

УДК: 631.432/.48

Математическое моделирование водного режима двух агрочерноземов с различным уровнем залегания карбонатов

Т. А. Архангельская^{1, а}, О. С. Хохлова², Т. Н. Мякшина²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

² Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Россия, 142290, Московской обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2

E-mail: ^а arhangelskaia@gmail.com

Получено 23 января 2016 г.,
после доработки 9 марта 2016 г.

Моделирование водного режима агрочерноземов проводили для двух участков, на одном из которых в течение пятидесяти лет поддерживается бессменная монокультура кукурузы, на втором — бессменный черный пар. В почве под кукурузой карбонаты обнаруживаются начиная с глубины 140–160 см, под черным паром — с глубины 70–80 см. Моделирование с применением пакета HYDRUS-1D и метода ФАО56 показало, что гидрологический режим агрочерноземов на двух участках различен. Под черным паром влажность почвы в целом выше, чем под кукурузой. Восходящие потоки влаги под черным паром существенно больше, чем под кукурузой, и захватывают более мощный слой почвы.

Ключевые слова: агрочерноземы, водный режим почв, HYDRUS-1D

Mathematical modeling of soil hydrology in two arable Chernozems with different depth to carbonates

Т. А. Arkhangelskaya¹, O. S. Khokhlova², T. N. Miakshina²

¹ Faculty of Soil Science, Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

² Institute of Physical-Chemical and Biological Problems in Soil Science, 2 Institutskaya st., Pushchino, Moscow region, 142290, Russia

Abstract. — Simulation of soil hydrology was performed for two plots: the first one was under corn monocrop and another one was under bare fallow for 50 years. The depth to carbonates is 140–160 cm under corn and 70–80 cm under bare fallow. Mathematical modeling with the HYDRUS-1D software and the FAO56 method demonstrated that soil hydrology was different for the two plots. Soil moisture was generally higher under bare fallow than under corn. The upward fluxes were significantly greater under bare fallow than under corn, and they were obtained for a thicker soil layer.

Keywords: arable chernozems, soil hydrology, HYDRUS-1D

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 401–410 (Russian).

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проекты №№ 14-04-01761-а и 16-05-00669-а.

© 2016 Татьяна Александровна Архангельская, Ольга Сергеевна Хохлова, Татьяна Николаевна Мякшина

Постановка задачи

Задача моделирования водного режима агрочерноземов возникла в результате анализа полевых данных, полученных на экспериментальных участках Воронежской опытной станции — филиала ВНИИ кукурузы. Поля станции расположены на абсолютно выровненном и микротопографически однородном водораздельном участке с уклоном поверхности около 0° . Почвы станции начали распахиваться 250–300 лет тому назад; в течение последних пятидесяти лет на интересующих нас соседних полях поддерживается бессменный черный пар и выращивается кукуруза в виде монокультуры. На этих двух полях были заложены разрезы на расстоянии не более 5 м друг от друга. В разрезе под кукурузой карбонаты были обнаружены начиная с глубины 140–160 см, под черным паром — с глубины 70–80 см [Khokhlova et al., 2014].

Появление карбонатов в пределах корнеобитаемого слоя означает, по сути, карбонатное засоление прежде бескарбонатных в этой части профиля пахотных почв при их переходе в режим парования. Засоление почв является одним из опаснейших процессов среди разнообразных проявлений антропогенной деградации почв. Поэтому понимание механизмов изменчивости карбонатного профиля в результате антропогенных воздействий является одной из актуальных задач современного почвоведения.

В работе [Хохлова, 2008] была сформулирована гипотеза о связи наблюдаемого карбонатного состояния почв с многолетними микроклиматическими условиями их функционирования и об относительно небольших характерных временах соответствующих изменений.

Мы предположили, что постепенный подъем карбонатов на участке под паром связан в первую очередь с изменением гидрологического режима почвы в результате изменения режима агроиспользования. Этот подъем может быть обусловлен двумя механизмами. Первый из них — это непосредственный перенос карбонатов восходящими потоками влаги. Под растительностью значительная часть поступающей в почву влаги возвращается в атмосферу благодаря корневому водопотреблению и транспирации растений; в отсутствие растительности влага испаряется лишь непосредственно с поверхности почвы. Соответственно можно ожидать, что после перевода участка под черный пар влага, которая ранее перемещалась по корням и стеблям растений, будет двигаться вверх непосредственно по почвенным порам, перенося с собой растворенные и взвешенные вещества, в том числе карбонаты.

Второй возможный механизм подъема карбонатов под черным паром связан с диффузией. Как отмечается в работе [Pingitore, 1982], скорость диффузии лимитирует процессы растворения и переосаждения карбонатов, будучи существенно меньше скоростей соответствующих реакций. Диффузионный перенос растворенных веществ в почвенном профиле определяется градиентом их концентрации и коэффициентом диффузии в почве, который меньше коэффициента диффузии в свободной воде и возрастает с увеличением влажности почвы в силу увеличения общего сечения обводненных пор [Jury, Horton, 2004]. Поскольку почва под черным паром должна быть более влажной, чем под растениями с развитой корневой системой, можно ожидать усиления диффузионного перемещения карбонатов по профилю после перевода участка под черный пар. При этом влажность почвы и величина внутрпочвенных вертикальных потоков влаги будут определяться не только наличием или отсутствием растительности, но и погодными условиями, в первую очередь количеством осадков.

Чтобы перевести эти рассуждения на количественный уровень, была поставлена задача оценить и сопоставить влажность почвы и величины вертикальных потоков влаги в почвенном профиле на участках под паром и под кукурузой в различных условиях атмосферного увлажнения. С этой целью провели серию расчетных экспериментов, проверяя правдоподобие гипотезы: более высокий уровень залегания карбонатов в почве под черным паром обусловлен их подъемом в результате изменения гидрологического режима оголенной почвы по сравнению с почвой под растительностью.

Методы

Моделирование гидрологического режима черноземов под черным паром и под монокультурой кукурузы проводили без учета макропор и гистерезиса, используя свободно распространяемый программный пакет HYDRUS-1D [Simunek et al., 2013]. Движение влаги в почве моделировали с помощью уравнения Ричардса; для описания зависимостей между давлением почвенной влаги, влажностью почвы и коэффициентом влагопроводности выбрали модель ван Генухтена–Муалема [van Genuchten, 1980; Simunek et al., 2013], которая в настоящее время широко используется. Основные уравнения выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) - S,$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h < 0, \\ \theta_s, & h \geq 0, \end{cases}$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2,$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1,$$

где θ — объемная влажность почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$;
 θ_s — влажность почвы при насыщении, $\text{см}^3/\text{см}^3$;
 θ_r — остаточная влажность, $\text{см}^3/\text{см}^3$;
 S_e — эффективная влажность, безразм.;
 h — потенциал почвенной влаги, см;
 t — время, сут;
 x — координата по вертикали, см (положительное направление вверх);
 K — коэффициент влагопроводности, см/сут;
 K_s — коэффициент фильтрации, см/сут;
 l — параметр связности пор, безразм.;
 α, m, n — эмпирические параметры, $1/\text{см}$, безразм., безразм.;
 S — сток влаги из почвы за счет поглощения корнями, $\text{см}^3/(\text{см}^3 \text{сут})$.

При расчетах параметр связности пор l полагали равным 0.5 [Muallem, 1976]. Прочие независимые параметры, а именно $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s$, оценивали с помощью входящей в пакет HYDRUS-1D базы данных «Розетта» по данным о гранулометрическом составе, плотности и значениях влажности при потенциале почвенной влаги -33 и -1500 кПа, которые примерно соответствуют наименьшей влагоемкости (НВ) и влаге завядания (ВЗ) [Шеин, 2005].

Расчеты проводили до глубины 2 м; в профиле выделяли 10 однородных по физическим свойствам слоев толщиной от 10 до 30 см (таблица 1). Параметры $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$ и коэффициент фильтрации рассчитывали послойно, используя собственные данные о гранулометрическом составе почв и данные В. А. Королева [Королев, 2008] о плотности и величинах наименьшей влагоемкости и влаги завядания для исследуемых делянок.

Гидрологический режим черноземов моделировали для периода с мая по сентябрь с шагом 1 сут. Начальное распределение влажности в профиле задавали в соответствии со среднемноголетними данными о послойных запасах влаги в агрочерноземах весной [Лебедева, 2002]. На нижней границе задавали условие свободного дренажа. Месячные нормы осадков задавали в соответствии с многолетними данными метеостанции «Воронеж, агро» [Научно-прикладной справочник ..., 1990].

Расчеты проводили для четырех случаев: осадки соответствуют многолетней норме; выпадает половина многолетней нормы осадков; выпадает двойная норма осадков; выпадает трой-

ная норма осадков. При этом учитывали неравномерность распределения осадков в течение месяца, которую моделировали двумя способами. В первой серии расчетов считали, что вся месячная сумма осадков выпадает в течение двух суток в начале месяца, а затем наступает 28-дневный период постепенного иссушения почвенного профиля за счет испарения и (в случае наличия растительности) транспирации. Во второй серии месячную сумму осадков равномерно распределяли по трем дням в начале каждой декады, а затем наступал 9-дневный период иссушения. Расчеты проводили для каждой комбинации условий по количеству осадков и по характеру их распределения внутри месяца.

При расчетах испарения во время периодов иссушения использовали величину потенциальной эвапотранспирации, которую задавали, используя рекомендованный ФАО метод эталонной культуры [Allen et al., 1998]. На первом шаге рассчитывали эвапотранспирацию эталонной культуры в условиях оптимальной влагообеспеченности по формуле Пенмана–Монтейта:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)},$$

где ET_0 — эталонная эвапотранспирация, мм/сут;

R_n — радиационный баланс деятельной поверхности, МДж/м²сут;

G — поток тепла в почву, МДж/м²сут;

T — среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, °С;

u_2 — скорость ветра на высоте 2 м, м/с;

e_s — парциальное давление насыщенного водяного пара, кПа;

e_a — фактическое парциальное давление водяного пара, кПа;

$(e_s - e_a)$ — дефицит насыщения, кПа;

Δ — наклон кривой давления пара, кПа/°С;

γ — психрометрическая постоянная, кПа/°С.

При расчетах ET_0 использовали многолетние среднемесячные величины температуры воздуха, скорости ветра на высоте 10 м, парциального давления водяного пара по ближайшей к опытному полю метеостанции «Воронеж, агро», а также величины радиационного баланса по актинометрической станции «Нижедевицк» [Научно-прикладной справочник ..., 1990]. Прочие входящие в формулу для ET_0 показатели рассчитывали по известным метеоданным с помощью описанных в [Allen et al., 1998] алгоритмов. При выборе значения психрометрической постоянной учитывали высоту опытного поля над уровнем моря (около 180 м); при расчетах потока тепла в почву помимо приведенных в таблице 2 данных использовали среднемесячные температуры воздуха в апреле (6.6 °С) и октябре (5.9 °С).

На втором шаге получали потенциальную эвапотранспирацию для делянки под кукурузой, умножая эталонную эвапотранспирацию на коэффициент культуры, равный для кукурузы 1.20 [Allen et al., 1998]. Полученную потенциальную эвапотранспирацию разделяли на потенциальную транспирацию растений и потенциальное испарение с поверхности почвы. При этом учитывали, что в отсутствие дефицита влаги доля испарения в общей эвапотранспирации засеянного кукурузой участка составляет 90 % в мае, 65 % в июне и 25 % в июле–сентябре [Liu et al., 2002]. Потенциальное испарение для делянки под черным паром принимали равным $1.15 \times ET_0$ [Allen et al., 1998].

Полученные оценки потенциальной транспирации и потенциального испарения служили входными данными для модели HYDRUS-1D. В процессе моделирования гидрологического режима почвы рассчитывались актуальные величины транспирации и испарения, которые менялись в соответствии с текущей влажностью и доступностью почвенной влаги [Simunek et al., 2013]. Реакцию водопотребления растений на водный стресс описывали трапециевидной зависимостью [Feddes et al., 1978]. Распределение корней кукурузы в почвенном профиле имитировали в соответствии с данными для растений в фазе молочного состояния зерна на неорошаемом участке [Newell, Wilhelm, 1987]. Используя графический интерфейс, задавали постоянную

плотность корней в слое 0–70 см и линейное снижение их плотности с глубиной в слое 70–170 см до полного исчезновения.

Результаты и обсуждение

При моделировании сравнивали гидрологические режимы двух участков: под черным паром и под кукурузой. Поскольку целью расчетов была в первую очередь количественная оценка влияния растительности (или ее отсутствия) на гидрологический режим почв, для обеих делянок были заданы одинаковые почвенные свойства, соответствующие делянке под кукурузой. Поэтому полученный при моделировании отклик гидрологического режима агрочерноземов на изменение режима использования при переходе от монокультуры кукурузы к черному пару относится к самому началу парования, когда изменений в физических свойствах почвы еще не произошло. В модели делянки отличались только способом потери влаги в периоды иссушения: на делянке под черным паром происходило испарение с поверхности почвы; на делянке под кукурузой испарение с поверхности почвы дополнялось транспирацией растений. Движение влаги в почве под черным паром определялось в модели исключительно градиентом потенциала почвенной влаги; под кукурузой помимо матричного потенциала почвенной влаги действовала сосущая сила корней растений.

В таблице 1 приведены использованные при моделировании гидрофизические свойства почвы на делянке под кукурузой. Остаточная влажность θ_r составляла 0.06–0.08 см³/см³ и практически не менялась в профиле. Влажность в состоянии насыщения θ_s уменьшалась с глубиной от 0.51 до 0.42 см³/см³ в соответствии с ростом плотности и уменьшением пористости почвы. Полученные нами оценки для влажности в состоянии насыщения близки к значениям пористости, приведенным в монографии В. А. Королева [Королев, 2008]. Параметр α , связанный с давлением входа воздуха [Radcliffe, Simunek, 2010], несколько уменьшался с глубиной при общем диапазоне 0.006–0.01 см⁻¹. Параметр n , влияющий на крутизну кривой водоудерживания и связанный с распределением пор по размерам [Radcliffe, Simunek, 2010], практически не менялся с глубиной, составляя около 1.4. Рассчитанный коэффициент фильтрации K_s менялся от 39 см/сут в верхнем горизонте до 4–5 см/сут в глубоких слоях почвы. Полученные значения коэффициента фильтрации можно классифицировать как средние в слое 0–90 см, низкие в слое 91–150 см и очень низкие в слое 151–200 см [Эггельсманн, 1984].

Таблица 1. Гидрофизические свойства почвы на делянке под кукурузой

Глубина, см	θ_r , см ³ /см ³	θ_s , см ³ /см ³	α , см ⁻¹	n	K_s , см/сут
0–10	0.07	0.51	0.0093	1.40	38.6
11–30	0.07	0.50	0.0082	1.42	30.7
31–50	0.07	0.49	0.0106	1.36	25.6
51–70	0.08	0.48	0.0093	1.36	19.5
71–90	0.07	0.47	0.0083	1.36	17.3
91–110	0.07	0.46	0.0075	1.36	14.1
110–130	0.07	0.44	0.0066	1.37	7.2
131–150	0.07	0.43	0.0060	1.37	6.1
151–170	0.07	0.42	0.0057	1.37	4.4
171–200	0.06	0.42	0.0057	1.37	4.8

В таблице 2 приведены использованные в расчетах климатические данные (среднемесячный радиационный баланс R_n , температура воздуха T , скорость ветра на высоте 10 м u_{10} , парциальное давление водяного пара e_a , сумма осадков P), а также рассчитанные в соответствии с рекомендациями ФАО56 [Allen et al., 1998] величины потока тепла в почву G , скорости ветра на высоте 2 м u_2 , давления насыщенного водяного пара e_s при температуре T , уклона кри-

вой давления пара Δ , потенциальной эвапотранспирации эталонной культуры ET_0 , потенциальной эвапотранспирации ET_c , потенциальной транспирации T_c и потенциального испарения E_c с делянки под кукурузой, а также потенциального испарения с делянки под черным паром E_{s0} .

Наибольшие значения радиационного баланса характерны для июня и июля, но в июле поток тепла в почву существенно меньше, чем в июне, и соответственно затраты энергии на испарение в июле максимальны, что приводит к максимальной потенциальной эвапотранспирации эталонной культуры. В течение всего расчетного периода эталонная эвапотранспирация превосходит среднесуточное количество выпадающих осадков. При развитом растительном покрове потенциальная эвапотранспирация с делянки под кукурузой несколько выше потенциального испарения с делянки под черным паром.

Соотношение между потенциальным физическим испарением E_c и потенциальной транспирацией T_c на делянке под кукурузой меняется в течение вегетационного периода в соответствии с фазой развития растений. В мае молодые побеги кукурузы транспирируют не очень интенсивно и почти не затеняют поверхность почвы, в результате чего потенциальное физическое испарение на участке с кукурузой близко к потенциальному физическому испарению на участке под черным паром. К июлю ситуация кардинально меняется: потенциальная транспирация зрелых растений достигает максимума, а потенциальное физическое испарение непосредственно с поверхности почвы под растениями снижается, составляя около 33 % от потенциальной транспирации кукурузы и около 26 % от потенциального испарения с оголенной поверхности почвы на участке с черным паром. В дальнейшем мы увидим, что из-за иссушения верхнего слоя почвы доля физического испарения (которое идет именно из самого верхнего слоя) по сравнению с транспирацией оказывается еще меньше благодаря тому, что растения транспирируют воду, которую корни собирают из всего корнеобитаемого слоя.

Таблица 2. Климатические показатели и результаты расчетов по методу ФАО56 (пояснения в тексте)

Показатель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
R_n , МДж/м ² сут	9.80	11.00	10.86	7.92	4.64
T , °С	14.6	17.9	19.9	18.6	13.0
u_{10} , м/с	3.6	3.2	3.0	2.9	3.1
e_a , кПа	0.94	1.27	1.50	1.38	1.03
P , мм/мес	51	58	71	59	45
G , МДж/м ² сут	0.79	0.37	0.05	-0.5	-0.89
u_2 , м/с	2.7	2.4	2.3	2.2	2.3
e_s , кПа	1.66	2.05	2.32	2.14	1.50
Δ , кПа/°С	0.108	0.130	0.144	0.136	0.098
ET_0 , мм/сут	3.41	3.79	3.88	3.21	2.07
ET_c , мм/сут	4.09	4.54	4.65	3.85	2.48
T_c , мм/сут	0.41	1.59	3.49	2.89	1.86
E_c , мм/сут	3.68	2.95	1.16	0.96	0.62
E_{s0} , мм/сут	3.92	4.35	4.46	3.69	2.38

На рис. 1, а, б представлена полученная при моделировании динамика потоков влаги через поверхность почвы на делянках под черным паром и под кукурузой при выпадении месячной нормы осадков в течение первых двух дней месяца. Во время выпадения осадков на обеих делянках формируются отрицательные потоки влаги, соответствующие поступлению влаги в почву. Величина этих потоков одинакова для двух делянок и соответствует заданному в модели количеству осадков.

Пока осадков нет, на обеих делянках наблюдается положительный поток влаги через поверхность, соответствующий потере влаги почвой за счет испарения. Величина этого потока

соответствует потенциальному испарению, пока почва переувлажнена, и постепенно снижается по мере иссушения почвы. При этом в июле–августе на делянке под черным паром испарение соответствует потенциальному лишь в течение первых 10–12 дней в начале периода иссушения (рис. 1, Ia), а на делянке под кукурузой — в течение почти всего месяца (рис. 1, Ib). Однако за счет того, что потенциальное испарение почвы под развитой кукурузой существенно ниже, чем на участке под черным паром (таблица 2, рис. 1, Ia, б), в целом за вегетационный период почва под черным паром испаряет больше, чем под кукурузой.

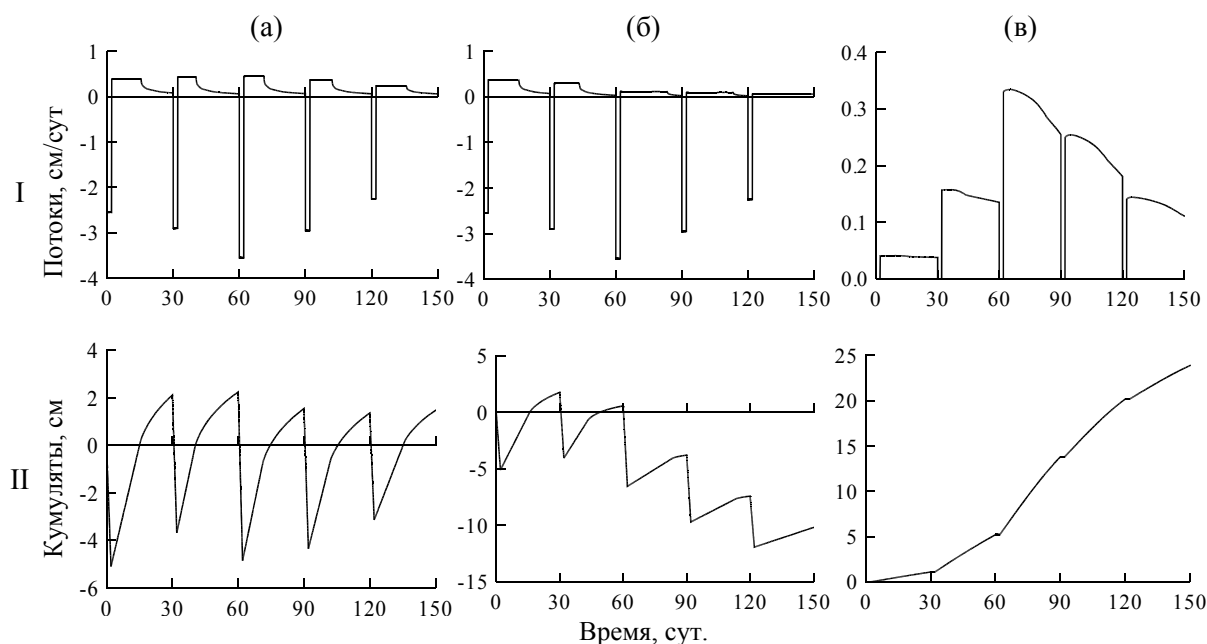


Рис. 1. Полученная при моделировании динамика потоков влаги через поверхность почвы для делянок под черным паром (Ia) и под кукурузой (Iб), динамика корневого водопотребления (Iв), кумуляты этих потоков (IIa–в) при выпадении месячной нормы осадков в течение первых двух дней месяца. Отсчет времени — с 1 мая

Кумулятивный поток влаги через поверхность почвы под черным паром колеблется в течение сезона около нуля (рис. 1, IIa), т. е. поступление влаги с осадками в целом компенсируется испарением, что характерно для автоморфных условий. Совершенно иная картина получена на участке под кукурузой, где поступление осадков компенсируется физическим испарением из почвы только в мае–июне, а затем кумулятивный поток через поверхность остается отрицательным, т. е. направленным в почву, возрастая по абсолютной величине и достигая к концу сентября -10 см (рис. 1, IIб). Это количество является весьма существенной частью общей суммы осадков за май–сентябрь, составляющей 28,4 см (таблица 2).

Однако разница между поступившей и физически испарившейся влагой на участке под кукурузой с избытком компенсируется транспирацией, которая в июле достигает почти 3,5 мм/сут (рис. 1, Iв). Кумулятивное корневое водопотребление за вегетационный период составляет около 24 см (рис. 1, IIв), или около 85 % от поступивших осадков. В результате влажность почвы под кукурузой оказывается меньше, чем под черным паром.

На рис. 2 приведены результаты расчетов влажности (а) и потоков влаги в профиле (б) при выпадении осадков в течение первых двух дней месяца в количестве половины месячной нормы (I), нормы (II), двух норм (III), трех норм (IV). Представлено профильное распределение для трех сроков в июле: сразу после выпадения осадков (03.07), через два дня после выпадения осадков (05.07), во второй половине периода без осадков (20.07).

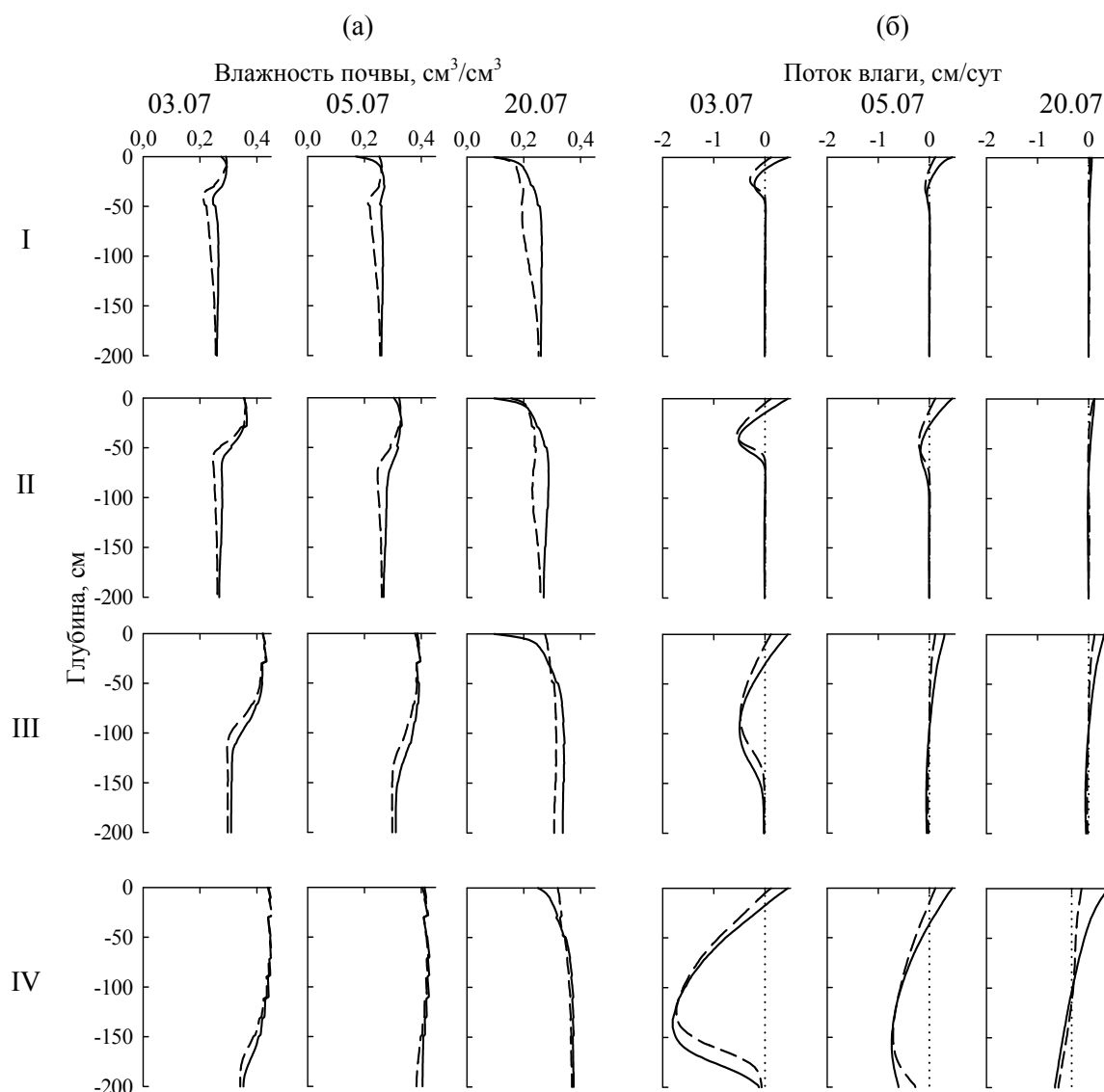


Рис. 2. Полученное при моделировании профильное распределение влажности почв (а) и потоков влаги (б) под черным паром (сплошная линия) и под кукурузой (штриховой пунктир) для 3.07, 5.07 и 20.07 при выпадении осадков в количестве половины месячной нормы (I), нормы (II), двух норм (III), трех норм (IV) в течение первых двух дней месяца

Профильное распределение почвенной влаги на двух участках (рис. 2, а) наиболее сильно различается в вариантах I и II, т. е. при поступлении половины нормы осадков или нормы. При выпадении двойной нормы осадков различия во влажности между участками уменьшаются; при выпадении тройной нормы различия практически исчезают в нижней переувлажненной части профиля, но увеличиваются в приповерхностном слое.

Во всех сериях расчетов влажность почвы больше под черным паром почти во всем профиле. В вариантах II–IV выделяется верхний слой почвы, в котором, наоборот, содержание почвенной влаги под кукурузой выше. Для 20.07 мощность этого слоя меняется от 10 см в варианте II до 44 см в варианте IV. Наибольшие расхождения во влажности между участками составляют $0.066 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (вариант I, срок 20.07, глубина 60–72 см). Этим расхождениям соответствует существенная, более чем в 30 раз, разница полученных в модели коэффициентов влагопроводности (3.52×10^{-3} и 1.09×10^{-4} см/сут), что связано с нелинейной зависимостью влагопроводности почвы от влажности. При выпадении нормы осадков (вариант II) влажность почвы

на глубине 100 см в срок 20.07 составляет $0.285 \text{ см}^3/\text{см}^3$ под паром и $0.232 \text{ см}^3/\text{см}^3$ под кукурузой; соответствующие коэффициенты влагопроводности равны 1.01×10^{-2} и $9.77 \times 10^{-4} \text{ см/сут.}$ Таким образом, расхождения во влажности почвы на двух участках, полученным при моделировании, соответствуют значительные, более чем на порядок, различия в транспортных свойствах почв изучаемых участков. Кроме того, даже в отсутствие потоков влаги в профиле (при малых вертикальных градиентах потенциала h) в более влажной почве будет наблюдаться более интенсивное диффузионное перемещение карбонатов.

Отрицательные потоки влаги, направленные вниз, на двух участках сопоставимы, но под черным паром почва промачивается быстрее, чем под кукурузой, и этот эффект возрастает с увеличением количества осадков (рис. 2, б). Положительные потоки влаги, направленные вверх, под черным паром существенно больше, чем под кукурузой, и захватывают более мощный слой почвы (рис. 2, б). Эти расхождения объясняются тем, что под кукурузой поступающая с осадками влага перехватывается корнями и движется к поверхности почвы преимущественно по корневой системе, а не по почвенным порам. Под черным паром все перемещение влаги осуществляется непосредственно по почвенной толще, и в результате восходящие внутрипочвенные потоки оказываются больше, чем на участке с кукурузой. Например, после выпадения в начале июля нормы осадков (вариант II) в срок 20.07 восходящие потоки получены в слое 0–38 см под кукурузой и в слое 0–72 см под черным паром. При этом на глубине 30 см интенсивность восходящих потоков под черным паром и кукурузой составляет 1.77 и 0.27 см/мес. Под черным паром мощность слоя с восходящими потоками влаги увеличивается до 94 см при выпадении двух норм осадков и до 102 см при выпадении трех норм. В конце периода иссушения, т. е. 30.07, мощность слоя с восходящими потоками влаги достигает 90 см при выпадении нормы осадков и 120 см при выпадении двух и трех норм.

При более равномерном распределении месячной суммы осадков, а именно по трем дням в начале каждой декады, картина в целом не изменилась. Поскольку в этом варианте расчетов одновременно выпадало в три раза меньше осадков, потоки вниз по профилю уменьшились по сравнению с представленными на рис. 2. Но в конце второй декады июля и влажность почвы, и восходящие потоки по-прежнему оказались более высокими под черным паром. Таким образом, полученные при моделировании качественные различия в гидрологическом режиме участков под черным паром и под кукурузой связаны в первую очередь с различиями в агроиспользовании, а не с режимом выпадения осадков.

Заключение

Математическое моделирование показало, что под черным паром резко меняется гидрологический режим черноземов. В отсутствие транспирирующей растительности влажность почвы увеличивается по сравнению с участком под кукурузой почти во всем профиле, за исключением приповерхностного слоя, мощность которого при выпадении нормы осадков составляет около 10 см. Полученному в модели увеличению влажности почвы под черным паром соответствует значительный, более чем порядок, рост коэффициента влагопроводности почвы. В почве под паром накопленная во время обильных осадков влага движется вверх непосредственно по почвенным порам. Под кукурузой значительная доля поступившей влаги движется вверх по корням растений, и поэтому потоки вверх по почвенным порам оказываются существенно меньше, чем на участке под черным паром.

В результате одинаковые погодные условия формируют под черным паром более благоприятные гидрологические условия для подъема карбонатов и их аккумуляции в верхней части профиля, чем под кукурузой. Усиление направленных вверх вертикальных потоков влаги благоприятствует конвективному переносу карбонатов в верхнюю часть профиля, а увеличение влажности, приводящее к росту коэффициента диффузии, способствует увеличению диффузионного перемещения карбонатов в том же направлении.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что более высокий уровень залегания карбонатов под черным паром связан с их подъемом в ре-

зультате изменения гидрологического режима оголенной почвы по сравнению с почвой под растительностью. Это убеждает нас в целесообразности дальнейшей работы с построенной моделью.

Список литературы

- Королев В. А.* Современное физическое состояние черноземов центра Русской равнины. — Воронеж: ГУП ВО «Воронеж. обл. типография — Изд-во им. Е. А. Болховитинова», 2008.
- Лебедева И. И.* Гидрологические профили миграционно-карбонатных (типичных) черноземов и агрочерноземов // Почвоведение. — 2002. — № 10. — С. 1214–1233.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 28. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.
- Хохлова О. С.* Карбонатное состояние степных почв как индикатор и память их пространственно-временной изменчивости: Дис. ... докт. геогр. наук. — М., 2008.
- Шеин Е. В.* Курс физики почв. — М.: Изд-во МГУ, 2005.
- Эггельсманн Р.* Руководство по дренажу. — М.: Колос, 1984.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M.* Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) // FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. — 1998.
- Feddes R. A., Kowalik P. J., Zaradny H.* Simulation of field water use and crop yield. — 1978.
- Jury W. A., Horton R.* Soil Physics. 6th ed. — John Wiley & Sons, 2004.
- Khokhlova O. S., Chendev Yu. G., Myakshina T. N.* Change in pedogenic carbon stocks under different types and duration of agricultural management practices in the central Russian forest steppe // Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation / Ed. by Maren Oelbermann. — Wageningen Academic Publishers, 2014. — Chapter 2. — P. 33–52.
- Liu C., Zhang X., Zhang Y.* Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter // Agricultural and Forest Meteorology. — 2002. — Vol. 111. — P. 109–120.
- Mualem Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. — 1976. — Vol. 12, No. 3. — P. 513–522.
- Newell R. L., Wilhelm W. W.* Conservation tillage and irrigation effects on corn root development // Agron. J. — 1987. — Vol. 79. — P. 160–165.
- Pingitore N. E.* The role of diffusion during carbonate diagenesis // Journal of Sedimentary Research. — 1982. — Vol. 52, No. 1. — P. 27–39.
- Radcliffe D. E., Simunek J.* Soil Physics with HYDRUS. Modeling and Applications. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- Simunek J., Sejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M. Th.* The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. — Riverside, CA: Department of Environmental Sciences, University of California. — 2013.
- Van Genuchten M. Th.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sc. Soc. Am. J. — 1980. — Vol. 44. — P. 892–898.