

## Процесс изменения влагозапасов на пашне и пастбищах с учетом физического испарения

Ю. И. Васильев<sup>1</sup>, С. Ю. Турко<sup>1</sup>, М. В. Назарова<sup>1</sup>✉, Ю. В. Чернявский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральний научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

✉ E-mail: mn1967@list.ru

**Аннотация.** Цель и задачи. Поставленной задачей исследования является испарительный процесс с открытой почвенной поверхности при разном режиме выпадающих осадков и влагонакопления перед вегетацией растений. **Материалы и методы.** Приводились теоретические выкладки и применялись методы математического моделирования процесса изменения влагозапасов в почвенном слое. В полевых исследованиях учитывалась испаряемость на фоне имеющегося (фактического) растительного экрана (озимой пшеницы). **Результаты исследований.** Разработан алгоритм описания динамики влагозапасов в почве с учетом временного фактора, а точнее посуточного их изменения. Алгоритм построен по принципу последовательной проводки событий. Вся расчетная работа велась в пошаговом автоматическом режиме (посуточно) за весь период вегетации растений. В статье обращается внимание на большую роль в испарительном процессе растительного экрана, особенно его параметров. Выявлено, что определенную роль играет и количество влаги в почвенном слое. При этом показано, что с увеличением влагозапасов в почве испарение в абсолютных величинах во времени увеличивается, а в нормированном виде – уменьшается. Причин, по мнению авторов, две. Одна из них связана с дифференциацией влаги в почве, а другая – с чисто математическими свойствами (поскольку при нормировании испарения знаменатель и числитель дроби изменяются по разным законам). **Научная новизна.** Полученные структуры и алгоритмы позволяют не только определять посуточно влагозапасы в почве на пашне и на пастбищах (с учетом физического испарения), но и при дальнейшей проработке могут стать основой моделирования процессов при разных сценариях изменения климата.

**Ключевые слова:** процесс, испарение, моделирование, опыт, программирование, алгоритм, влагозапасы, почва, окружающая среда.

**Для цитирования:** Васильев Ю. И., Турко С. Ю., Назарова М. В., Чернявский Ю. В. Процесс изменения влагозапасов на пашне и пастбищах с учетом физического испарения // Аграрный вестник Урала. 2019. № 12 (191). С. 2–8. DOI: 10.32417/1997-4868-2019-191-12-2-8.

**Дата поступления статьи:** 02.10.2019.

### Постановка проблемы (Introduction)

Влагозапасы в почве, как показывает опыт, играют очень важную роль в формировании растительности. В то же время само протекание испарительного процесса (а следовательно, и процесса изменения влагозапасов в почве) во многом определяется физическим состоянием почвы и параметрами растительного экрана на ее поверхности. Кроме того, влагозапасы в почве определяются еще и режимом выпадающих осадков, причем не только их количественным составом, но и временем выпадения. В связи с этим законы изменения влагозапасов в функции времени полезно знать, так как не только можно будет судить о текущей урожайности сельскохозяйственных и травянистых культур на пашне и пастбищах в конкретном году, но и это даст возможность строить прогностические модели продуктивности растительности на перспективу при отработке того или иного сценария глобального изменения климата. Конечно, нужно помнить и о том факте, что урожайность растений формируется под воздействием множества факторов, а не только от влияния влагозапасов. Но все же последний показатель является одним из определяющих в аридной зоне. Мате-

матическое описание изменения влагозапасов в почве, несомненно, будет полезно для практического земледелия [1, с. 69; 2, с. 54; 3, с. 507].

### Методология и методы исследования (Methods)

Поставленная задача исследования динамики влагозапасов на пашне и пастбищах нами решается без учета потерь влаги через транспирацию. Иначе говоря, в опытах учитывается только физическое испарение, причем на открытой почве и при наличии растительного экрана на ее поверхности.

Поскольку в натуральных условиях подобную проблему было решать очень сложно, а точнее невозможно, возникла необходимость проведения лабораторных опытов с учетом требований опытного дела и моделирования [4, с. 59; 5, с. 48].

В лабораторных опытах использовались стеклянные сосуды и искусственный, не транспирирующий экран из виниловых трубочек. Были взяты следующие варианты: 1) площадь закрытия испаряющей поверхности 0, 10, 15, 20 и 30 %; 2) высота защитного экрана – 0, 10, 20 и 30 см; 3) доза увлажнения образца – 30, 60 и 90 мл. При этом

использовались сосуды объемом 180 см<sup>3</sup>, наполненные отсортированной почвенной фракцией размером 3–5 мм; 4) экспозиция каждого опыта была 3 часа, при температуре 17–28 °С и относительной влажности воздуха 50–81 %; 5) опыты проводились без участия ветра [6, с. 19].

В полевых исследованиях учитывалась испаряемость на фоне имеющегося (фактического) растительного экрана (озимой пшеницы) [7, с. 55].

### Результаты (Results)

Как показали лабораторные эксперименты, в варианте без растительного экрана потери влаги за указанную экспозицию составили от 12,8 до 23,3 г (таблица 1).

Чтобы убедиться, каким образом изменяются влагопотери в функции влагосодержания в почве при отсутствии экрана, был построен график, приведенный на рис. 1.

Как видим, в этом случае с увеличением влаги в образце количество испарившейся влаги возрастает, но не

линейно. Иначе говоря, скорость испарения становится несколько меньшей. Это, на наш взгляд, происходит по следующей причине. При большей влажности образца в испарительный процесс вовлекается еще и внутрипоровая влага, а это более трудный процесс из-за большей связанности влаги с почвенными агрегатами.

Такое положение дел дало нам основание гипотетически предположить для поверхности без экрана следующую математическую схему моделирования испарительного процесса:

$$\frac{dE}{dW} = \frac{K_1}{(W + B)}, \quad (1)$$

где  $E$  – испаряющаяся влага из почвенного слоя 0–100 см, мм;  $W$  – влага в почве, мм (в том же слое);  $K_1$  – коэффициент, зависящий от условий испарения влаги и свойств почвогрунтового слоя;  $B = 100$  – коэффициент, введенный для избегания разрыва функции при  $W = 0$ .

Таблица 1  
Весовая разница (г) образца до и после эксперимента

Объем жидкости в образце, мл	Площадь закрытия экраном, %	Высота элементов экрана, см		
		10	20	30
30	Контроль (без экрана)	12,8	14,4	17,8
	10	11,2	8,2	12,2
	15	10,2	9,3	10,3
	20	8,4	8,5	10,0
	30	7,0	7,5	8,9
60	Контроль (без экрана)	16,5	20,7	10,7
	10	13,0	13,8	11,3
	15	11,7	12,8	10,6
	20	10,5	8,7	9,1
	30	6,9	10,5	8,7
90	Контроль (без экрана)	23,3	23,3	23,3
	10	12,5	18,5	12,5
	15	10,2	14,6	9,3
	20	10,5	15,1	6,8
	30	7,7	11,3	6,5

Table 1  
Weight difference (g) of the sample before and after the experiment

The volume of fluid in the sample, ml	Screen closing area, %	The height of the screen elements, cm		
		10	20	30
30	Control (no screen)	12.8	14.4	17.8
	10	11.2	8.2	12.2
	15	10.2	9.3	10.3
	20	8.4	8.5	10.0
	30	7.0	7.5	8.9
60	Control (no screen)	16.5	20.7	10.7
	10	13.0	13.8	11.3
	15	11.7	12.8	10.6
	20	10.5	8.7	9.1
	30	6.9	10.5	8.7
90	Control (no screen)	23.3	23.3	23.3
	10	12.5	18.5	12.5
	15	10.2	14.6	9.3
	20	10.5	15.1	6.8
	30	7.7	11.3	6.5

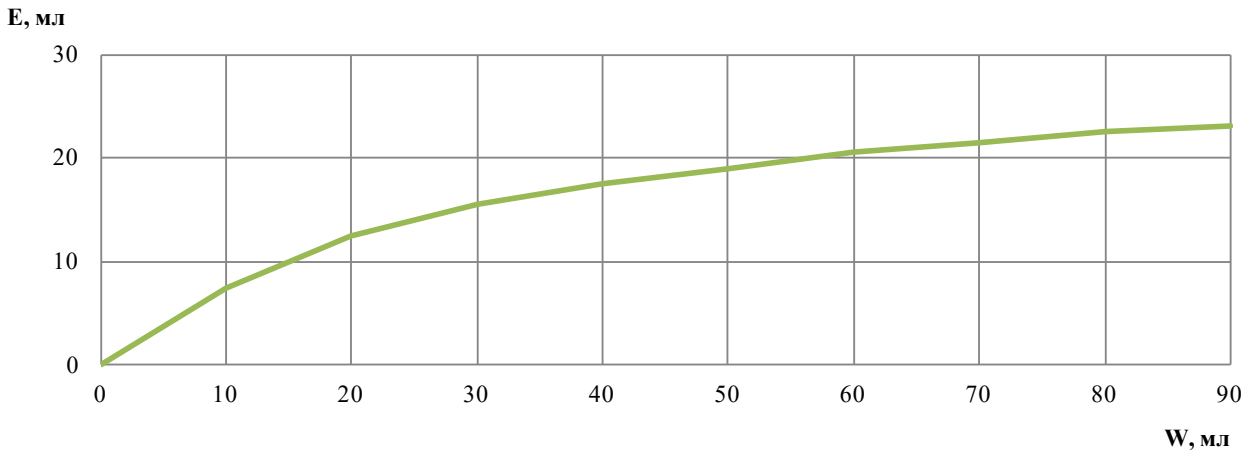


Рис. 1. Связь испарения (E) с содержанием влаги в образце (W) (вариант без экрана)

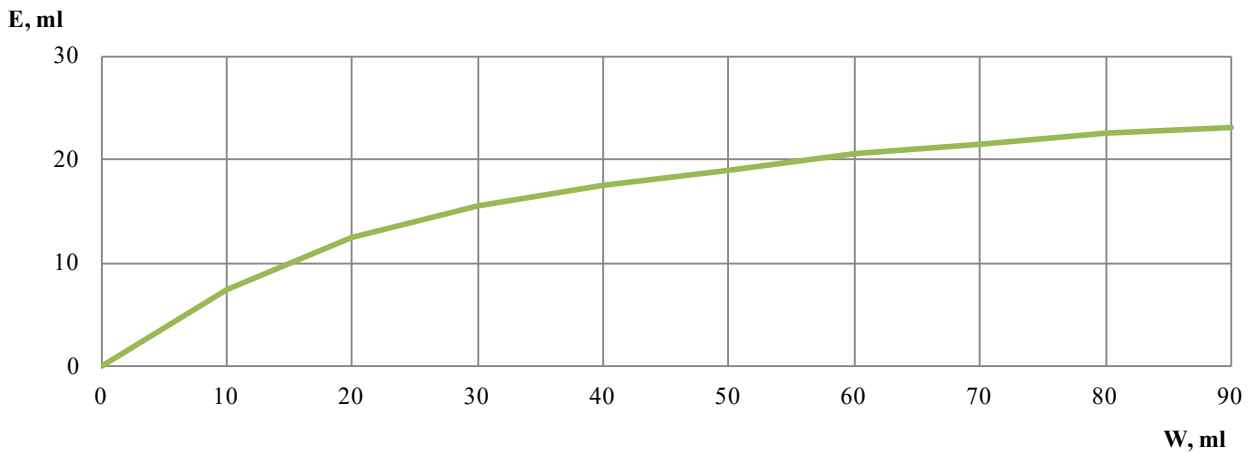


Fig. 1. Connection of evaporation (E) with the moisture content in the sample (W) (version without screen)

Разделяя переменные в уравнении (1) и произведя интегрирование, получаем:

$$E = K_1 \ln(W + B) + C, \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования неопределенного интеграла, находящаяся по граничным условиям.

Используя граничные условия, т. е.  $W = 0, E = 0$ , получаем, что  $C = -K_1 \ln B$ .

Подставляя теперь значение  $C$  в уравнение (2), имеем:

$$E = K_1 \ln\left(\frac{W + B}{B}\right). \quad (3)$$

Очевидно, что остаток влаги в почвенном слое после первых суток при условии отсутствия осадков и гидростатика будет равен:

$$W_1 = W_0 - K_1 \ln\left(\frac{W_0 + B}{B}\right), \quad (4)$$

где  $W_0$  – запасы влаги перед первыми сутками испарительного процесса, мм.

В уравнении (4) неизвестными нужно считать два показателя – коэффициенты  $K_1$  и  $B$ .

Для раскрытия первого коэффициента воспользуемся подходом А. Р. Константинова, согласно которому:

$$K_1 = \frac{0,3d_e \gamma_1 (1 + mv_1)(e_{0,5} - e_{2,0}) KP}{\ln\left(\frac{100}{Z_0}\right)}, \quad (5)$$

где  $m$  – коэффициент влияния на испарительный процесс скорости ветра (введен нами);  $d_e, \gamma_1$  – коэффициенты, зависящие от свойств испаряющей поверхности и температу-

ры на уровне 0,5 и 2,0 м, а также скорости ветра на высоте 1 м;  $KP$  – коэффициент, учитывающий испаряющие свойства почвенного слоя;  $e_{0,5}, e_{2,0}$  – упругость водяного пара на высотах 0,5 и 2,0 м.

При этом значения  $d_e$  могут быть найдены из соотношения:

$$d_e = 1 + 0,72\sqrt{1 - 28(Z_0 - Z_{00})R_i} - 1, \quad (6)$$

где  $Z_0, Z_{00}$  – соответственно параметр фактической шероховатости почвенной поверхности и параметр, равный 1 см;  $R_i$  – число Ричардсона, определяемое с помощью соотношения вида [4]:

$$R_i = \frac{-0,025(T_{0,5} - T_{2,0}) \ln^2(100/Z_0)}{v_1^2}, \quad (7)$$

где  $T_{0,5}, T_{2,0}$  – температура воздуха на высоте, соответственно, 0,5 и 2,0 м;  $Z_0$  – параметр шероховатости испаряющей поверхности;  $v_1$  – скорость ветра на высоте 1 м, м/с.

Что же касается значения  $\gamma_1$  в уравнении (5), то оно находится по формуле:

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - R_i}}. \quad (8)$$

Надо отметить, что коэффициент  $K_1$  в уравнении еще окончательно не раскрыт. Предположительно можно считать, что он зависит еще от нескольких факторов, определяющих испарительный процесс. Неясными являются на сегодняшний день диапазоны изменения коэффициентов  $m$  и  $KP$ . Концептуально они зависят от состояния почвы и ее свойств [8, с. 82; 9, с. 19].

Анализ уравнений (5) и (7) свидетельствует и о том, что при больших градиентах упругости водяного пара в воздухе и больших разностях температур в нем на уровнях 0,5 и 2,0 м значения коэффициента  $K_1$  оказываются большими. То же происходит и с увеличением скорости ветра, повышением шероховатости почвенной поверхности. Нужно отметить и то, что градиент температуры влияет на величину  $K_1$  через число Ричардсона, а влияние скорости ветра осуществляется и через число Ричардсона, и непосредственно через коэффициент  $m$ . Что же касается влияния текущего влагосодержания в почвенном слое на испарительный процесс, то надо сказать, что его влияние идет по логарифмическому закону и всецело зависит от текущего значения  $W_0$  (начальные влагозапасы).

Используя приведенные выше теоретические наработки, а также учитывая общепринятые современные методы математического моделирования [3, с. 58; 10, с. 1107; 11, с. 11; 12, с. 230; 13, с. 409] и алгоритмирования (имитации) был разработан алгоритм описания динамики влагозапасов в почве с учетом временного фактора, а точнее посу-

точного их изменения. Алгоритм построен по принципу последовательной проводки событий. Вся расчетная работа ведется в пошаговом, причем автоматическом режиме (посуточно) за весь период вегетации растений.

Сделанные согласно этому – алгоритму расчеты свидетельствуют о достаточной корректности получаемых результатов. Причем они говорят о существенном влиянии на конечный результат времени выпадения осадков (рис. 2).

А, В, С, D – варианты без осадков (начальные влагозапасы соответственно 220, 160, 100 и 50 мм; I, II, III, IV – фенологические фазы; 1–5; 1'–5'; 1''–5'' – различные варианты пополнения влагозапасов за счет осадков (на графике вертикальные отрезки).

Из представленного рис. 2 вытекает целый ряд очень важных выводов. Один из них относится к важности весеннего накопления влаги. Исследования показали, что от этого зависит продолжительность обеспечения влагой растительности во время вегетационного периода, особенно при неблагоприятном осадковом режиме.

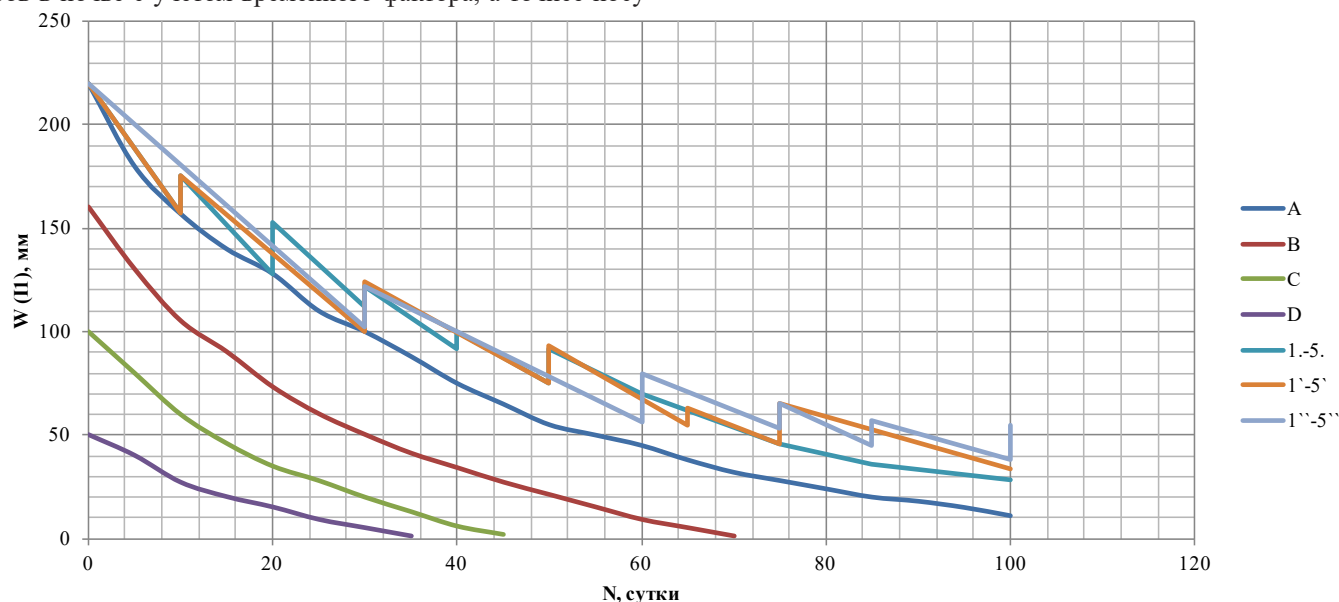


Рис. 2. Изменение влагозапасов во времени из почвенного слоя (при отсутствии на поверхности почвы защитного экрана)

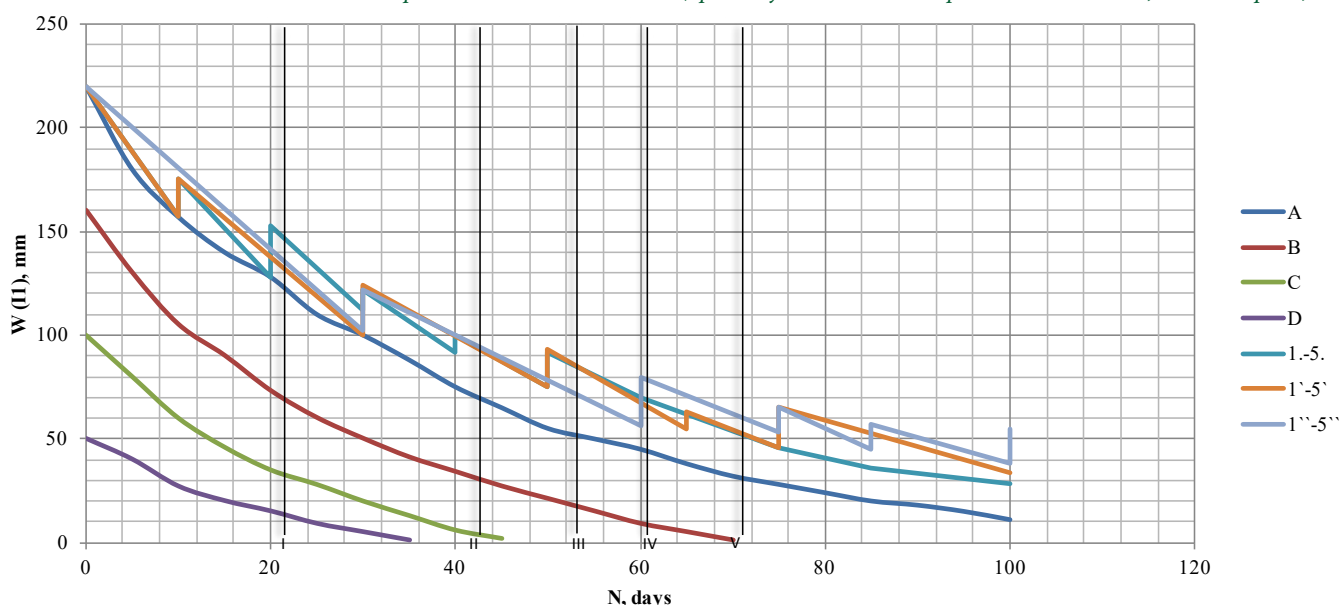


Fig. 2. Change in moisture reserves over time from the soil layer (in the absence of a protective screen on the soil surface)

Важно также отметить значимость времени выпадения осадков, поскольку это влияет на характер динамики влагозапасов в почве и определяет конечные значения их при завершении вегетации растений [14, с. 235].

Расчеты показали также, что изменение влагозапасов в почве во временном аспекте суть процесс нелинейный. Это значит, что конечный результат его неоднозначный. И играют определенную роль время выпадения осадков и количественная сторона приходящей части влаги.

Выявлено, что при смещении сроков выпадения осадков к началу вегетации (в пределах вегетационного периода) средние значения влагозапасов в первой части вегетационного периода увеличиваются, а во второй, наоборот, уменьшаются. При смещении же их в сторону конца вегетации наблюдается обратная картина, т. е. в первой части вегетации влагозапасы снижаются, а во второй – возрастают.

Конечно, может быть и другая картина по временным периодам. Все зависит от характера погодных условий, года и периодичности пополнения влаги в почве. Иначе говоря, конечный результат по влагозапасам есть функция отмеченного фактора и еще целого ряда других причин (начальных значений влагозапасов, временного распределения осадков, почвенного состояния). Этот процесс строго не детерминирован и носит вероятностный характер. Поэтому брать его за оценочный показатель, как это делается сейчас, при определении коэффициента водопотребления, мягко говоря, рискованно, а точнее ошибочно. Это рискованно еще и потому, что на данный показатель

может оказывать существенное влияние (которое определяется его параметрами) и растительный экран. Но это вопрос другой, готовящейся статьи.

#### Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Следует отметить один очень важный момент, а именно то, что в предлагаемой модели использованы общие представления о динамике влагозапасов в почве и слабо интерпретирован такой параметр, как *KP*. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на его раскрытие (для различных почв и технологий возделывания сельскохозяйственных растений), а также на установление пределов его изменения.

Следует сказать и то, что созданные структуры и программный продукт обеспечивают возможность прогнозирования динамики влагозапасов не только в современных условиях, но и при отработке различных сценариев глобального изменения климата. В перспективе созданные наработки с успехом могут быть трансформированы в более серьезные структуры. Например, в систему, обеспечивающую расчет испарительного процесса и динамики влагозапасов в почве при наличии на ее поверхности различных по плотности растительных экранов, а в дальнейшем и вообще влагооборота между подстилающей поверхностью и прилегающей воздушной средой. Таким образом, может появиться возможность прогноза фактической биопродуктивности растений в конкретных климатических и погодных условиях [15, с. 253].

#### Библиографический список

1. Быков Ф. Л., Василенко Е. В., Гордин В. А., Тарасова Л. Статистическая структура поля влажности верхнего слоя почвы по данным наземных и спутниковых наблюдений // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 68–84.
2. Зайцев Р. Н., Ревенко В. Ю., Агафонов О. М., Волобуев В. А. Сравнительная оценка способов повышения влагообеспеченности почв // Наука, техника и образование. 2016. № 10 (28). С. 54–58.
3. Merlin O., Olivera-Guerra L., Hssaine B., Amazirh A., Rafi Z., Ezzahar J., Gentine P., Khabba S., Gascoin S., Er-Raki S. A phenomenological model of soil evaporative efficiency using surface soil moisture and temperature data // Agricultural and Forest Meteorology. 2018. Vol. 256–257. Pp. 501–515. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.04.010.
4. Салугин А.Н., Кулик А.К., Власенко М.В. Численное моделирование вертикального движения влаги в зоне аэрации // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2(50). С. 57–64.
5. Салугин А. Н., Кулик А. К., Власенко М. В. Динамика элементов водного баланса в моделях почвенных гидрологических процессов // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 3. С. 47–50.
6. Горянин О. И., Щербинина Е. В., Медведев И. Ф. Влияние технологических систем на водный режим почвы в степном Заволжье // Аграрный научный журнал. 2017. № 4. С. 16–20.
7. Васильев Ю. И. Методология прогноза варьирования урожая зерновых культур в агролесоландшафте в связи с нестабильностью климатических характеристик // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 4. С. 54–57.
8. Турко С. Ю. Математическое моделирование влагопотерь из почвы при отсутствии на ее поверхности защитного растительного экрана // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 1 (65). С. 81–87.
9. Турко С. Ю. Математическое описание процессов роста и урожайности кормовых культур в аридных условиях // Вестник Башкирского ГАУ. 2016. № 2 (38). С. 18–22.
10. Шабанов В. В., Солошенко А. Д. Инструменты для оценки продуктивности злаковых растений на различных элементах катены // Степи Северной Евразии: материалы VIII международного симпозиума. Оренбург, 2018. С. 1106–1108.
11. Денисов Е. П., Солодовников А. П., Линьков А. С., Четвериков Ф. П. Агрофизические процессы формирования запасов продуктивной влаги в почве // Вестник Саратовского государственного аграрного университета им. Н. И. Вавилова. 2014. № 8 (65). С. 10–15.
12. Кулик Н. Ф. Термоградиентный перенос влаги в почве и возможности её использования растениями // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. 2018. С. 230–234.

13. Balugani E., Lubczynski M. W., Van Der Tol C., Metselaar K. Testing three approaches to estimate soil evaporation through a dry soil layer in a semi-arid area // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 567. Pp. 405–419. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.018.
14. Белюченко И. С. Перспективы развития агроландшафтных систем в степной зоне края // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 108. С. 232–247.
15. Сажин А. Н. [и др.] Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2017. 333 с.

**Об авторах:**

Юрий Иванович Васильев<sup>1</sup>, доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный деятель науки РФ, научный консультант, ORCID 0000-0002-2546-4755, AuthorID 7926

Светлана Юрьевна Турко<sup>1</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, ORCID 0000-0002-2546-4755, AuthorID 185088; +7 961 064-31-17, [turkosvetlana73@mail.ru](mailto:turkosvetlana73@mail.ru)

Марина Владимировна Назарова<sup>1</sup>, младший научный сотрудник, ORCID 0000-0002-7933-3152, AuthorID 392262; +7 961 064-69-27, [mn1967@list.ru](mailto:mn1967@list.ru)

Юрий Владимирович Чернявский<sup>1</sup>, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, ORCID 0000-0002-1781-433X,

AuthorID 148489; +7 909 392-04-78, [schwartzyrgen@gmail.ru](mailto:schwartzyrgen@gmail.ru)

<sup>1</sup> Федеральний научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

## The process of change of humidification reserves in agriculture and pastures taking into account physical evaporation

Yu. I. Vasilyev<sup>1</sup>, S. Yu. Turko<sup>1</sup>, M. V. Nazarova<sup>1</sup>✉, Yu. V. Chernyavskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Scientific Center for Agroecology Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

✉E-mail: [mn1967@list.ru](mailto:mn1967@list.ru)

**Abstract. Purpose and objectives.** The stated objective of the study is the evaporation process with an open soil surface under different conditions of precipitation and moisture accumulation before the plant vegetation. **Materials and methods.** Theoretical calculations were given and methods of mathematical modeling of the process of changing moisture reserves in the soil layer were applied. In field studies, evaporation was taken into account against the background of the existing (actual) vegetable screen (winter wheat). **Research results.** An algorithm has been developed to describe the dynamics of moisture reserves in the soil, taking into account the time factor, or rather, their daily change. The algorithm is built on the principle of sequential posting of events. All settlement work was carried out in a step-by-step, automatic mode (daily) for the entire period of plant vegetation. The article draws attention to the large role in the evaporation process of the vegetable screen, especially its parameters. It was revealed that the amount of moisture in the soil layer also plays a role. It was shown that with increasing moisture reserves in the soil, evaporation in absolute terms, in time, increases, and in a normalized form decreases. The reasons, according to the authors, are two. One of them is associated with the differentiation of moisture in the soil, and the other is associated with purely mathematical properties (since the denominator and numerator of the fraction change according to different laws when normalizing evaporation). **Scientific novelty.** The resulting structures and algorithms allow us not only to determine the daily moisture reserves in the soil on arable land and on pastures (taking into account physical evaporation), but also during further study can become the basis for modeling processes under different climate change scenarios.

**Keywords:** process, evaporation, modeling, experience, programming, algorithm, moisture reserves, soil, environment.

**For citation:** Vasilyev Yu. I., Turko S. Yu., Nazarova, M. V., Chernyavskiy Yu. V. Protsess izmeneniya vlagozapasov na pashne i pastbishchakh s uchetom fizicheskogo ispareniya [The process of change of humidification reserves in agriculture and pastures taking into account physical evaporation] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2019. No. 12 (191). Pp. 2–8. DOI: 10.32417/1997-4868-2019-191-12-2-8. (In Russian.)

**Paper submitted:** 02.10.2019.

### References

1. Bykov F. L., Vasilenko E. V., Gordin V. A., Tarasova L. L. Statisticheskaya struktura polya vlazhnosti verhnego sloya pochvy po dannym nazemnyh i sputnikovyh nablyudenij [Statistical structure of the moisture field of the upper soil layer according to ground and satellite observations] // Meteorologiya i gidrologiya. 2017. No. 6. Pp. 68–84.
2. Zaytsev R. N., Revenko V. Yu., Agafonov O. M., Volobuev V. A. Sravnitel'naya otsenka sposobov povysheniya vlagooberpechnosti pochv [Comparative evaluation of ways to improve soil moisture] // Nauka, tekhnika i obrazovanie. 2016. No. 10 (28). Pp. 54–58.

3. Merlin O., Olivera-Guerra L., Hssaine B., Amazirh A., Rafi Z., Ezzahar J., Gentine P., Khabba S., Gascoïn S., Er-Raki S. A phenomenological model of soil evaporative efficiency using surface soil moisture and temperature data // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. Vol. 256–257. Pp. 501–515. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.04.010.
4. Salugin A. N., Kulik A. K., Vlasenko M. V. Chislennoe modelirovanie vertikal'nogo dvizheniya vlagi v zone aeratsii [Numerical simulation of the vertical movement of moisture in the aeration zone] // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2018. No. 2 (50). Pp. 57–64.
5. Salugin A. N., Kulik A. K., Vlasenko M. V. Dinamika elementov vodnogo balansa v modelyakh pochvennykh gidrologicheskikh protsessov [Dynamics of water balance elements in models of soil hydrological processes] // *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2018. No. 3. Pp. 47–50.
6. Goryanin O. I., Shcherbinina E. V., Medvedev I. F. Vliyanie tekhnologicheskikh sistem na vodnyy rezhim pochvy v stepnom Zavolzh'e [The influence of technological systems on the water regime of the soil in the Volga steppe] // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2017. No. 4. Pp. 16–20.
7. Vasil'ev Yu. I. Metodologiya prognoza var'irovaniya urozhaya zernovykh kul'tur v agrolesolandshafte v svyazi s nestabil'nost'yu klimaticheskikh kharakteristik [Methodology for predicting the variation of the yield of grain crops in agroforestry due to the instability of climatic characteristics] // *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokozyaystvennykh nauk*. 2013. No. 4. Pp. 54–57.
8. Turko S. Yu. Matematicheskoe modelirovanie vlagopoter' iz pochvy pri otsutstvii na eye poverkhnosti zashchitnogo rastitel'nogo ekrana [Mathematical modeling of moisture loss from the soil in the absence of a protective vegetable screen on its surface] // *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2017. No. 1 (65). Pp. 81–87.
9. Turko S. Yu. Matematicheskoe opisanie protsessov rosta i urozhaynosti kormovykh kul'tur v aridnykh usloviyakh [Mathematical description of the processes of growth and yield of forage crops in arid conditions] // *Vestnik Bashkirskogo GAU*. 2016. No. 2 (38). Pp. 18–22.
10. Shabanov V. V., Soloshenkov A. D. Instrumenty dlya otsenki produktivnosti zlakovykh rasteniy na razlichnykh elementakh kateny [Tools for assessing the productivity of cereal plants on various elements of the catena] // *Stepi Severnoy Evrazii: materialy VIII mezhdunarodnogo simpoziuma*. Orenburg, 2018. Pp. 1106–1108.
11. Denisov E. P., Solodovnikov A. P., Lin'kov A. S., Chetverikov F. P. Agrofizicheskie protsessy formirovaniya zapasov produktivnoy vlagi v pochve [Agrophysical processes of formation of productive moisture reserves in the soil] // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. N. I. Vavilova* 2014. No. 8 (65). Pp. 10–15.
12. Kulik N. F. Termogradientnyy perenos vlagi v pochve i vozmozhnosti eye ispol'zovaniya rasteniyami [Thermogradient transfer of moisture in the soil and the possibility of its use by plants] // *Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoe 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrohimii SO RAN*. 2018. Pp. 230–234.
13. Balugani E., Lubczynski M. W., Van Der Tol C., Metselaar K. Testing three approaches to estimate soil evaporation through a dry soil layer in a semi-arid area // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 567. Pp. 405–419. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.018.
14. Belyuchenko I. S. Perspektivy razvitiya agrolandschaftnykh sistem v stepnoy zone kraya [Prospects for the development of agrolandscape systems in the steppe zone of the region] // *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 108. Pp. 232–247.
15. Sazhin A. N. [et al.] Pogoda i klimat Volgogradskoy oblasti [Weather and climate of Volgograd region]. Volgograd: VNIALMI, 2017. 333 p.

#### **Authors' information:**

Yuriy I. Vasilyev<sup>1</sup>, doctor of agricultural sciences, honored scientist of the Russian Federation, science consultant, ORCID 0000-0002-2546-4755, AuthorID 7926

Svetlana Yu. Turko<sup>1</sup>, candidate of agricultural sciences, researcher, ORCID 0000-0002-2546-4755, AuthorID 185088; +7 961 064-31-17, [turkosvetlana73@mail.ru](mailto:turkosvetlana73@mail.ru)

Marina V. Nazarova<sup>1</sup>, junior researcher, ORCID 0000-0002-7933-3152, AuthorID 392262; +7 961 064-69-27, [mn1967@list.ru](mailto:mn1967@list.ru)

Yuriy V. Chernyavskiy<sup>1</sup>, candidate of economic sciences, leading researcher, ORCID 0000-0002-1781-433X, AuthorID 148489; +7 909 392-04-78, [schwartzyrigen@gmail.ru](mailto:schwartzyrigen@gmail.ru)

<sup>1</sup> Federal Scientific Center for Agroecology Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia