

## **МЕЛИОРАЦИЯ ЗЕМЕЛЬ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

УДК: 631.9

DOI 10.37738/VNIIGiM.2020.72.38.001

### **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ АГРОЦЕНОЗА ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ И МЕЛКОДИСПЕРСНОМ ДОЖДЕВАНИИ**

**Бубер А.А., Добрачев Ю.П.**

ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, г. Москва, Россия

***Аннотация.** Для назначения стратегии управления мелиоративными мероприятиями, а также при оценке их эффективности, авторами предложено использование методов имитационного моделирования системы «почва-растение-атмосфера», базирующихся на накопленном отечественном и зарубежном опыте и экспериментальном материале, полученном в Волгоградской области на посадках раннего картофеля. Основным фактором, влияющим на урожайность агроценоза, является наличие доступной растению влаги в почвенном слое, занятом корнями, в связи с чем, особое внимание следует уделять моделированию эвапорации и транспирации, и движения влаги в почвенном профиле при проведении орошения (капельное и дождевание) и выпадении осадков. В статье описан алгоритм расчета водного обмена. Реализация математической модели происходит с использованием стандартного программного обеспечения Microsoft Excel, что делает ее доступной и достаточно простой для пользователя.*

***Ключевые слова:** эвапорация, транспирация, влажность почвы, водный обмен, водный баланс.*

### **FEATURES OF EVAPORATION FROM THE AGROCENOSIS SOIL SURFACE CALCULATION AT DROP AND SPRINKLING IRRIGATION**

**Buber A.A., Dobrachev U.P.**

All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow, Russia

***Abstract.** To assign a strategy for the land reclamation measures management, as well as assessing their effectiveness, the authors proposed the simulation methods of the soil-plant-atmosphere system use, based on accumulated domestic and foreign experience and experimental material obtained in the Volgograd region from early potato plantings. The main factor affecting the agroecosis yield is the presence of moisture available to the plant in the soil layer occupied by roots, and therefore, special attention should be paid to modeling evaporation and transpiration, and the movement of moisture in the soil profile during irrigation (drip and sprinkling) and precipitation. The article describes the algorithm for water exchange calculating. The mathematical model is implemented using standard Microsoft Excel software, which makes it accessible and simple enough for the user.*

***Keywords:** evaporation, transpiration, soil moisture, water exchange, water balance.*

В динамической модели «РОТАТО» имитируется развивающийся агроценоз раннего картофеля от фазы «посадка» до фазы «техническая спелость клубней» и, в зависимости от влажности почвы в прикорневой зоне и напряженности метеорологических условий, оцениваемых по температуре воздуха и испаряемости, назначается его орошение с помощью капельной линии или мелкодисперсного дождевания. Модель позволяет контролировать развитие посева и формирование урожая клубней в ситуациях, когда продукционный процесс может лимитироваться запасом почвенной влаги и элементами минерального питания, структурными компонентами куста картофеля (площадь листьев, глубина корней и др.) и погодными факторами. Центральное место в модели занимает расчет водного баланса почвы орошаемого участка. Учитывается поступление воды на листовую поверхность (интерцепция) и в почву с осадками и поливами, и испарение влаги с поверхности почвы (эвапорация) и надземной части растений, а также отбор влаги корнями в результате транспирации листьев; учитывается возможный поверхностный и инфильтрационный стоки.

Ранее, мы отмечали, что структура и функциональные блоки модели «РОТАТО» сформированы на базе публикаций ученых, внесших существенный вклад в экологическую физиологию растений и моделирование агроэкосистем (Е.П. Галямин, Р.А. Полуэктов, Х.Г. Тооминг, Ю.К. Росса, С. Т. de Wit, А.Г. Лорх, А.И. Коровин) [1,2]. Для расчета водного обмена развивающегося агроценоза, орошаемого с помощью системы капельного полива и мелкодисперсного дождевания, мы сочли рациональным использовать практический подход, предложенный американским агрофизиком J. Ritchie для культур сплошного сева. В частности, этот подход предполагает отдельный расчет испарения с поверхности почвы (эвапорация,  $E_s$ ) и отбор влаги корнями растений и ее вынос листьями в атмосферу (транспирация,  $E_p$ ). Алгоритм позволяет рассчитывать испарение с «чистой» поверхности почвы, до сева культур, в период от сева до появления всходов, и далее по мере нарастания площади листьев и их полного смыкания [3].

Как и в большинстве других динамических моделей агроценозов, алгоритм Ritchie использует в расчетах водного обмена такую интенсивную характеристику как потенциальное испарение ( $E_0$ ), вычисляемую по уравнению Н. Л. Penman [4], в котором радиационный баланс учитывает альбедо почвы и культуры в зависимости от площади проективного покрытия растений. Для этого используется эмпирическое уравнение: альбедо агроценоза ежедневно пересчитывается, учитывая долю площади занятую растениями, вместе с нарастанием листовой массы меняется значение альбедо агроценоза с момента сева от альбедо почвы до альбедо культуры (в случае достижения листового индекса, обеспечивающего 100% проективное покрытие). Полагая, что на испарения влаги с поверхности почвы частично покрытой растениями влияние ветровой функции и дефицит влаги воздуха незначительно, вводится характеристика потенциального испарения для поверхности почвы ( $E_{0s}$ ), в которой, как и для потенциального испарения со всего агроценоза, отдельно рассчитывается радиационный баланс почвы под растительным покровом.

Испарение с поверхности почвы рассчитывается в два этапа: 1-й этап для случая, когда процесс испарения лимитируется только приходом солнечной энергии (содержание влаги в верхнем слое почвы высокое); 2-й этап – испарение лимитируется притоком влаги к поверхности, и ее скорость определяется гидрофизическими свойствами почвы и влажностью. Процедура расчета эвапорации начинается с определения наличия дождя на текущую дату и количества влаги в верхнем слое почвы. Если осадки или поливы в виде дождя имеются, то величина суммарного суточного испарения с поверхности почвы оценивается по соотношению:

$$E_{S1} = \text{Min}(E_{os}, U), \quad (1)$$

где:  $U$  - максимальное количество возможного выноса влаги из верхнего слоя почвы, испарение которой лимитируется приходом энергии;  $E_{S1}$  - суточное испарение влаги в процессе первого этапа испарения, мм.

Учитывается сумма испарения за период первого этапа ( $\Sigma E_{S1}$ ), и в случае ее превышения максимума ( $U$ ), эвапорация рассчитывается по правилу второго этапа. Таким образом, ежесуточно проверяется неравенство  $\sum_i^n E_{S1}(i) \leq U$  и при его выполнении расчет испарения по правилу первого этапа продолжается, т.е.:

$$\Sigma E_{S1} = \Sigma E_{S1} - P + \text{Min}(U, E_{os}), U, \quad (2)$$

где:  $P$  - осадки или поливы дождеванием в  $i$ -е сутки, мм.

Если сумма  $\Sigma E_{S1}$  становится больше  $U$ , то расчет эвапорации выполняется по алгоритму второго этапа, при котором вынос влаги из почвы ( $\Sigma E_{S2}$ ) определяется влажностью и гидравлическими свойствами почвы. Согласно правилу, выведенному Black для процесса испарения лимитированного гидравлической проводимостью почвы, сумма испарения влаги из почвы представляется формулой:

$$\sum_{i=1}^l E_{S2}^1(i) = \alpha \cdot i^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где:  $\alpha$  - характеристика свойств почвы (влагопроводность), для суглинистых почв Нижнего Поволжья составляет  $4,04 \text{ мм/сутки}^{1/2}$  для насыщенной влагой почвы, при давлении влаги в  $0,1 \text{ бар/см}$  [5];  $i$  - число суток с начала процесса второй стадии высыхания почвы при насыщении влагой нижних горизонтов почвы. Тогда испарение за сутки можно рассчитать по разности:

$$E_{S2}^1(i) = \alpha \cdot (i-1)^{\frac{1}{2}} - \alpha \cdot (i)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

На основе данных о свойствах корнеобитаемого слоя почвы, полученных в ходе проведения полевых опытов (водно-физические свойства, механический состав, агрохимические показатели, морфология профиля), весь почвенный горизонт ( $Z$ ) разбивается на ряд однородных слоев, согласно морфологическому описанию. Число слоев может быть задано произвольно в соответствии с име-

ющимися данными о свойствах почвы по горизонтам, либо в соответствии со стандартной разбивкой, примененной при измерениях влажности по слоям. Сумма всех горизонтов почвенных слоев, задаваемых в модели, должна быть больше слоя, занимаемого корнями растений. Толщина верхнего слоя не должна быть более 100 мм. Для каждого слоя почвы должны быть определены характеристики по гранулометрическому составу и водно-физические свойства почв опытного участка. Корневая система раннего картофеля сорта «Импала» достигает максимальной глубины 0,8 метра, поэтому на опытном участке отбор почвенных образцов для анализа производили до глубины 0,8 м.

Для эффективного использования алгоритма Ritchie толщина верхнего слоя принимается равной:

$$z_0 = U / (\Theta_{sat} - \Theta_{res}); \quad (5)$$

где:  $z_0$  - толщина верхнего слоя, мм;  $U$  - предельное количество влаги, испаряющееся на первом этапе процесса эвапорации, мм;  $\Theta_{sat}$ ,  $\Theta_{res}$  - объемное содержание влаги в верхнем слое почвы при насыщении и при воздушной гигроскопичности почвы соответственно, мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>. В балансовых расчетах почвенная влага представлена в двух размерностях: единицы объемной влажности (мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>) используются для описания удельного содержания доступной влаги ( $w$ ); относительные единицы ( $\Theta/\Theta_{sat}$ ) в долях или % от НВ ( $W$ ) используются в функциях и для отображения на графиках.

Увлажнение почвенного горизонта при выпадении осадков или при поливе дождеванием происходит в процессе впитывания по всей поверхности: слои почвы, начиная с верхнего, последовательно заполняются водой до насыщения и расчет эвапорации выполняется по правилу первой фазы испарения. Избыток воды поступает в зону влияния грунтовых вод, недоступную для корней.

При назначении полива капельным способом в расчетах эвапорации величина потенциального испарения не изменяется, верхний слой почвы сохраняет свою влажность, а поступающая из капельницы вода заполняет второй и остальные нижележащие горизонты. В этом случае расчет эвапорации из почвы выполняется по алгоритму первой либо второй, менее интенсивной, фазы испарения. Результаты численных экспериментов расчета эвапорации и транспирации картофеля орошении с помощью дождевания и капельного полива при одинаковых поливных нормах нетто при сохранении почвенных и погодных условий приведены на рисунке 1.

Используя возможности предложенного метода, обусловленные отдельным расчетом эвапорации и транспирации, при назначении мелкодисперсного дождевания вводится проверенное опытным путем допущение о снижении значения потенциального испарения на величину распыленной с помощью МДД по площади воды в мм (для условий Волгоградской обл.), что учитывается в расчетах эвапотранспирации агроценоза. По такому же принципу в алгоритме J. Ritchie учитываются осадки, выпадающие в малых количествах (1-3 мм). Результаты расчетов водного баланса почвы для всех вариантов опытов при капельном и комбинированном способах полива показывают, что наблюдающая-

ся закономерность эффективности использования влаги при различных способах полива различается, как показано на рисунке 2 и в таблице.

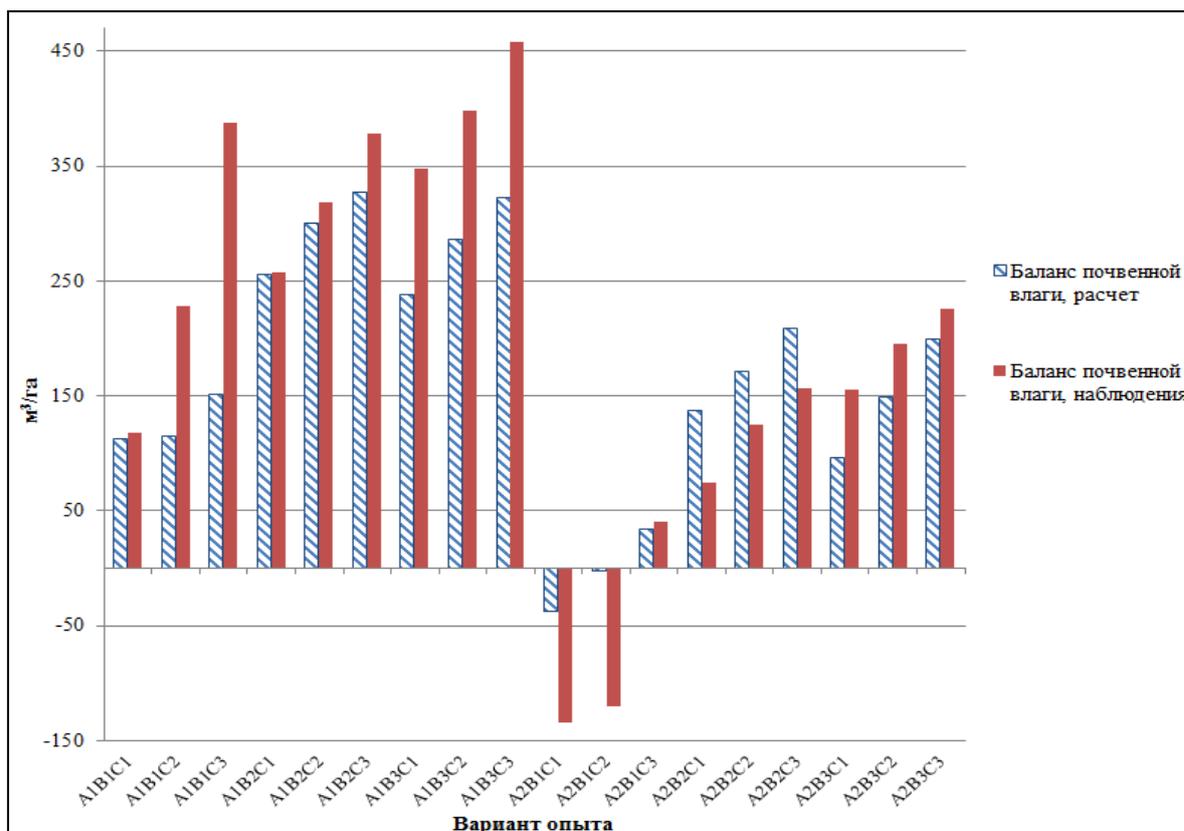
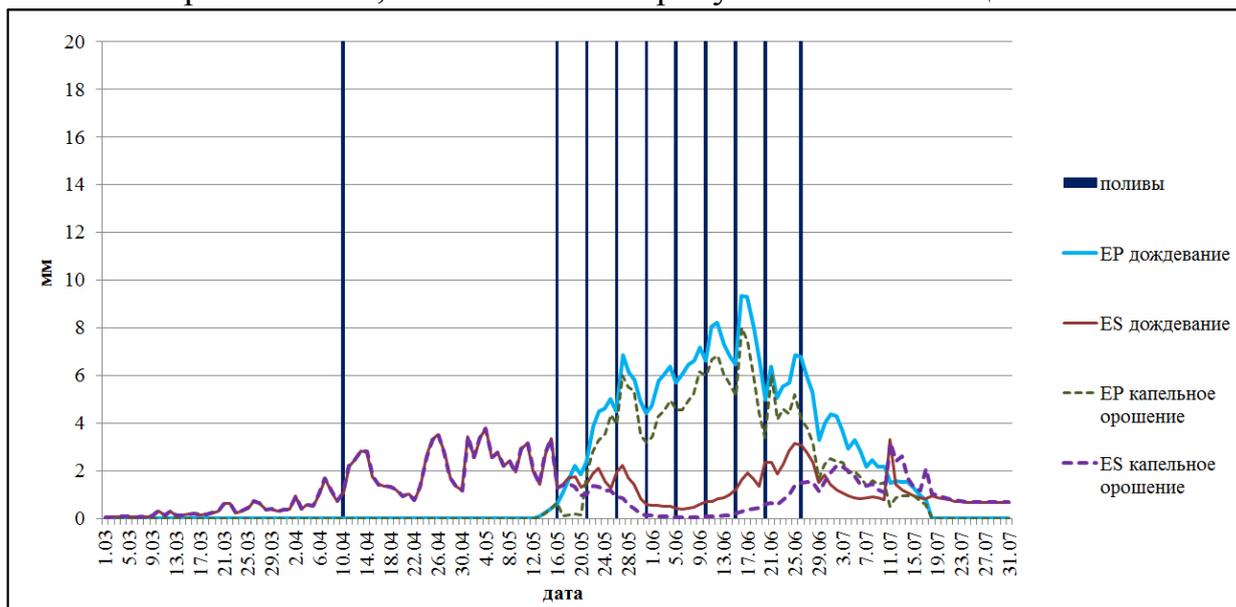


Таблица - Сравнение фактического баланса почвенной влаги и расчетного по приходным (фактическим) и расходным (расчетным) составляющим по изучаемым вариантам опытов 2015 г.

Вариант опыта	Эвапорация (EP), м <sup>3</sup> /га	Транспирация (ES), м <sup>3</sup> /га	$Q_{расч} = EP+ES$	Осадки (P), м <sup>3</sup> /га	Поливы капельное орошение (Q <sub>кап</sub> ), м <sup>3</sup> /га	Поливы МДД (Q <sub>МДД</sub> ), м <sup>3</sup> /га	$Q_{пр} = Q_{кап} + Q_{МДД} + P$	Начальный запас доступной влаги, м <sup>3</sup> /га	Конечный запас доступной влаги, м <sup>3</sup> /га	Баланс почвенной влаги, м <sup>3</sup> /га	Конечный запас доступной влаги, м <sup>3</sup> /га	Баланс почвенной влаги, м <sup>3</sup> /га	Разница фактического и расчетного балансов, м <sup>3</sup> /га
	расчет на модели «РОТАТО»			фактические наблюдения				расчет		наблюдения			
A1B1C1	1898	2090	3988	1623	2000	-	3623	500	387	113	382	118	5
A1B1C2	1899	2089	3988	1623	2000	-	3623	500	385	115	272	228	113
A1B1C3	1855	2175	4030	1623	2000	-	3623	500	348	152	112	388	236
A1B2C1	1735	2441	4176	1623	1800	-	3423	500	243	256	242	258	2
A1B2C2	1684	2587	4271	1623	1800	-	3423	500	199	300	182	318	18
A1B2C3	1644	2671	4315	1623	1800	-	3423	500	172	327	122	378	51
A1B3C1	1764	2299	4063	1623	1700	-	3323	500	261	239	152	348	109
A1B3C2	1706	2449	4155	1623	1700	-	3323	500	213	286	102	398	112
A1B3C3	1666	2549	4215	1623	1700	-	3323	500	177	323	42	458	135
A2B1C1	2027	1979	4006	1623	2200	237	4060	500	537	-38	634	-134	-96
A2B1C2	1989	2061	4050	1623	2200	237	4060	500	502	-3	620	-120	-117
A2B1C3	1919	2189	4108	1623	2200	237	4060	500	466	34	460	40	6
A2B2C1	1798	2456	4254	1623	2000	243	3866	500	362	138	425	75	-63
A2B2C2	1732	2600	4332	1623	2000	243	3866	500	329	171	375	125	-46
A2B2C3	1676	2727	4403	1623	2000	243	3866	500	291	208	344	156	-52
A2B3C1	1833	2302	4135	1623	1900	243	3766	500	404	96	345	155	59
A2B3C2	1772	2435	4207	1623	1900	243	3766	500	351	149	305	195	46
A2B3C3	1694	2610	4304	1623	1900	243	3766	500	300	200	274	226	26

При комбинированном орошении использование почвенной влаги растением ниже, чем при капельном орошении, это связано в первую очередь с увеличением оросительной нормы за счет увеличения продолжительности вегетационного периода, и использованием МДД, оказывающим влияние на транспирацию (снижение). Внесение повышенных доз минерального питания увеличивает водопотребление при капельном и комбинированном орошении. Отзывчивость водного режима на уровень внесения минеральных удобрений, обусловлена развитием корневой системы и надземной части растений, а также повышением фотосинтетического потенциала. При комбинированном орошении и применении МДД растения более эффективно используют почвенную влагу.

### Выводы

Эвапорация и транспирация рассчитываются по модифицированному нами алгоритму Ritchie, который позволяет при поступлении влаги в почву при капельном орошении обеспечивать возможность сохранения верхнего слоя почвы

в подсушенном состоянии и его альбедо, а также учитывать в водном балансе агроценоза мелкодисперсное дождевание, как интероцепцию осадков на растительном покрове, приводящую к снижению суточной величины испаряемости. Увлажнение нижележащих слоев в процессе фильтрации осадков и поливов задается согласно правилу, при котором слои почвы последовательно заполняются водой (начиная с верхнего и далее вниз) только до величины их наименьшей влагоемкости.

В расчеты эвапорации включены дополнительные параметры альбедо сухой и влажной почвы, площадь испаряющей поверхности, величина которой связана со способом посадки и геометрическими характеристиками гряды.

### **Список использованной литературы**

1. Бородычев В.В., Бубер А.А., Добрачев Ю.П. Мониторинг гидротермического режима картофельного поля в условиях субаридной зоны с применением имитационной модели / Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 2 (54). С. 397-409.
2. Овчинников А.С., Бубер А.А., Добрачев Ю.П., Бородычев В.В. Динамическая модель раннеспелого картофеля для регулирования гидротермического режима агроценоза в условиях Волгоградской области / Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4 (52). С. 65-76.
3. Ritchie J. T. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies / Ritchie J. T., Burnett E. // Agron. J., n 60, 1968. - p. 545-549.
4. Penman H. L. Evaporation: an introductory survey / Netherl. J. Agric. Sci., 4, 1956, p. 9- 29.
5. Black T. A. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil / T. A. Black, W. R. Gardner, G. W. Thurtell // Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33, 1969. - p. 655-660.

### **References**

1. Borodychev V. V., Buber, A. A., Y. P. Dobrachev Monitoring hydrothermal regime of a potato field in conditions of semi-arid zones with the use of a simulation model / news of the nizhnevolzhsky agrouniversity complex: Science and higher professional education. 2019. No. 2 (54). Pp. 397-409.
2. Ovchinnikov A. S., Buber, A. A., Domrachev Y. P., Borodachev V. Dynamic model of early-maturing potatoes to regulate the hydrothermal regime of agrocenosis in the conditions of the Volgograd region / proceedings of lower Volga agrodiversity complex: Science and higher professional education. 2018. no. 4 (52). Pp. 65-76.
3. Ritchie J. T. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies / Ritchie J. T., Burnett E. // Agron. J., n 60, 1968. - p. 545-549.
4. Penman H. L. Evaporation: an introductory survey / Netherl. J. Agric. Sci., 4, 1956, p.9 - 29.
5. Black T. A. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil / T. A. Black, W. R. Gardner, G. W. Thurtell // Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33, 1969. - p. 655-660.