

УДК 631.432.48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА АГРОЧЕРНОЗЕМОВ ПОД ЧЕРНЫМ ПАРОМ И ПОД КУКУРУЗОЙ ДЛЯ ДВУХ КОНТРАСТНЫХ ПО ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ОСАДКАМИ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ

© 2019 г. Т. А. Архангельская¹*, О. С. Хохлова²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

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

*e-mail: arhangelskaia@gmail.com

Поступила в редакцию 08.01.2018 г.

После доработки 07.06.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Водный режим агрочерноземов (Chernozems) моделировали для двух участков на территории Воронежской опытной станции, на первом из которых с 1966 г. поддерживается монокультура кукурузы, на втором – бессменный черный пар. Использовали свободно распространяемый программный пакет HYDRUS-1D. Испарение на участке под черным паром и эвапотранспирацию на участке под кукурузой оценивали методом ФАО56. Расчеты проводили для вегетационных сезонов 2013 и 2014 гг., которые различались по обеспеченности осадками. При многолетней средней сумме осадков за май–сентябрь, равной 284 мм, суммы осадков за эти пять месяцев в 2013 и 2014 гг. составили 427 и 195 мм, при этом в июле 2014 г. выпало всего 2 мм осадков. На протяжении обоих расчетных периодов полученный водный режим агрочерноземов на двух участках различался. В слое 70–140 см влажность почвы под черным паром не опускалась ниже $0.25 \text{ см}^3/\text{см}^3$, под кукурузой – уменьшалась до $0.17 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Наиболее сухие слои под кукурузой формировались на глубинах 70–120 см. На участке под черным паром суммарное физическое испарение с поверхности почвы за май–сентябрь 2014 г. превосходило поступившие за это время осадки. Под кукурузой суммарное испарение было меньше осадков, и более низкая влажность почвы на этом участке объясняется корневым водопотреблением, суммарная величина которого за май–сентябрь 2014 г. составила 23 см.

Ключевые слова: гидрология почв, корневое водопотребление, математическое моделирование, ФАО56, HYDRUS-1D

DOI: 10.1134/S0032180X19020023

ВВЕДЕНИЕ

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 выровненном микротопографически однородном водораздельном участке с уклоном поверхности около 0° . Почвы станции начали распахать 250–300 лет тому назад; с 1966 г., то есть в течение последних 50 лет, на интересующих нас соседних полях поддерживается бессменный черный пар и выращивается кукуруза в виде монокультуры [11]. На этих двух полях были заложены разрезы на расстоянии около 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 [15].

Постепенный подъем карбонатов на участке под черным паром может быть связан с восходящими потоками влаги, существенно превосходящими восходящие потоки под кукурузой. О различии водного режима черноземов под целинной растительностью, под сельскохозяйственными культурами и под черным паром писали многие авторы.

В монографии Большакова [4] проанализирован водный режим мощных целинных черноземов на территории Центрально-черноземного заповедника и его изменение под влиянием обработки почвы. Показано, что благодаря менее развитой корневой системе культурных растений по сравнению с растительностью целинной степи в пахотных почвах уменьшаются расходы влаги на десукцию растениями, а в период парования пахотных почв расход бывает еще меньшим.

Исследования Коковиной [5] подтвердили, что в период расхода влаги степень иссушения почвенного профиля определяется растительностью, продолжительностью ее вегетационного периода и глубиной распространения корней, а после уборки осеннее парование почвы способствует накоплению влаги. По результатам исследований 1964–1968 гг., изменение влажности почвы под кукурузой происходило в основном в двухметровой почвенной толще. В засушливые годы слой иссушения почвы до влажности ниже влажности разрыва капилляров имел мощность 140 см. В этом слое расход влаги мог происходить только за счет корневого водопотребления без сколько-либо заметного передвижения влаги к поверхности. Напротив, под черным паром в жарком 1966 г. расход влаги на испарение с поверхности почвы происходил из толщи почвы не менее 2 м, что обеспечивалось большей влажностью почвы и передвижением подвижной влаги вверх против градиента потенциала почвенной влаги.

Влияние режима влажности черноземов и интенсивности восходящих токов карбонатных растворов на формирование карбонатного профиля подробно обсуждается в трудах Афанасьевой [2, 3]. В работе [2] на основе анализа большого количества полевых данных сделан вывод о том, что солевой профиль черноземов тесно связан с их водным режимом и даже позволяет судить о типе водного режима без проведения непосредственных наблюдений. В работе [3] отмечается, что в корнеобитаемом слое в летнее время восходящие токи растворов почти не выражены, поскольку основной перенос почвенной влаги из глубины профиля к поверхности почвы происходит по корням растений.

Помимо переноса растворенных веществ вместе с потоками влаги, еще один механизм перемещения карбонатов в профиле связан с диффузионным перемещением последних по обводненным порам [17]. Диффузионный перенос растворенных веществ в почвенном профиле возрастает с увеличением влажности почвы в силу увеличения общего сечения обводненных пор [12, 14]. Поэтому в более влажной почве под черным паром скорость диффузионного перемещения карбонатов должна увеличиваться, так же как и интенсивность их конвективного переноса непосредственно потоками влаги.

Подробный обзор современных представлений о биотических и абиотических факторах, контролирующих формирование и локализацию педогенных карбонатов в почвенном профиле, приведен в работе [20]. В обзоре подчеркивается роль климата, в первую очередь осадков и режима влажности почвы, роль гранулометрического состава и структуры почвы, определяющих вододерживающую способность почв и движение

Таблица 1. Влажность черноземов под косимой степью на участке “Ямская степь” заповедника “Белогорье” и на примыкающей к заповедному участку пашне под черным паром 16–17 июля 2013 г.

Глубина, см	Влажность почвы, см ³ /см ³	
	косимая степь	черный пар
5–10	0.13	0.22
15–20	0.17	0.28
25–30	0.17	0.27
40–45	0.19	0.25
55–60	0.19	0.31

влаги в почве, роль растительности, и особенно — глубины распространения корней в почвенном профиле.

В работах [2–5] приводятся многочисленные примеры расхождений между влажностью почв под различной растительностью и на парующих участках. В целом показано, что в летний период содержание влаги в почве уменьшается с увеличением количества корней. Наименьшие запасы влаги в верхнем метровом слое характерны для черноземов под целинной степной растительностью с многоярусной корневой системой, черноземы под сельскохозяйственными культурами с одноярусной корневой системой обладают средними запасами влаги, и наиболее влажными оказываются черноземы под черным паром, в профиле которых корневое водопотребление отсутствует. Наши данные подтверждают эту закономерность. В табл. 1 приведены результаты измерений влажности черноземов 16–17 июля 2013 г. на участке “Ямская степь” заповедника “Белогорье” (Белгородская область, 37°39′ E, 51°11′ N) и на примыкающей к заповедному участку пашне, которая в течение вегетационного сезона 2013 г. находилась под черным паром. Расстояние между разрезами под косимой заповедной степью и парующей пашней составляло 10–12 м; оба разреза были расположены в одинаковых литолого-геоморфологических условиях. В 2013 г. май и июнь были дождливыми: по данным ближайшей к Ямской степи станции “Богородицкое–Фенино”, в мае выпало 158.6 мм осадков, в июне — 198.1 мм [9]. В первой половине июля количество осадков было близко к многолетней норме: сумма осадков с 1 по 15 июля составила 42.8 мм [9], и, по-видимому, расходование ранее накопленной в почвах влаги заведомо превосходило ее поступление с осадками. В этих условиях влажность почвы под косимой степью была существенно меньше влажности почвы под черным паром на всех исследованных глубинах.

Таким образом, прямые измерения влажности черноземов различного гранулометрического со-

става под целинной растительностью, различными культурами и черным паром позволили установить общие закономерности водного режима черноземов, рассмотренные выше. К сожалению, организовать подробные режимные наблюдения за динамикой влажности почв на интересующих нас экспериментальных участках Воронежской опытной станции не представляется возможным в первую очередь в силу нежелательности неизбежного воздействия на объект исследований при многократном отборе образцов в течение вегетационного сезона. Поэтому мы решили использовать метод имитационного математического моделирования, позволяющий восстанавливать водный режим почв по данным об их физических свойствах, уровне грунтовых вод, наличии или отсутствии растительности на поверхности почв и динамике погодных условий [18, 19].

Несомненным преимуществом метода имитационного моделирования является получение расчетных оценок влажности почв и интенсивности вертикальных потоков влаги практически для любой точки почвенного профиля и любого момента времени на протяжении всего расчетного периода. Возможность непрерывно отслеживать во времени динамический отклик водного режима почв на изменения погодных условий, в том числе на ливни и засухи, позволяет анализировать действие различных факторов и в значительной мере компенсировать неточность расчетной оценки влажности почвы.

Насколько сильно будут проявляться эффекты роста влажности и увеличения восходящих потоков в профиле почвы под черным паром зависит от гидрологических свойств почвы и погодных условий, в первую очередь от режима выпадения осадков. Поэтому была поставлена задача смоделировать водный режим почв на двух участках, используя входные данные по почвенным свойствам и метеорологическим условиям Воронежской опытной станции. Первые расчетные оценки расхождений в гидрологических режимах почв под черным паром и под монокультурой кукурузы были получены для сценарных погодных условий [1]. В модели использовались среднесезонные климатические данные. Расчеты проводили для восьми сценариев выпадения осадков, включавших четыре варианта по количеству выпадающих осадков (полноремы, норма, две и три нормы) и два варианта распределения этих осадков во времени (выпадение всей месячной суммы за первые два дня месяца либо равномерное распределение месячной суммы между первым, одиннадцатым и двадцать первым днями месяца). Расчетные эксперименты с помощью свободного программного продукта HYDRUS-1D [18] показали, что сценарные гидрологические режимы на двух участках существенно различались: под кукурузой почва была в целом более сухой, и

восходящие потоки влаги во время периодов иссушения были существенно меньше [1].

Однако использованные сценарии имитировали заведомо искусственный и слишком равномерный режим погоды: в течение всех пяти расчетных месяцев количество выпадающих осадков было одинаковым образом либо увеличено, либо уменьшено по сравнению с многолетней нормой. Кроме того, распределение осадков внутри каждого месяца было однотипным для всего вегетационного сезона в каждом сценарии. Поэтому следующим нашим шагом стало моделирование гидрологического режима почв на двух участках с использованием срочных метеоданных для двух контрастных по обеспеченности осадками вегетационных сезонов. Целью работы было сопоставление расчетных гидрологических режимов агрочерноземов под черным паром и под кукурузой при естественном чередовании периодов увлажнения и иссушения.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Гидрологический режим агрочерноземов моделировали с помощью программного пакета HYDRUS-1D [18], имитируя условия опытных делянок Воронежской опытной станции (Хохольский район Воронежской области, 38°58' E, 51°36' N). Описание площадок, физические и гидрологические свойства почв, основные уравнения, алгоритм расчетов потенциального испарения и потенциальной транспирации приведены в работе [1].

Расчеты проводили для вегетационных сезонов 2013 и 2014 гг. При моделировании использовали срочные данные о количестве осадков, температуре воздуха и парциальном давлении водяного пара на высоте 2 м, скорости ветра на высоте 10 м по ближайшей к опытному полю метеостанции "Воронеж, агро" за 2013 и 2014 гг. [9], а также среднесезонные величины радиационного баланса по актинометрической станции "Нижнедевицк" [8]. Моделирование проводили для периода с мая по сентябрь с шагом 1 сут, осредняя срочные данные по температуре воздуха, парциальному давлению водяного пара и скорости ветра и суммируя поступившие за сутки осадки. Суточный интегральный поток тепла в почву полагали равным нулю в соответствии с рекомендациями ФАО [13]. Потенциальную эвапотранспирацию рассчитывали методом эталонной культуры [13]. Для участка под кукурузой потенциальную эвапотранспирацию разделяли на потенциальную транспирацию растений и потенциальное испарение с поверхности почвы, учитывая, что при отсутствии дефицита влаги доля испарения в общей эвапотранспирации засеянного кукурузой участка составляет 90% в мае, 65% в июне и 25% в июле–сентябре [16]. На нижней границе задавали условие свободного дре-

Таблица 2. Суммы осадков за месяц и среднемесячная температура воздуха для метеостанции “Воронеж, агро”

Год	Осадки, мм					Температура воздуха, °С				
	май	июнь	июль	август	сентябрь	май	июнь	июль	август	сентябрь
Среднеголетние	51	58	71	59	45	14.6	17.9	19.9	18.6	13.0
2013	41.4	29.5	84.2	86.7	185.3	19.6	21.5	20.0	20.4	11.6
2014	42.3	98.6	2	47.7	4.8	18.6	17.9	22.3	21.8	14.4

нажа. Начальное распределение влажности в почвенном профиле задавали в соответствии со среднеголетними данными о послойных запасах влаги в агрочерноземах весной [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вегетационные сезоны 2013 и 2014 гг. были в целом несколько теплее климатической нормы. В 2013 г. май и июнь были на 4–5°С теплее многолетней нормы; показатели для июля, августа и сентября отклонялись от нормы не более чем на 2°С. В 2014 г. июнь и сентябрь были близки к норме; май, июль и август были теплее среднего на 2–4°С (табл. 2).

Сумма осадков за май–сентябрь была равна 427 мм в 2013 г. и 195 мм в 2014 г. при среднеголетней сумме осадков за эти месяцы 284 мм. Распределение осадков в течение двух вегетационных сезонов тоже различалось. В 2013 г. сумма осадков в мае была на 19% меньше среднеголетней, в июне – почти в два раза меньше среднеголетней, а июль, август и сентябрь были на 19, 47 и 211% влажнее климатической нормы. В 2014 г. сумма осадков в мае составила 83% от мно-

голетней нормы, в июне – 170% от нормы. Затем наступил экстремально сухой июль, в течение которого выпало лишь 2 мм осадков. Сумма осадков за август составила 81% от нормы; сентябрь тоже был экстремально сухим с количеством осадков менее 5 мм.

Суммарная потенциальная эвапотранспирация эталонной культуры за май–сентябрь, рассчитанная методом ФАО56 [13], составила 456 мм в 2013 г. и 481 мм в 2014 г. (табл. 3). Реальная эвапотранспирация, рассчитанная с учетом влажности почвы, была существенно меньше. И в 2013, и 2014 гг. рассчитанное актуальное испарение с поверхности почвы под черным паром было существенно больше, чем актуальное испарение с поверхности почвы под кукурузой. Суммы актуальных потоков через поверхность почвы за май–сентябрь под черным паром были отрицательными (направленными вниз) во влажном 2013 г. и положительными (направленными вверх) в сухом 2014 г. Суммы актуальных потоков через поверхность почвы за май–сентябрь под кукурузой были отрицательными и в 2013 г., и в 2014 г. (рис. 1).

Однако разница между поступившей с осадками и физически испарившейся влагой на кукурузном поле с избытком компенсировалась транспирацией растений, которая в июле 2014 г. достигала почти 4.5 мм/сут. Суммарное корневое водопотребление за май–сентябрь составило 26 см в 2013 г. и почти 23 см в 2014 г., или около 61% от осадков во влажный год и около 117% от осадков в сухой год. В результате полученная при моделировании влажность почвы под кукурузой оказалась меньше, чем под черным паром.

На рис. 2 представлена сезонная динамика среднесуточной температуры воздуха, суточных сумм осадков и рассчитанной влажности почвы в слое 0–2 м под черным паром и под кукурузой в 2013 и 2014 гг. Начиная с июня влажность почвы под кукурузой была стабильно ниже, чем под черным паром, почти во всем профиле.

Рассмотрим влажность почвы в верхнем слое 0–70 см, который не содержит карбонатов ни на участке под монокультурой кукурузы, ни под бесшменным черным паром. В этом слое влажность почвы существенно менялась в течение расчетного периода, особенно сильно увеличиваясь после обильных осадков в сентябре 2013 г. К концу сен-

Таблица 3. Суммы осадков (P) для метеостанции “Воронеж, агро”, оценка суммарной потенциальной эвапотранспирации эталонной культуры методом ФАО56 (ET_0), полученные с помощью модели HYDRUS-1D оценки сумм для актуального испарения с поверхности почвы под черным паром (E_s) и кукурузой (E_{sc}), актуального потока через поверхность почвы под черным паром (F_s) и кукурузой (F_{sc}), актуальной транспирации на участке под кукурузой (T_c) за май–сентябрь 2013 и 2014 гг.

Потоки	Суммы за май–сентябрь, мм	
	2013	2014
P	427	195
ET_0	456	481
E_s	318	258
E_{sc}	135	142
F_s	–120	61
F_{sc}	–290	–53
T_c	260	228

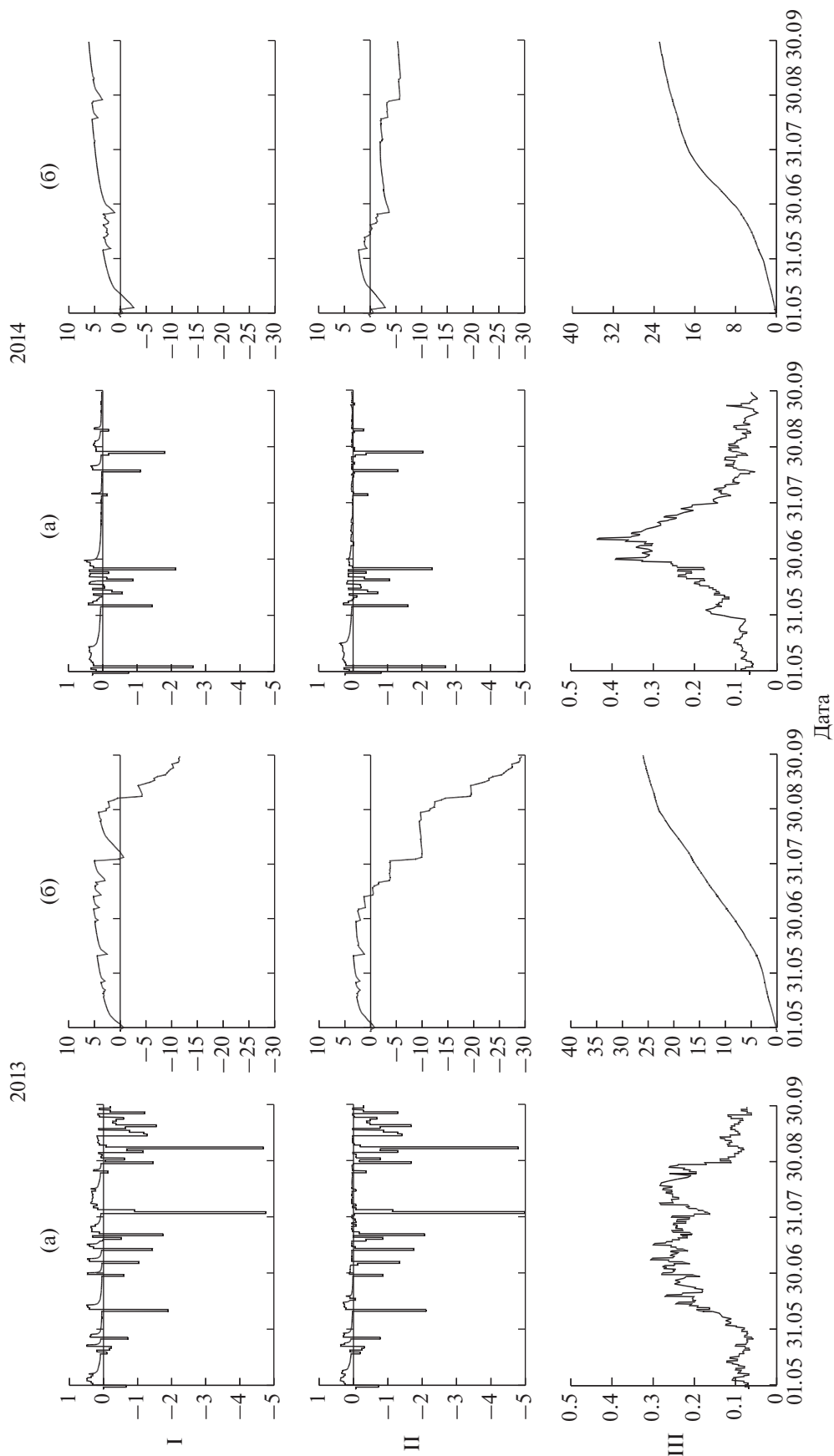


Рис. 1. Полученная при моделировании динамика потоков влаги через поверхность почвы, см/сут, под черным паром (Iа) и под кукурузой (IIа), динамика корневого водопотребления, см/сут, (IIIа), нарастающие суммы этих потоков, см, (I–III б), для мая–сентября 2013 и 2014 гг.

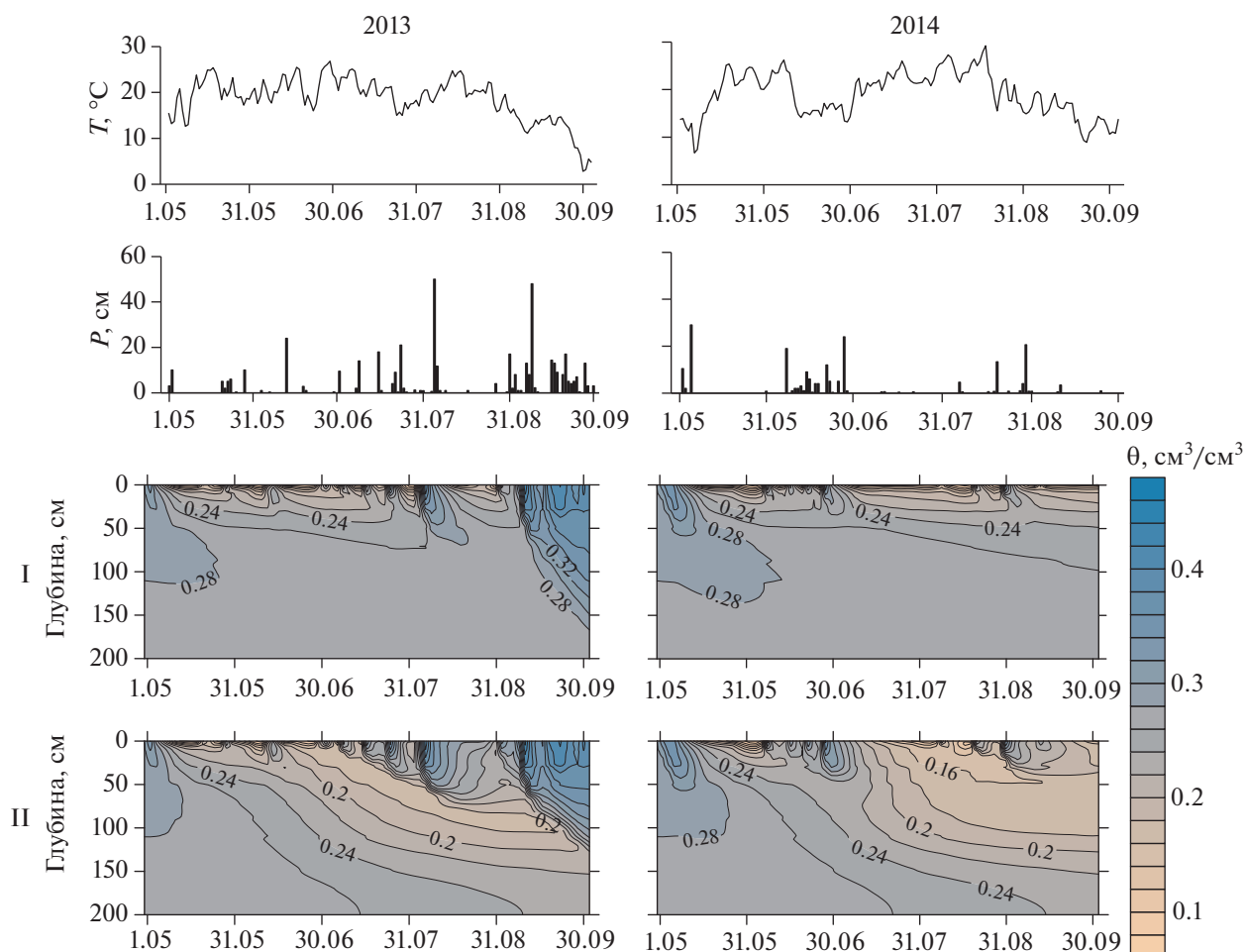


Рис. 2. Среднесуточная температура воздуха (T), суточные суммы осадков (P) и рассчитанная влажность почвы (θ) под черным паром (I) и под кукурузой (II) в течение мая–сентября 2013 и 2014 гг.

тября до влажности $0.34 \text{ см}^3/\text{см}^3$, соответствующей наименьшей влагоемкости (НВ) чернозема на делянке под монокультурой кукурузы [6], под кукурузой промачивался слой 0–75 см, под многолетним паром – слой 0–110 см. В течение летних месяцев 2013 г. влажность почвы в слое 0–70 см на разных глубинах менялась от 0.10 до $0.27 \text{ см}^3/\text{см}^3$ под паром и от 0.08 до $0.26 \text{ см}^3/\text{см}^3$ под кукурузой. В 2014 г. соответствующие диапазоны влажности составили 0.08 – 0.28 и 0.08 – $0.27 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Таким образом, влажность почвы в слое 0–70 см на обеих делянках практически никогда в течение лета не превышала влажности разрыва капиллярной связи (ВРК), которая для исследованных почв меняется от $0.25 \text{ см}^3/\text{см}^3$ в слое 0–30 см до $0.27 \text{ см}^3/\text{см}^3$ в слое 50–100 см [6]. Это значит, что влага в почве была малоподвижной и либо весьма труднодоступной для растений, либо в целом труднодоступной по классификации Роде [10]. При формально сходных диапазонах изменения влажности на двух участках сезонное иссушение профиля было более ярко выражено в почве под кукурузой и захва-

тивало более мощный слой. Например, в августе 2014 г. полученная при расчетах влажность почвы под кукурузой во всем слое 0–70 см не превышала влажности завядания (ВЗ), которая составляет от 0.16 до $0.19 \text{ см}^3/\text{см}^3$ [6], а под паром влажность почвы на глубинах 50–70 см стабильно держалась на уровне ВРК. Запас влаги в слое 0–70 см к концу августа 2013 г. составлял 9.3 см под паром и 8.6 см под кукурузой, к концу августа 2014 г. – 8.8 см под паром и лишь 7.1 см под кукурузой.

В контексте поставленной задачи для нас более интересен слой 70–140 см, в котором под монокультурой кукурузы карбонаты отсутствуют, а под бессменным черным паром содержание углерода карбонатов достигает около 120 т/га [15]. В слое 70–140 см полученная при моделировании влажность почвы под черным паром была стабильной, не ниже $0.26 \text{ см}^3/\text{см}^3$, приближаясь к ВРК, при которой подвижность почвенной влаги скачкообразно меняется. Под кукурузой влажность почвы в слое 70–100 см к началу августа снижалась до $0.17 \text{ см}^3/\text{см}^3$, что соответствует ВЗ.

Таким образом, под кукурузой влажность почвы в процессе летнего иссушения опускалась до нижней границы интервала ВЗ–ВРК, а под паром – стабильно почти достигала верхней границы этого интервала.

Наиболее сухие слои с наименьшей влагопроводностью почвы формировались на глубинах 70–120 см. Наибольшие расхождения во влажности почвы между участками наблюдались в конце вегетационных сезонов после длительных периодов без осадков. К концу августа 2013 г. наибольшая разница во влажности почв между участками была получена для глубины 92 см и составила $0.10 \text{ см}^3/\text{см}^3$; к концу сентября 2014 г. – для глубины 82 см и составила $0.09 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Этим расхождениям во влажности соответствовали значительные, более чем на два порядка, расхождения в коэффициентах влагопроводности почвы на двух участках. В конце сентября 2014 г. на глубине 82 см коэффициент влагопроводности был равен $2.7 \times 10^{-3} \text{ см/сут}$ под черным паром и лишь $9.8 \times 10^{-6} \text{ см/сут}$ под кукурузой. Полученные расхождения в коэффициентах влагопроводности отвечают за большую интенсивность конвективного переноса карбонатов с восходящими потоками влаги под черным паром. Кроме того, можно предположить, что и диффузионный перенос карбонатов является более интенсивным в более влажной почве, то есть в почве под черным паром.

Полученные при моделировании отрицательные (направленные вниз) потоки влаги после выпадения осадков были чуть больше в почве под кукурузой, скорее всего из-за меньшего испарения с поверхности почвы. Положительные (направленные вверх) потоки в почве под черным паром существенно превосходили соответствующие потоки под кукурузой и были получены для более мощного слоя почвы. Уменьшение восходящих потоков влаги под кукурузой объясняется перехватом корнями растений поступившей с осадками воды, которая возвращается обратно в атмосферу преимущественно через корневую систему, а не по почвенным порам. В почве под черным паром влага движется исключительно через почву; в итоге восходящие потоки влаги превосходят аналогичные потоки под кукурузой. Например, в конце сухого июля 2014 г. полученные при моделировании восходящие потоки влаги на глубине 50 см составили 0.58 см/мес. под черным паром и лишь 0.01 см/мес. под кукурузой. Эти результаты также подтверждают представления о том, что расхождения в гидрологии почв на двух участках благоприятствуют подъему карбонатов в профиле под черным паром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование с использованием срочных метеоданных подтвердило, что под “вечным” черным паром и под кукурузой гидрологический режим исследованных черноземов существенно различается. При одинаковых погодных условиях влажность почвы и коэффициент влагопроводности почвы под паром увеличиваются по сравнению с участком под кукурузой. При естественном чередовании периодов увлажнения и иссушения наибольшие расхождения в гидрологических режимах почв под черным паром и под кукурузой наблюдаются после длительных периодов без осадков. Можно предположить, что именно длительные периоды без осадков играют ключевую роль в более существенном подъеме карбонатов в почвенном профиле на участке под черным паром.

Благодарность. Авторы выражают признательность РФФИ (проекты № 16-05-00669 и 16-04-01851) за поддержку работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская Т.А., Хохлова О.С., Мяскина Т.Н.* Математическое моделирование потоков влаги в агрочерноземах при различных режимах использования // Почвоведение. 2016. № 7. С. 837–847. doi 10.7868/S0032180X16070029
2. *Афанасьева Е.А.* Водно-солевой режим обыкновенных и южных черноземов юго-востока европейской части СССР. М.: Наука, 1980. 217 с.
3. *Афанасьева Е.А.* Солевой профиль черноземов и пути его формирования // Черноземы СССР. М.: Колос, 1974. Т. 1. С. 145–156.
4. *Большаков А.Ф.* Водный режим мощных черноземов Средне-Русской возвышенности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 200 с.
5. *Кокovina Т.П.* Водный режим мощных черноземов и влагообеспеченность на них сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1974. 302 с.
6. *Королев В.А.* Современное физическое состояние черноземов центра Русской равнины. Воронеж, 2008. 313 с.
7. *Лебедева И.И.* Гидрологические профили миграционно-карбонатных (типичных) черноземов и агрочерноземов // Почвоведение. 2002. № 10. С. 1214–1233.
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 28. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 365 с.
9. Расписание погоды. <https://tr5.ru>.
10. *Роде А.А.* Категории и формы почвенной влаги и водные свойства почв // Докл. VI Междунар. конгресса почвоведов. Первая комиссия. Физика почв. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 55–68.
11. *Стулин А.Ф.* Влияние длительного применения удобрений в бессменном посеве кукурузы на ее продуктивность и вынос элементов питания на черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2007. № 1. С. 25–30.

12. Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
13. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper № 56. 1998. 307 p.
14. Jury W.A., Horton R. Soil Physics. 6th ed. John Wiley & Sons, 2004. 370 p.
15. 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. Maren Oelbermann. Wageningen Academic Publishers, 2014. Ch. 2. P. 33–52.
16. 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. V. 111. P. 109–120.
17. Pingitore N.E. The role of diffusion during carbonate diagenesis // J. Sedimentary Res. 1982. V. 52. № 1. P. 27–39. doi 10.1306/212F7ECD-2B24-11D7-8648000102C1865D
18. 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. Department of environmental sciences, University of California. Riverside, 2013. 341 p.
19. Van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sc. Soc. Am. J. 1980. V. 44. P. 892–898.
20. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Ya. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes // Earth-Science Reviews. 2016. V. 157. P. 1–17.

Modeling Water Regime of Arable Chernozems under Bare Fallow and under Corn for Two Growing Seasons with Contrasting Precipitation

T. A. Arkhangel'skaya^{a, *} and O. S. Khokhlova^b

^aLomonosov Moscow State University, Leninskie gory, Moscow, 119991 Russia

^bInstitute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
ul. Institut'skaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142292 Russia

*e-mail: arhangel'skaia@gmail.com

Water regime of arable chernozems was modeled for two plots at the Voronezh Experimental Station. The first plot is under continuous corn monoculture since 1966. The second plot is under permanent bare fallow since the same time. The free HYDRUS-1D software was used. Evaporation from bare soil surface and evapotranspiration from the plot under corn were estimated using the FAO56 method. Simulations were performed for the 2013 and 2014 growing seasons with contrasting precipitation. Precipitation sum in May–September 2013 was 427 mm, and it was only 195 mm in May–September 2014, whereas the long-term average precipitation sum from May 1 to September 30 is equal to 284 mm. The monthly precipitation in July 2014 was only 2 mm. During both growing seasons, the simulated water regimes at the two plots were different. In the layer of 70–140 cm, the soil water content was no less than 0.25 cm³/cm³ under bare fallow and decreased to less than 0.17 cm³/cm³ under corn. The driest layers were formed under corn at the depths from 70 to 120 cm. At the plot under bare fallow, the cumulative evaporation from the soil surface from May 1 to September 30 in 2014 was higher than the precipitation sum for the same period. At the plot under corn, the cumulative evaporation was less than the precipitation sum, and the lower soil water content at this plot is explained by root water uptake with the cumulative value of 23 cm for the period from May 1 to September 30.

Keywords: soil hydrology, root water uptake, mathematical modeling, FAO56, HYDRUS-1D