

5. Охлопков И.А. Анализ состояния посевов на опытных полях РГАУ-МСХА на основе данных спутникового зондирования / И. А. Охлопков, А. А. Быстров, Ю. А. Спиринов, И. А. Кузнецов // Аграрная наука - 2022: материалы Всероссийской конференции молодых исследователей, Москва, 22–24 ноября 2022 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 1522-1525.;

6. Перевертин К.А. Влияние режима снежного покрова на агрономические риски развития розовой снежной плесени / К. А. Перевертин, А. И. Белолубцев, Е. А. Дронова, И. Ф. Асауляк, И.А. Кузнецов, М.А. Мазиров, Т.А. Васильев // Лёд и снег. – 2022. – Т. 62, № 1. – С. 75-80.;

7. Сенников В.А., Ларин Л.Г., Белолубцев А.И., Коровина Л.Н. Агрометеорология: метод. указания / В.А. Сенников, Л.Г. Ларин, А.И. Белолубцев, Л.Н. Коровина. Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. 23 с.;

УДК 551.579.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ВЕРХНЕМ ГРАНИЧНОМ УСЛОВИИ С ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Кожунов Андрей Викторович, аспирант кафедры метеорологии и климатологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, avkozhinov@mail.ru

Кокорева Анна Александровна, ведущий научный сотрудник факультета почвоведения ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, к.б.н., kokoreva.a@gmail.com

***Аннотация:** Проведен анализ степени и характера влияния выбранных нижних граничных условий в профиле почвы, а также полной влагоёмкости дерново-подзолистой связнопесчаной почвы (Тверская область, пос. Эммаусс), входящей в уравнение ван Генухтена – Муалема, на модельную объёмную влажность почвы, рассчитанную по модели HYDRUS-1D.*

***Ключевые слова:** модель ОГХ ван Генухтена – Муалема, HYDRUS-1D, подотрансферные функции, полная влагоёмкость.*

Объектом исследования является дерново-подзолистая почва с повышенным содержанием песчаной фракции, расположенная в зоне избыточного увлажнения, в южной части агроэкологического полигона Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель в пос. Эммаусс Тверской области [1]. В точке исследования была установлена автоматическая метеорологическая станция ATMOS 41 и датчики влажности почвы TEROS 12 на глубинах 10, 20, 40, 60 и 90 см. Предметом исследования является величина и характер расхождения объёмной влажности почвы, рассчитанной по прогнозной модели HYDRUS-1D при различных

условиях на нижней границе профиля почвы и различных величинах полной влагоёмкости, с фактической объёмной влажностью почвы, измеренной на вышеуказанных глубинах датчиками влажности почвы. Период моделирования составлял 76 суток: с 23 июля по 6 октября 2022 года.

Модель HYDRUS-1D является прогнозной физически обоснованной моделью, которая служит для численного моделирования переноса воды, тепла и растворённых веществ в многофазных переменнo насыщенных пористых средах [2, 3].

Расчёт полной влагоёмкости, входящей в уравнение ван Генухтена – Муалема, производился с помощью педотрансферных функций (ПТФ) в программе RETC, встроенной в модель HYDRUS-1D. Программа RETC использует регрессионные зависимости и базу данных для ПТФ Rosetta Lite v. 1.1. [2, 4, 5, 6].

Нами было задано процентное содержание трёх гранулометрических фракций в каждом из 11 слоёв почвы толщиной 10 см. Для этого нами была выбрана ближайшая к месту установки метеостанции и датчиков влажности почвы точка (точка 1 в самой южной части полигона ВНИИМЗ), в которой были отобраны образцы почвы из 11 слоёв почвенного профиля через каждые 10 см, у которых был определён гранулометрический состав ситовым методом и методом лазерной дифракции [1].

HYDRUS-1D рассчитывает значения параметров основной гидрофизической характеристики (ОГХ) по модели ван Генухтена – Муалема:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + (\alpha P_{k-c})^n)^m}, P_{k-c} < 0, m = 1 - 1/n \quad (1)$$

где P_{k-c} – капиллярно-сорбционное давление почвенной влаги, кПа или гПа;

θ_s – максимальная объёмная влажность почвы, m^3/m^3 . Близка к полной влагоёмкости почвы;

θ_r – минимальная объёмная влажность почвы (остаточная влажность), которая соответствует влажности точки перегиба в сорбционной области, m^3/m^3 ;

α – величина, обратная капиллярно-сорбционному давлению, близкому к давлению входа воздуха, $1/kPa$ или $1/gPa$;

n – крутизна кривой аппроксимации ОГХ. Данный параметр характеризует распределение пор по размерам [7].

При параметризации и калибровке модели HYDRUS-1D проводилась оценка модельной послойной влажности почвы на глубинах 10, 20, 40, 60 и 90 см путём сравнения с послойной влажностью почвы, измеренной датчиками, с целью выяснения степени и характера влияния выбранных нижних граничных условий и полной влагоёмкости почвы на перенос влаги в исследуемой почве. Модельная влажность почвы оценивалась опосредованно, на основе рассчитанных статистических коэффициентов – среднеквадратической ошибки (RMSE) и коэффициента остаточной массы (CRM), которые отражают величину и характер расхождения между рассчитанной по модели и фактической объёмной влажностью почвы:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

где P_i – модельные значения искомого параметра (объёмной влажности почвы, $\text{м}^3/\text{м}^3$);

O_i – фактические значения искомого параметра (влажности почвы, $\text{м}^3/\text{м}^3$);

n – количество измеренных значений (равное 76 по числу суток моделирования).

Оптимальные значения коэффициентов RMSE и CRM равны нулю. При положительных значениях CRM модель занижает (недооценивает) фактическую объёмную влажность почвы [8]. При отрицательных значениях CRM – завышает (переоценивает).

Из метеорологических параметров, измеренных метеостанцией ATMOS 41, в модель вводились суточное количество осадков (в см/сут), суммарная солнечная радиация за каждые сутки ($\text{МДж}/(\text{м}^2 \times \text{сут})$), максимальная и минимальная температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$), относительная влажность воздуха (%), среднесуточная скорость ветра на высоте её измерения (2 м) в км/сут [9]. Единицы измерения метеопараметров, измеряемых автоматической метеостанцией, отличаются от единиц измерения, заданных программой HYDRUS-1D. Поэтому измеренные значения метеопараметров были пересчитаны на требуемые программой HYDRUS-1D единицы измерения.

В качестве верхнего граничного условия в модели HYDRUS-1D нами было выбрано «Атмосферное граничное условие с поверхностным слоем». Данное условие предполагает, что вода скапливается на поверхности почвы. Высота поверхностного слоя воды возрастает вследствие выпадения осадков и уменьшается вследствие инфильтрации и испарения. [9]. В качестве нижнего граничного условия (НГУ) сначала был выбран свободный дренаж.

По результатам расчёта с исходными параметрами модели были получены значения среднеквадратической ошибки влажности почвы и коэффициента остаточной массы. Значения RMSE оказались равны: на глубине 10 см – 14,68; на глубине 20 см – 17,77; на глубине 40 см – 16,43; на глубине 60 см – 15,00; на глубине 90 см – 6,83. Значения CRM на тех же глубинах: -1,03; -1,85; -2,17; -1,98 и 0,23 соответственно.

Из этих данных следует, что модельная объёмная влажность почвы наиболее близка к фактической влажности на глубине 90 см, поскольку коэффициент RMSE для влажности почвы на данной глубине наименьший. Расхождение между модельной и фактической влажностями почвы последовательно возрастает на глубинах 10 см, 60 см, 40 см и достигает максимума на глубине 20 см, поскольку коэффициент RMSE на этой глубине наибольший.

Что касается характера влияния выбранных граничных условий и рассчитанной с помощью ПТФ полной влагоёмкости почвы на модельную влажность почвы за 76-дневный период моделирования, то на глубинах 10, 20, 40 и 60 см модель завышает влажность почвы по сравнению с фактической

влажностью, поскольку коэффициент CRM отрицательный, а на глубине 90 см – занижает влажность почвы в сравнении с фактической влажностью, поскольку CRM для данной глубины положительный.

Полученные значения RMSE и CRM свидетельствуют об исключительно большой ошибке прогноза влажности почвы, что вызывает сомнения в правильности использования ПТФ для задания параметров ОГХ в прогнозных моделях. Тем не менее, ПТФ иногда остаются единственной альтернативой лабораторным исследованиям свойств почвы, по причине трудоёмкости проведения последних.

Далее проводилось изменение полной влагоёмкости почвы (параметра θ_s) и нижнего граничного условия (верхнее граничное условие оставалось постоянным), после чего оценивались величины RMSE и CRM. Значения полученных статистических коэффициентов приведены в таблице 1.

В ходе параметризации и калибровки модели переноса влаги в почве были выяснены степень и характер влияния нижних граничных условий и полной влагоёмкости дерново-подзолистой связнопесчаной почвы на модельную объёмную влажность на глубинах 10, 20, 40, 60 и 90 см. По результатам сравнения полученных коэффициентов были сделаны следующие выводы:

1. Из выбранных граничных условий при полной влагоёмкости почвы, рассчитанной по педотрансферным функциям, наиболее сильное влияние на перенос влаги и распределение объёмной влажности в дерново-подзолистой связнопесчаной почве оказывает условие переменного напора. Другие нижние граничные условия существенно влияют на влагоперенос только на глубинах 60 см и 90 см.

2. Полная влагоёмкость почвы сильно влияет на перенос влаги в почве и на распределение объёмной влажности почвы по глубинам.

3. При условии наличия поверхности просачивания изменение величины потока влаги через данную поверхность (параметр h) на несколько порядков никак не влияет на рассчитанные значения коэффициентов RMSE и CRM, а значит не влияет на перенос влаги в почве и распределение влажности почвы на глубинах в почвенном профиле.

Таблица 1

Среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент остаточной массы (CRM) на глубинах установки датчиков влажности почвы при различных условиях на нижней границе профиля почвы и различной полной влагоёмкости почвы θ_s . На верхней границе почвенного профиля установлено атмосферное граничное условие с поверхностным слоем

НГУ и полная влагоёмкость почвы	RMSE					CRM				
	10 см	20 см	40 см	60 см	90 см	10 см	20 см	40 см	60 см	90 см
Свободный дренаж, θ_s посчитана по ПТФ ($\approx 0,4$) во всех 11 слоях почвы (исходные параметры)	14,68	17,77	16,43	15,00	6,83	-1,03	-1,85	-2,17	-1,98	0,23
Свободный дренаж, $\theta_s = 0,6$ во всех слоях профиля почвы	20,28	22,64	19,95	15,08	8,21	-1,45	-2,36	-2,59	-1,98	0,29
Свободный дренаж, $\theta_s = 0,5$ во всех слоях профиля почвы	17,88	20,72	18,72	15,95	7,39	-1,28	-2,17	-2,45	-2,09	0,25
Свободный дренаж, $\theta_s = 0,3$ во всех слоях профиля почвы	9,63	12,81	11,96	11,72	9,42	-0,61	-1,28	-1,58	-1,56	0,33
Поверхность просачивания: $h=0$; θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,90	17,93	16,74	16,12	5,86	-1,05	-1,87	-2,21	-2,12	0,15
Поверхность просачивания: $h=100$; θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,90	17,93	16,74	16,12	5,86	-1,05	-1,87	-2,21	-2,12	0,15
Поверхность просачивания: $h=1000$; θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,90	17,93	16,74	16,12	5,86	-1,05	-1,87	-2,21	-2,12	0,15
Поверхность просачивания: $h=10000$; θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,90	17,93	16,74	16,12	5,86	-1,05	-1,87	-2,21	-2,12	0,15
Глубокий дренаж*, θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,70	17,71	16,35	14,76	7,48	-1,03	-1,84	-2,16	-1,95	0,25
Переменный напор, θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	18,52	21,85	21,64	24,11	8,69	-1,29	-2,26	-2,86	-3,72	-0,31
Переменный поток, θ_s определена по ПТФ во всех слоях профиля почвы	14,90	17,93	16,74	16,12	5,86	-1,05	-1,87	-2,21	-2,12	0,15

*Параметры функции глубокого дренажа: $A = -0,3$ см/сут; $B = -0,0035$ 1/см (заданы по умолчанию); исходная глубина залегания грунтовых вод: 284,6 см (задана по экспериментальным данным).

Библиографический список

1. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) / Е.В. Шеин [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – М., 2022. – Вып. 110. – С. 5–21.
2. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв / А.В. Смагин. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 544 с.
3. Шеин Е.В. Математическое моделирование в почвоведении: Учебник / Е.В. Шеин, И.М. Рыжова. – М.: «ИП Макарушев А.Б.», 2016. – 377 с.
4. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края / А.Г. Болотов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – №2 (124). – С. 31–35.
5. Болотов А.Г. Гидротермическое состояние почв юго-востока Западной Сибири : дис. ... докт. биол. наук / Болотов Андрей Геннадьевич. – М: МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, 2017. – 351 с.
6. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края / А.Г. Болотов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 9 (119). – С. 36–41.
7. Шеин Е.В. Курс физики почв: учебник / Е.В. Шеин. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
8. Modelling water and pesticide transport in soil with MACRO 5.2: calibration with lysimetric data / V.N. Kolupaeva, A.A. Kokoreva, A.A. Belik, A.G. Bolotov, A.P. Glinushkin // Agriculture. – 2022. – Vol. 12(4). – P. 505–530.
9. Seina M., Simunek J., van Genuchten M. Th. HYDRUS. User Manual. Version 5 // PC-Progress, Prague, Czech Republic. – 2022. – 342 p.

УДК 551.49:627.81

ОЦЕНКА ДОЖДЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ШТОРМОВЫХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ ПАВОДКОВ

Кузнецова Елена Вячеславовна, аспирант кафедры метеорологии и климатологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, helenak98@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены дождевые характеристики, оказывающие влияние на паводки. В результате их оценки построен график зависимостей, который прогнозирует пики паводков, что позволяет выпускать штормовые предупреждения.

Ключевые слова: штормовое предупреждение, паводки, характеристики дождя