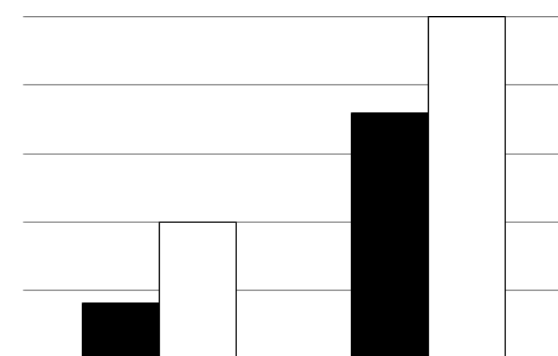


Рис. 4. Изменение параметра α почв склонов различной крутизны

Гидрофизический параметр α , равный обратной величине давления барботирования, имеет наименьшие значения в верхнем слое и на склоне 4°. Определение данного параметра особенно важно при изучении формирования водно-воздушных условий в почвах при их вероятном

переувлажнении, что особенно актуально в условиях Нечерноземной зоны. Характер изменений параметра n по глубине и в зависимости от крутизны склона такой же, как и для θ_r и θ_s .

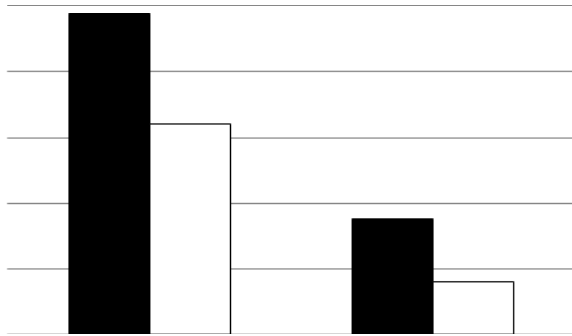


Рис. 5. Изменение параметра n почве склонов различной крутизны

Уменьшение значений гидрофизических параметров θ_r , θ_s и P_b свидетельствует о физической деградации рассмотренных почв вследствие уплотнения пахотного горизонта, снижения величины общей пористости, потери гумуса и тонкодисперсного материала в результате эрозионных процессов.

Параметр n минимален для деградированных почв, что связано с увеличением угла наклона капиллярной области ОГХ. По-видимому, в результате антропогенной нагрузки, а именно уплотнения почвы, возросла доля капиллярных пор [13], что требует проведения дополнительных исследований. В этом направлении интересны современные томографические исследования. В работе [14] изучено распределение пор по размерам в дерново-подзолистой почве Подмоскovie, которое было рассчитано из основной гидрофизической характеристики по уравнению Жюрена и определено в прямых томографических экспериментах. Сравнительный анализ кривых распределений пор по размерам, полученных указанными методами, выявил общие весьма схожие закономерности, показывающие, что в области от 30 до 5000 мкм наибольший объем пор занимают тонкие макропоры и, частично, мезопоры.

Таким образом, в результате проведенного моделирования выявлено, что полученные гидрофизические параметры являются отображением физического состояния эродированных почв.

Выводы

1. Результаты моделирования показали, что при долговременной агрогенной нагрузке дерно-

во-подзолистых почв склоновых земель происходит уменьшение их водоудерживающей способности.

2. При увеличении крутизны склона гидрофизические параметры, характеризующие физическое состояние почв, уменьшаются, а проявление физической деградации в этом случае более выражено.

Библиографический список

1. Белолюбцев А.И. Изменения агрофизических показателей плодородия эродированных почв под влиянием глобального потепления климата // Известия ТСХА. – 2009. – № 4. – С. 31-42.
2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с.
3. Болотов А.Г. Гидротермическое состояние почв юго-востока Западной Сибири: автореферат дис. ... докт. биол. наук. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. – 38 с.
4. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
5. Шеин Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении: учебник. – М.: «ИП Маракушев А.Б.». 2016. – 377 с.
6. Шеин Е.В., Пачепский Я.А., Губер А.К., Чехова Т.И. Особенности экспериментального определения гидрофизических и гидрохимических параметров математических моделей влаго-и солепереноса в почвах // Почвоведение. – 1995. – № 12. – С. 1479-1486.
7. Шеин Е.В., Махновецкая С.В. Агрофизическая оценка почв на основе анализа прогнозного водно-воздушного режима // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 187-191.
8. Бабошкина С.В., Пузанов А.В., Ельчиногова О.А., Рождественская Т.А. Водно-физические свойства и моделирование процесса движения влаги в черноземах южных Канской межгорной котловины (бассейн р. Чарыш, Северо-Западный Алтай) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3. – С. 47-54.
9. Бабошкина С.В., Пузанов А.В., Ельчиногова О.А., Рождественская Т.А., Трошкова И.А. Моделирование внутрипочвенного вертикального движения влаги в черноземах обыкновенных Уймонской межгорной котловины (бассейн р. Катунь) в условиях первоначального насыщения почвы влагой // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 8. – С. 29-39.

10. Болотов А.Г., Дубский С.Н., Шаталов А.Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Кузнецов Е.Н., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2. – С. 31-35.
11. Dexter A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting // *Geoderma*. – 2004. – V. 120. – P. 215-225.
12. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*. – 2001. – Vol. 251 (3-4). – P. 163-176.
13. Шейн Е.В., Березин П.Н., Гудима И.И. Дифференциальная пористость почв // *Почвоведение*. – 1988. – № 3. – С. 53-65.
14. Шейн Е.В., Скворцова Е.Б., Дембовецкий А.В. и др. Распределение пор по размерам в суглинистых почвах: сравнение микротомографического и капилляриметрического методов определения // *Почвоведение*. – 2016. – № 3. – С. 344-354.
- perenosa v pochvakh // *Pochvovedenie*. – 1995. – № 12. – S. 1479-1486.
7. Shein Ye.V., Makhnovetskaya S.V. Agrofizicheskaya otsenka pochv na osnove analiza prognoznogo vodno-vozdushnogo rezhima // *Pochvovedenie*. – 1995. – № 2. – S. 187-191.
8. Baboshkina S.V., Puzanov A.V., Yelchinina O.A., Rozhdestvenskaya T.A. Vodno-fizicheskie svoystva i modelirovanie protsessa dvizheniya vlagi v chernozemakh yuzhnykh Kanskoy mezhgornoy kotloviny (basseyn r. Charysh, Severo-Zapadnyy Altay) // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2016. – № 3. – S. 47-54.
9. Baboshkina S.V., Puzanov A.V., Yelchinina O.A., Rozhdestvenskaya T.A., Troshkova I.A. Modelirovanie vnutripochvennogo vertikalnogo dvizheniya vlagi v chernozemakh obyknovennykh Uymonskoy mezhgornoy kotloviny (basseyn r. Katun) v usloviyakh pervonachalnogo nasyshcheniya pochvy vlagoy // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2016. – № 8. – S. 29-39.
10. Bolotov A.G., Dubskiy S.N., Shatalov A.N., Shatalov A.N., Butyrin I.N., Kuznetsov Ye.N., Goncharov I.A., Goncharov N.A. Modelirovanie osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristiki chernozemov Altayskogo kraya // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2015. – № 2. – S. 31-35.
11. Dexter A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting // *Geoderma*. – 2004. – V. 120. – P. 215-225.
12. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*. – 2001. – Vol. 251 (3-4). – P. 163-176.
13. Shein Ye.V., Berezin P.N., Gudima I.I. Diferentsialnaya poristost pochv // *Pochvovedenie*. – 1988. – № 3. – S. 53-65.
14. Shein Ye.V., Skvortsova Ye.B., Dembovetskiy A.V. i dr. Raspredelenie por po razmeram v suglinistykh pochvakh: sravnenie mikrotomograficheskogo i kapillyarimetricheskogo metodov opredeleniya // *Pochvovedenie*. – 2016. – № 3. – S. 344-354.

References

1. Belolyubtsev A.I. Izmeneniya agrofizicheskikh pokazateley plodorodiya erodirovannykh pochv pod vliyaniem globalnogo potepleniya klimata // *Izvestiya TSKhA*. – 2009. – № 4. – S. 31-42.
2. Voronin A.D. Strukturno-funktsionalnaya gidrofizika pochv. – M.: Izd-vo MGU, 1984. – 204 s.
3. Bolotov A.G. Gidrotermicheskoe sostoyanie pochv yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri: avtoref. diss. ... doktora biol. nauk. – M.: MGU im. M.V. Lomonosova, 2016. – 38 s.
4. Shein Ye.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.
5. Shein Ye.V., Ryzhova I.M. Matematicheskoe modelirovanie v pochvovedenii: uchebnik. – M.: «IP Marakushev A.B.», 2016. – 377 s.
6. Shein Ye.V., Pachepskiy Ya.A., Guber A.K., Chekhova T.I. Osobennosti eksperimentalnogo opredeleniya gidrofizicheskikh i gidrokhimicheskikh parametrov matematicheskikh modeley vlago- i sole-

