

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ НА ПОЧВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ЭКРАНА

С. Ю. ТУРКО, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник

К. Ю. ТРУБАКОВА, инженер-исследователь

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук

(400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 97)

Ключевые слова: математическое модель, почва, испарение, влага, оптическая плотность, растительный экран, параметры, закономерность, транспирация.

В статье рассматривается одна из концепций влагопотерь из почвы при физическом испарении в случае наличия на почвенной поверхности растительного экрана. Показан вывод математических структур для оценки параметров растительного экрана. При этом учитываются геометрические и оптические свойства растительности (занимаемая площадь остовом растений, высота последних, оптическая плотность растительного экрана). Приводятся реальные данные о показателях растительного экрана, служащие проверочным материалом при всевозможных расчетах. Кроме того, эти данные дают реальную картину о диапазонах изменения параметров и показателей растительного экрана. Сделанные расчеты показывают ту роль, которую играет растительный экран в экономии влаги при физическом испарении из почвы. Причем, это рассматривается по фенологическим фазам развития растений. Большое внимание в статье уделяется рассмотрению вопроса зависимости коэффициента λ_1 от свойств почвы. В частности, указывается, что этот коэффициент, несомненно, должен зависеть от скважности почвы, которая зависит от многих факторов: (механического и структурного состава почв, их химических свойств, хозяйственной деятельности и др.). Поскольку испарение воды происходит не только с поверхности почвы, но и из полостей между структурными отдельностями (или механическими отдельностями), в статье акцентируется на том, что общая породность не полностью отражает испарительную возможность почвы. Лучше увязывать λ_1 с капиллярной скважностью.

MATHEMATICAL MODEL OF EVAPORATION IN THE PRESENCE ON THE SOIL SURFACE OF THE PLANT SCREEN

S. Yu. TURKO, candidate of agricultural sciences, researcher,

K. Yu. TRUBAKOVA, engineer researcher,

Federal scientific center for agro-ecology, integrated land reclamation and protective forestation, Russian Academy of Sciences

(97 Universitetskiy Ave., 400062, Volgograd).

Keywords: mathematical model, soil, evaporation, moisture, transpiration, optical density, plant screen, parameters, regularity.

In article one of concepts of moisture losses at physical evaporation from the surface of the soil of the plant screen is considered. The derivation of mathematical structures for estimating the parameters of the plant screen is shown. This takes into account the geometric and optical properties of vegetation (the area occupied by the skeleton of plants, the height of the latter, the optical density of the plant screen). Real findings on indicators of the plant screen which serve as test material at various calculations are provided. And also, these findings give a real picture of the ranges of parameters and parameters of the plant screen. The calculations show the role played by the plant screen in saving moisture during physical evaporation from the soil. And, it is considered on the phenological phases of plant development. Much attention is paid in this article to the consideration of the dependence of the coefficient λ_1 on the properties of the soil. In particular, it is specified that this coefficient, undoubtedly, has to depend on porosity of the soil which depends on many factors: (mechanical and structural structure of soils, their chemical properties, economic activity, etc.). Since evaporation of water happens not only from the surface of the soil, but also from cavities between structural separateness (or mechanical separateness), in article is accented that the general breed not completely reflects a vaporizing possibility of the soil. It is better to associate the coefficient λ_1 with capillary porosity.

Положительная рецензия представлена Н. В. Тютюмой, доктором сельскохозяйственных наук,
профессором Российской академии наук, и. о. директора
Прикаспийского научно-исследовательского института аридного земледелия.

Цель и методика исследований. Целью исследований являлось создание математической модели влагопотерь из почвы, через физическое испарение, при наличии на почвенной поверхности растительного экрана с различными параметрами.

Реализация данной цели осуществлялась с помощью общепринятых методов построения математических моделей, в основе которых лежит принцип последовательной проводки.

Результаты исследований. В более ранней нашей статье рассматривался вопрос моделирования испарения влаги из почвогрунтового слоя при отсутствии на почвенной поверхности защитного растительного или стернового экрана. Иное дело, когда такой экран будет присутствовать. Причем, здесь также может быть несколько модификаций. Одна из них, когда защитный экран не трансперирует влагу, т.е. он мертвый, создающий лишь помеху для простого процесса испарения влаги из почвенно-грунтового слоя. Другая модификация, когда защитный экран, с одной стороны, создает помеху для испарительного процесса из почвогрунта, а с другой – сам через себя пропускает часть влаги. Причем при стационарных параметрах защитного экрана. Третий случай – это когда присутствуют и помехи для процесса испарения влаги, происходит транспирация и меняются параметры защитного растительного экрана.

Остановимся пока лишь на первом, из трех обозначенных случаев. Будем исходить из того, что влияние экрана на испарение влаги определяется двумя главными параметрами – площадью, занимаемой экраном и его аэродинамическими характеристиками (просветностью и вертикальным размером). Гипотетически это можно было бы выразить следующим соотношением:

$$\frac{dQ}{dz_3} = -\lambda_1 Q, \quad (1)$$

где Q – количество испаряющейся влаги, мм;

z_3 – экранирующая способность защитного экрана, зависящая от площади, занимаемой экраном и его аэродинамических характеристик;

λ_1 – коэффициент пропорциональности.

Знак минус в уравнении (1) говорит о том, что градиент $\frac{dQ}{dz_3}$ имеет нисходящий закон изменения.

Разделяя переменные и интегрируя, получают:

$$\ln Q = -\lambda_1 z_3 + C, \quad (2)$$

где C – постоянная интегрирования неопределенного интеграла.

Чтобы найти значение « C », воспользуемся условиями на границе функции, а именно, положим $z_3 = 0$ (т. е. случай отсутствия экрана). Вполне очевидно, что в этом случае Q будет равно Q_0 (испарению с открытой почвенной поверхности).

Тогда имеем, что $C = \ln Q_0$, и $\ln Q = -\lambda_1 z_3 + \ln Q_0$.

Производя некоторые преобразования получим:

$$Q = Q_0 e^{-\lambda_1 z_3} \quad (3)$$

Остается раскрыть параметр z_3 . Что же касается Q_0 , то эта характеристика подробно была раскрыта в предыдущей нашей статье [1, 2].

Приступая к раскрытию параметра z_3 , нужно отметить одну характерную особенность, выявленную нами ранее при изучении формирования пространственных пористых структур, а точнее – лесонасаждений. Эта особенность строилась на теории вероятности приложенной к совмещению двух пространственных решеток. Считалось, что вероятность просветности двух совмещенных пространственных решеток с просветностью ϕ_1 и ϕ_2 равна произведению их просветностей, т. е. $\phi_1 \phi_2$ [3].

В данном случае как раз и рассматривается двойственный экран, состоящий из остова, занимающего определенную площадь на почвенной поверхности, и экранной основы, создаваемой листвой, стеблями и другими элементами экрана.

Начнем с первой из характеристик, т. е. с основы. Положим, что элемент ее имеет диаметр $d_{ст}$, а количество элементов на элементарной площади S_1 составляет $N_{ст}$.

Тогда площадь, занимаемая остовом, очевидно, будет равна:

$$S_{oc} = \frac{\pi d_{ст}^2 \cdot N_{ст}}{4} \quad (4)$$

Что касается просветности остова, то она может быть найдена из соотношения:

$$\phi_{oc} = \left(\frac{S_{loc} - S}{S_1} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Просветность экранной основы, создаваемая листвой и стеблями (выраженная в долях), может быть рассчитана по схеме, ранее использовавшейся для определения просветности лесонасаждений [4]:

$$\phi_{э.ос.} = \left[1 - K_{оп.} \ln \left(\frac{H_{cm} + A}{A} \right) \right], \quad (6)$$

где $K_{оп}$ – коэффициент, связанный с оптической плотностью растительного экрана;

A – коэффициент, введенный для исключения разрыва функции при $H_{cm} = 0$; H_{cm} – высота защитного растительного экрана.

Принимая во внимание описанное выше для ϕ_1 и ϕ_2 можно по аналогии записать:

$$z_3 = \left\{ 1 - 0,01 \left[1 - K_{оп} \ln \left(\frac{H_{cm} + A}{A} \right) \right] \phi_{oc} \right\} \quad (7)$$

Это можно переписать в более удобной форме для анализа:

$$z_3 = \left[(1 - 0,01 \phi_{oc}) + 0,01 \cdot \phi_{oc} K_{оп} \ln \left(\frac{H_{cm} + A}{A} \right) \right] \quad (8)$$

Из этого уравнения следует, что присутствие экрана из листьев и стеблей ($K_{оп} = 0$) уравнение (8) сворачивается до вида:

$$z_3 = (1 - 0,01 \phi_{oc}) \quad (9)$$

Изменение физического испарения из почвогрунта при наличии на почвенной поверхности растительного экрана

Таблица 1

Table 1

Change of physical evaporation from soil in the presence on the soil surface of the plant screen

Фенологические фазы <i>Phenological phases</i>	Расстояние от лесной полосы, Н <i>Distance from forest lane, H</i>					
	1,5	5	10	15	25	35
Начало вегетации <i>The beginning of the growing season</i>	84,0	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9
Выход в трубку <i>Out in the tube</i>	41,7	19,9	20,2	27,2	23,5	27,2
Колошение <i>Earing</i>	38,7	16,5	18,3	23,5	20,7	22,3
Молочная спелость <i>Milk ripeness</i>	35,0	15,3	16,9	21,7	19,7	21,2
Восковая спелость <i>Wax ripeness</i>	33,3	14,6	16,1	20,0	18,7	19,7
В среднем за вегетацию, % <i>On average, during the growing season, %</i>	50,9	27,4	28,4	32,5	30,5	32,1
Экономия за счет экрана, % <i>Savings screen, %</i>	49,1	72,6	71,6	67,5	69,5	67,9

Иначе говоря, будет влиять только уменьшение испаряющей площади. Чем больше площадь закрытия и, следовательно, меньше ϕ_{oc} , тем меньше будет Q .

Теперь о самом растительном экране. Очевидно, что при большей плотности экрана ($K_{оп}$ больше), большей высоте растительности (H_{cm} больше) и постоянном значении ϕ_{oc} величина z_3 увеличивается. Следовательно, в этом случае Q становится меньше. Другая картина имеет место когда $K_{оп} = const$ и $H_{cm} = const$, а значение ϕ_{oc} возрастает. В этом случае z_3 становится меньше, а показатель Q возрастает.

Следующей проблемой является установление значения коэффициента λ_1 . Она могла бы быть решена из следующего постулата. Во-первых, при отсутствии защитного экрана (т.е. $z_3 = 0$) величина Q должна быть равна Q_0 . И действительно, при $z_3 = 0$ значение $e^{\lambda_1 z_3}$ становится равным 1, и следовательно, $Q = \frac{Q_0}{1} = Q_0$. Однако, в этом случае не представляется возможным определить λ_1 . Нужен другой подход. Он основан на следующем, в пределе $\frac{1}{e^{\lambda_1 z_3}}$ должно стремиться к какому-то значению $A_{и}$, при чем при $z_3 = 1$. Вполне очевидно, что $A_{и}$ должно быть зависимым от Q_0 . Чем больше Q_0 , по-видимому большим должно быть и $A_{и}$. Усреднено принимаем $A_{и} = 0,08$. Таким образом, окончательно имеем:

$$Q = Q_0 e^{-2,5 \cdot z_3} \quad (10)$$

Используя эту зависимость, а также формулы (7) и (8) были получены данные, приведенные в таблице 1. Растительный экран анализировался на разных расстояниях от лесных полос в разные фенологические фазы развития растений [5].

Конечно, искомый растительный экран не только снижает потери, связанные с простым физическим испарением, но и имеет расход влаги через транспирацию, причем разный в разные фенологические фазы развития растений. В рамках же данной статьи www.avu.usaca.ru

ты из-за ограниченности места и возможностей мы остановимся лишь на первой составляющей, и не будем пока затрагивать транспирационную влагу. Это связано и со своеобразностью теоретической начинки, и некоторыми неопределенностями в биологической основе формирования растений [6, 7].

Сделанные расчеты показали, что защитный растительный экран выступает определенным регулятором влагодвижения. Он, с одной стороны, уменьшает непродуктивное физическое испарение, а с другой – переводит некоторым образом влагу для производства растительной массы через транспирацию. Отсюда вытекает одно очень важное обстоятельство, а именно то, что не так уже и безобиден недоучет фактора экрана во влагорегулировании. И еще на один момент следует обратить внимание. Данные таблицы 1 говорят о том, что чем быстрее сформируется растительный экран, тем больше влаги будет в почве для транспирационного расхода, а, следовательно, и производства зеленой растительной массы.

Необходимо остановиться и еще на одном моменте. Согласно курсу почвоведения [8, 9], можно предположить, что коэффициент λ_1 во многом будет определяться также скважностью почвы (если, конечно, его рассматривать в широком смысле), которая зависит, как известно, от многого. Прежде всего, она связана с механическим и структурным составом почвенного субстрата, его экономическими свойствами. На скважность влияют также ходы корней, насекомых, червей, гнезда муравьев и др. Наконец, она зависит от характера, времени и влажности обработки при сельскохозяйственных работах.

Вместе с тем, надо учитывать и то, что сама обшая скважность по себе не полной мере характеризует воздушные и водные свойства почвы, так как одна и та же ее величина может получаться при мно-

Таблица 2
Общая скважность почвы
Table 2
The total porosity of the soil

Почвы <i>Soils</i>	Общая скважность, % <i>The total porosity, %</i>
Песчаные <i>Sandy</i>	30–40
Супесчаные и суглинистые <i>Clay sand and loamy</i>	40–50
Глинистые <i>Clay soil</i>	50–60

жестве мелких пор и малости крупных. Но свойства почв с мелкими и крупными порами совершенно разные. Поэтому, нужно учитывать два вида скважности – капиллярную и некапиллярную. Надо помнить, что наилучшее соотношение между водой и воздухом в почве получается при капиллярной скважности несколько меньшей половины от общей ее величины, которая вычисляется по формуле.

$$P_{\text{общ}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{D}{d}\right), \quad (11)$$

где D – объемный вес почвы;

d – удельный вес почвы.

Испарение воды происходит с поверхности почвы и из полостей между структурными отдельностями (или механическими отдельностями) [10]. Поэтому величина испарения влаги, как отмечалось, зависит от структурного и механического состава, а косвенно и от скважности почвы, особенно капиллярной ее составляющей. Изменению испарения влаги, как показывает практика, способствует: распыленность поверхностного слоя почвы, ее окраска, уплотненность, неровность поверхности, растительный экран,

температура и влажность воздуха, ветер. Отсюда следует, что коэффициент λ_1 структурно очень сложный и его раскрытие еще требует много усилий. Но это уже дальнейшая перспектива.

Выводы. Растительный экран, изменяя плотность светового потока, тем самым существенно влияет на испарительный процесс, который зависит также от свойств почвы. Поэтому коэффициент λ_1 в эксперименте требует дальнейшего раскрытия. Влияние растительного экрана существенно зависит от площади, занимаемой отдельными его элементами, высоты растительности и ее оптической плотности. Параметры растительного экрана в различные фазы развития растений существенно различаются. Поэтому количество влаги, теряемой с физическим испарением, по фенологическим фазам развития растений будет различаться. В статье рассматривается только процесс физического испарения. Хотя это и важная составляющая влагопотерь из почвы, но она не решает в целом задачи расхода влаги на формирование растительной массы. Дальнейшие разработки должны быть направлены по двум направлениям – уточнено данной модели и разработке транспирационной составляющей влагопотерь из почвы, которая должна быть привязана к фенологическим фазам развития растений.

Рекомендации. Реализовать в математической форме, раскрытие коэффициента λ_1 и сделать идентификационные расчеты при использовании широкого спектра, влияющих на λ_1 факторов. Сравнить расчетные данные с фактическими, полученными на конкретных природных объектах. Осуществить дальнейшее развитие модели по части транспирационной составляющей.

Литература

1. Турко С. Ю., Трубакова К. Ю. Математическое моделирование влагопотерь из почвы при отсутствии на ее поверхности на ее поверхности защитного растительного экрана // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 1. С. 81–87.
2. Васильев Ю. И., Волошенкова Т. В., Овечко Н. Н. Методология прогноза варьирования урожая зерновых культур в агролесоландшафте в связи с нестабильностью климатических характеристик // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 4. С. 54–57.
3. Васильев Ю. И. Эффективность систем лесных полос в борьбе с дефляцией почв. Волгоград, 2003. 176 с.
4. Павловский Е. С., Васильев Ю. И., Зайченко К.Н., и др. Агрлесомелиорация и плодородие почв. М. : Агропромиздат, 1991. 288 с.
5. Турко С. Ю., Васильев Ю. И., Сергеева И. С. и др. Оценка почвозащитного влияния лесных полос с учетом их возрастного аспекта при новых условиях землепользования на пашнях сухой степи Нижнего Поволжья // Аграрный вестник Урала. 2010. № 8. С. 64–66.
6. Франс Дж., Торли Дж. Математические модели в сельском хозяйстве. М. : Агропромиздат, 1987. 400 с.
7. Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г. И. Физиология древесных растений. М. : Лесная промышленность, 1974. 421 с.
8. Турко С. Ю., Власенко М. В., Кулик А. К. Математическое описание процессов роста и урожайности кормовых культур в аридных условиях // Вестник Башкирского ГАУ. 2016. № 2. С. 18–22.
9. Монин С. А. География почв. М., 1957. 287 с.
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Т. 2. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 310 с.

References

1. Turko S. Yu., Trubakova K. Yu. Mathematical modeling of moisture losses from the soil at absence on her surface on her surface of the protective vegetable screen // Way of increase in efficiency of the irrigated agriculture. 2017. № 1. С. 81–87.
2. Vasilyev Yu. I., Voloshenkova T.V., Ovechko N. N. Methodology of the forecast of variation of a grain yield of cultures in an agrolesolandschafta in connection with instability of climatic characteristics // Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2013. № 4. P. 54-57.
3. Vasilyev Yu. I. Efficiency of systems of forest strips in fight against deflation of soils. Volgograd, 2003. 176 p.
4. Pavlovsky E. S., Vasilyev Yu. I., Zaychenko K.N., et al. Agrarian and forest melioration and fertility of soils. M. : Agropromizdat, 1991. 288 p.
5. Turko S. Yu., Vasilyev Yu. I., Sergeyev I. S., et al. Assessment of soil-protective influence of forest strips taking into account their age aspect under new conditions of land use on arable lands of the dry steppe of Lower Volga area // Agrarian Bulletin of the Urals. 2010. № 8. P. 64-66.
6. Frans J., Torli J. Mathematical models in agriculture. M. : Agropromizdat, 1987. 400 p.
7. Lir H., Polster G., Fidler G. I. Physiology of wood plants. M. : Forest industry, 1974. 421 p.
8. Turko S. Yu., Vlasenko M. V., Kulik A. K. The mathematical description of processes of growth and productivity of forage crops in arid conditions // Messenger of the Bashkir SAU. 2016. № 2. P. 18-22.
9. Monin S. A. Geography of soils. M., 1957. 287 p.
10. Hrgian A. H. Physics of the atmosphere. Vol. 2. L. : Gidrometeoizdat, 1978. 310 p.