УДК 581.116.1

CC BY

DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-19-25

Результаты исследований влияния биоэнергетических факторов на повышение урожайности в растениеводстве

Александр Петрович Гришин, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, e-mail: 5145411@mail.ru;
Андрей Александрович Гришин, кандидат экономических наук, заведующий лабораторией, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;
Владимир Александрович Гришин, младший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Приведены предпосылки и результаты фундаментальных исследований, подтверждающие две гипотезы, касающиеся процесса формирования урожая и транспирации как основного биоэнергетического фактора плодородия. Транспирация есть термодинамический процесс в открытой самоорганизующейся системе, носящий диссипативный случайный характер. На транспирацию расходуется около 95 процентов потребляемой растением воды. (*Цель исследования*) Получить результаты, подтверждающие две гипотезы, согласно которым эффективность процесса формирования урожая обусловлена: транспирацией как биоэнергетическим фактором плодородия, фотосинтезной эксергией и тепловой эксергией. (*Методы и материалы*) Рассмотрены основные принципы самоорганизации термодинамических систем, а также методы экспериментальных исследований принципа подчинения параметру порядка, при котором переменная управления системы подчинена параметру порядка. Определили связь параметра порядка (тепловая эксергия солнечного излучения (СИ)) и переменной управления (транспирация). Значения коэффициентов корреляции этих двух процессов имеют величину, близкую к единице. Это подтверждает, что транспирация есть диссипативный самоорганизующийся процесс, лежащий в основе механизма транспирационного орошения. Выявили фрактальную размерность временного ряда транспирации огурца при естественном освещении, картофеля – при искусственном, а также их вероятностные характеристики: матожидание, среднеквадратическое отклонение и дисперсия. (*Результаты и обсуждение*) Получили подтверждение научной гипотезы о влиянии лимитирующих климатических факторов на теоретический предел продуктивности растений и фрактальной размерности транспирации как индикатора продукционных процессов в растениеводстве. (*Выводы*) Дополнили научную гипотезу о влиянии лимитирующих климатических факторов на теоретический предел продуктивности растений. Показали, что при искусственном интенсивном освещении всходов картофеля фрактальная размерность равна 1,1, а дисперсия временного случайного ряда транспирации снизилась более чем в 6 раз по сравнению с аналогичным временным рядом при естественном освещении СИ.

Ключевые слова: урожайность, растениеводство, плодородие, биоэнергетика, климатические условия, транспирация, эксергия, самоорганизация.

Для цитирования: Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Результаты исследований влияния биоэнергетических факторов на повышение урожайности в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N2. С. 19-25. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-19-25

Research Results of Bioenergetics Factors Influence on Crop Production Yields Increase

Alexandr Petrovich Grishin, Dr. Sc. (Eng.), leader researcher, Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: 5145411@mail.ru;
Andrey Alexandrovich Grishin, Ph. D. (Econ), head of laboratory, Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;
Vladimir Alexandrovich Grishin, junior researcher, Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The results of a fundamental research is presented confirming two hypotheses concerning the process of a crop harvest forming and transpiration as the two main bio-energetic factors of fertility. Transpiration is a thermodynamic process in an open self-organizing system, which has a dissipative random character. Transpiration consumes about 95 percent of the water consumed by the plant. (*Purpose of research*) The research objective is to obtain results confirming two hypotheses,

according to which the efficiency of the process of crop formation is due to transpiration as a bio-energy factor of fertility and its components: photosynthetic exergy and thermal exergy. (*Methods and materials*) The basic principles of thermodynamic systems self-organization, as well as methods of experimental studies of the principle of subordination to the parameter of the order in which the system control variable is dependent on parameter of the order. The relation of the order parameter (thermal exergy of solar radiation (SR)) and the variable control (transpiration) was determined. The values of the correlation coefficients of these two processes have a value close to one. This confirms that transpiration is a dissipative self-organizing process underlying the transpiration irrigation mechanism. It is revealed that a fractal dimension of a time series of transpiration of cucumber with natural light, a potato is artificial, and their probability characteristics: the mathematical expectation, standard deviation and variance. (*Results and discussion*) We received confirmation of the scientific hypothesis about the influence of limiting climatic factors on the theoretical limit of plant productivity and fractal dimension of transpiration as an indicator of production processes in crop production. (*Conclusions*) We put forward supplemental scientific hypothesis about the influence of limiting climatic factors on the theoretical limit of plant productivity. It was showed that under artificial light intensity of shoots of potatoes fractal dimension is equal to 1.1, and the variance of the temporary random number of transpiration series decreased more than 6 times compared to the same time series under natural light of SR.

Keywords: Yield, Crop production, Fertility, Bioenergy, Climatic conditions, Transpiration, Exergy, self-Organization.

For citation: Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Results of researches of influence of bioenergy factors in higher yields in crop production. *Sel'skokhosyaystvennye mashiny i tekhnologii.* 2018. Vol. 12; 2: 19-25. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-19-25. (In Russian).

Основным источником энергии, обеспечивающим формирование биомассы, в том числе урожая растений, является солнечная энергия E. Величина суммарной энергии, приходящейся в средних широтах на 1 га за вегетационный период, составляет более $20 \cdot 10^6$ МДж. Однако большая ее часть (35%) уходит на транспирацию и нагрев растений (14%), тогда как в процессе фотосинтеза аккумулируется лишь около 1% [1].

В системе формирования продуктивности растения за переменную порядка принят приток к растению энергии солнечного излучения (СИ) (точнее, ее часть, потенциально пригодная для фотосинтеза $\Delta e_ф$ и затрачиваемая растением на формирование продуктивности) – эксергия солнечного излучения. Эта величина представляет собой теоретический предел продуктивности растений и плодородия земельного угодия. Фотосинтезную эксергию солнечного излучения $\Delta e_ф$ упрощенно можно представить в виде выражения: $\Delta e_ф = 0{,}2\Delta\tau E$ (где $\Delta\tau$ [τ_1, τ_2] – исследуемый промежуток времени), согласно которому предел продуктивности растений составляет 20% [2].

Полнота использования растениями эксергии солнечного излучения в процессе фотосинтеза и формирования продуктивности урожая во многом зависит от динамики изменения различных факторов и благоприятности сочетания их во времени. Каждому виду растений присуща своя восприимчивость к воздействию внешних факторов, а значит, и зависимость скорости фотосинтеза и формирования урожая от климатических условий, свойств почв и других лимитирующих факторов, таких как облачность, ограничивающая приход СИ, или лимит действия устьичного аппарата растения и др.

Некоторые факторы (физико-механический состав почвы, температура и т.п.) сложно изменить техническими средствами, к тому же для этого требуются значительные затраты, в связи с чем их относят к типу неуправляемых. На другие, напротив, можно повлиять с помощью широко применяемых способов (например, на влагообеспеченность – поливом, на содержание макро- и микроэлементов в почве – внесением удобрений). Такие факторы относят к мелиорируемым.

Все факторы условно можно разделить на четыре группы:

– климатические неуправляемые;
– почвенные неуправляемые;
– климатические мелиорируемые;
– почвенные мелиорируемые.

К первым относят, например, приход энергии солнечного излучения, потенциально пригодной для использования растениями на проведение фотосинтеза (фотосинтезная эксергия) $E_ф$, и температуру воздуха; к последним – тепловую составляющую энергии солнечного излучения (тепловая эксергия E_m), влажность воздуха [2].

Очевидно, что при отсутствии или сокращении влияния лимитирующих воздействий продуктивность растений будет сокращаться.

Немаловажную роль в процессе химической реакции фотосинтеза играет тепловая составляющая СИ, обеспечивающая температурный оптимум реакции. И фотосинтезная эксергия, и тепловая составляющая как носители энергии относятся к биоэнергетическим факторам. Причем тепловую составляющую относят еще и к мелиорируемым факторам, поскольку растение само регулирует ее воздействие с помощью транспирации.

Основное назначение транспирации заключается в снижении температуры $t_л$ листа растения, воспринимающего суммарную энергию E солнеч-

ного излучения, за счет испарительного охлаждения и приближении $t_л$ к температурному оптимуму фотосинтеза $t_о$. На транспирацию расходуется около 95% потребляемой растением воды [3].

Снижение температуры листа на $\Delta T_о = t_л - t_о$ обеспечивает увеличение скорости фотосинтеза до максимальной. При этом растение как самоорганизующаяся структура, согласно принципу экстремальной энергетической самоорганизации (ПЭЭС) и следуя закону выживания (ЗВ), производит терморегуляцию листа, чтобы наиболее полно использовать свободную в отношении фотосинтеза часть энергии СИ – фотосинтезную эксергию.

В данной работе приведены результаты фундаментальных исследований, подтверждающие две научные гипотезы, касающиеся процесса транспирации как основного биоэнергетического фактора урожайности:

1. Транспирация есть самоорганизующийся термодинамический диссипативный процесс в открытой системе «растение – окружающая среда», позволяющий наиболее полно использовать фотосинтезную эксергию СИ в формировании урожая.

2. Частичное устранение или полное исключение влияния лимитирующих воздействий на климатические (прежде всего – биоэнергетические) факторы позволяет приблизить продуктивный потенциал растениеводческих культур к их теоретическому пределу и наиболее полно использовать фотосинтезную эксергию в формировании урожая.

Цель исследования – получение результатов, подтверждающих сформулированные выше научные гипотезы относительно процесса транспирации как основного биоэнергетического фактора урожайности и его составляющих: фотосинтезной эксергии и тепловой эксергии.

Методы и материалы. Рассмотрим процесс транспирации с позиций самоорганизации, для чего приведем основные признаки самоорганизации термодинамических систем [4, 5].

Для протекания процесса самоорганизации необходимо, чтобы имели место следующие признаки:

– открытая система должна находиться в сильно неравновесном состоянии;

– между элементами системы должна существовать сильная нелинейная связь, которая определяет коллективность, кооперативность, согласованность движения;

– кооперативность действия элементов системы должна осуществляться согласно принципу подчинения синергетики, при котором параметры управления системы подчинены переменной порядка;

– система должна иметь достаточно высокий уровень флуктуации, склонной к разрастанию и бифуркациям;

– приток энергии к системе должен обеспечить достижение системой критического состояния (точки бифуркации) с последующим выходом из этого состояния скачком по типу фазового перехода. Скачок характеризует образование новой диссипативной структуры, возникающей под действием термодинамических сил в системе, находящейся далеко от термодинамического равновесия и существующей только в режиме постоянной подпитки.

Важнейшими характеристиками диссипативных структур являются: время жизни, область локализации и фрактальная размерность.

Лист (а в некоторых случаях и растение в целом) является открытой самоорганизующейся структурой, в которой очевиден ряд вышеуказанных признаков.

Транспирацию можно отнести к самоорганизующемуся процессу, протекающему в нелинейной открытой динамической структуре, при наличии двух признаков: принципа подчинения синергетики и фрактальности процесса.

Испарение – это фазовый переход вещества из конденсированной фазы в газообразную на свободной поверхности жидкости в результате теплового движения ее молекул при температуре ниже точки кипения. Такая температура соответствует давлению газовой среды над указанной поверхностью. Это эндотермический процесс, при котором поглощается теплота фазового перехода, затрачиваемая на преодоление сил молекулярного сцепления в жидкой фазе и на работу расширения при превращении жидкости в пар.

Далее жидкость испаряется при постоянной температуре, которая характеризует стационарность неравновесного фазового перехода – испарения в открытой нелинейной динамической структуре транспирационного охлаждения. Здесь тепловая эксергия СИ является переменной порядка самоорганизующегося процесса транспирации и источником энергии внешней среды. При этом расход транспирации q_T служит параметром управления. Математически самоорганизующийся процесс транспирации можно записать в виде взаимосвязи переменной порядка и параметра управления:

$$(t_л - t_о)\, M_л C_л = E_m \subset q_m r_в, \qquad (1)$$

где $M_л$ – общая масса листьев; $C_л$ – удельная теплоемкость массы листьев; E_m – тепловая эксергия СИ; $r_в$ – удельная теплота испарения воды.

Приведенная зависимость определит экстремальную энергетическую целенаправленность самоорганизующегося процесса транспирации.

Нагрев листа в зависимости от прихода суммарной энергии СИ происходит в процессе преобразования в тепловую энергию той ее части, которая представляет собой тепловую эксергию солнечного излучения E_m.

Определим тепловую эксергию СИ, используя

теорию фотометрии, преобразовав величины светоотдачи солнца $CO_{солн}$= 93 лм/Вт и светового потока СИ – $\Phi_{сол}$= $3{,}63 \cdot 10^{28}$ лм.

Тогда мощность нагрева освещенного листа $P_л$ (Вт) рассчитаем как:

$$P_л = \frac{OS_л}{CO_{солн}}, \quad (2)$$

где O – освещенность листа, лк; $S_л$ – площадь освещенного листа, м^2; $CO_{солн}$ – световая отдача солнца, лм/Вт.

Подставив величину $CO_{солн}$ в формулу тепловой энергии, получим:

$$E_m = P_л \tau_{осв} = (O \cdot S_л / CO_{солн}) \tau_{осв} = 1{,}1 \cdot 10^{-2} O \cdot S_л \tau_{осв}, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где $\tau_{осв}$ – время действия СИ, с.

При расчетах необходимо учитывать ограниченность действия и неравномерность СИ в течение суток. В этой связи примем время действия СИ для июля с 4 до 20, а неравномерность учтем через коэффициент 0,28, равный среднеинтегральной плотности действия СИ в течение суток [6].

Тогда выражение (3) примет вид:

$$E_m = 1{,}1 \cdot 10^{-2} OS_л \tau_{осв} = 17{,}0 \cdot 10^{-2} OS_л, \text{ кДж}. \quad (4)$$

Проведя расчеты, получим величину тепловой эксергии, скомпенсированной в процессе транспирационного испарения воды с поверхности листа и снижения температуры на величину ΔT_o.

Отсюда связь параметра порядка и параметра управления будет выражена как:

$$17{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot OS_л = E_m \subset q_m r_в. \quad (5)$$

Насколько тесна эта связь, а, следовательно, соблюден принцип подчинения, определим через коэффициент корреляции между процессами облучения (получением растением тепловой эксергии) и транспирации как механизма поддержания ΔT_o у рассады огурца, фасоли и всходов картофеля.

Фрактальность процесса транспирации, представленного временными рядами, определяем для рассады огурца, фасоли и всходов картофеля.

Фрактальную размерность рассчитываем по методике фрактального (R/S)-анализа, или по методу нормированного размаха [7-11].

Из всех лимитированных факторов выберем для исследований приход энергии СИ, потенциально пригодной к использованию растениями для фотосинтеза. Определим зависимости характеристик временного ряда транспирации от внешних воздействующих условий на примере всходов картофеля. Измерим изменения массы растения, площади листового покрова, массы раствора посредством транспирационного испарения в зависимости от прихода эксергии оптического светового излучения (ОСИ). Проведем два опыта по исследованию процесса транспирации:

– для растения в естественных условиях при периодической облачности и постоянной температуре окружающей среды;

– для растения под искусственным световым излучением с освещенностью 32,5 клк и преобладанием синего и красного частей спектра.

Измерения проводим по авторской методике [7].

Транспирация будет иметь постоянное значение при постоянстве всех лимитированных (подвергшихся лимитирующему воздействию) факторов. И если хотя бы один будет меняться случайно, то и транспирация будет носить переменный случайный характер. Исследуем фрактальную размерность временного ряда транспирации при условии, когда все факторы отвечают естественным условиям, кроме освещенности. При этом процесс транспирации будет оставаться случайным, однако и в меньшей степени.

При искусственном освещении, согласно гипотезе о наиболее полном использовании фотосинтезной эксергии в формировании урожая при исключении влияния лимитирующих воздействий на биоэнергетические факторы, временной ряд транспирации будет иметь более детерминированную природу с минимальными случайными отклонениями. Его фрактальная размерность будет приближаться к 1,0. И наоборот, чем интенсивнее действие лимитирующих факторов, тем более случайный характер будет носить временной ряд транспирации, а его фрактальная размерность будет приближаться к 2,0. Его вероятностные характеристики также будут отличаться: дисперсия временного ряда во втором случае будет выше.

Исследуем случайные временные ряды транспирации при естественном и искусственном освещении и их вероятностные характеристики, для чего выделим детерминированную и случайную составляющие.

Далее исключим воздействие лимитирующих случайных факторов и для этого условия определим транспирацию, для чего учтем изменение расхода воды через растение под влиянием только этого фактора. Транспирация при воздействии искусственного постоянного освещения также постоянна: T = 1,46 г/дм^{2}ч. Опираясь на данные эксперимента, находим коэффициент корреляции между значениями временного ряда с постоянной величиной транспирации и значениями временного ряда роста площади листьев, измеренного в отсутствие случайных факторов. Тем самым определяем, насколько тесная связь между процессом изменения продуктивности растения и процессом транспирации в отсутствие действия лимитирующих факторов.

Для роста растения, исследуемого в экспериментах, характерно изменение его массы, площади ли-

стового покрова, его массы и раствора посредством транспирационного испарения, которое, в свою очередь, обусловлено действием параметра порядка. Все эти процессы носят случайный самоорганизующийся характер. Следовательно, должна существовать связь между параметром порядка – тепловой эксергии E_m и переменной управления транспирацией T. Определим эту связь с помощью коэффициента корреляции между этими двумя процессами (*таблица 1*).

Table 1 Таблица 1

Коэффициенты корреляции между процессами нагрева листьев и охладительной транспирации
The correlation coefficients between the process of heating the leaves and cooling transpiration

Культура Culture	Коэффициент корреляции The correlation coefficient
Огурцы (рассада) Cucumber seedlings	0,73
Фасоль (рассада) Planting beans	0,84
Картофель (всходы) germination of potatoes	0,91

Фрактальные размерности рассчитаем, используя экспериментальные данные временного ряда транспирации рассады огурца при естественном и всходов картофеля при искусственном освещении.

Отношение разности максимального и минимального значений транспирации R для заданного отрезка времени (длина лага n) к стандартному отклонению $S(\sigma)$, вычисленному для значений транспирации того же лага S, выразим как:

$$(R/S) = cn^{H}, \quad (6)$$

где c – константа, H – показатель Херста, связанный с фрактальной размерностью D соотношением $D = 2 - H$.

Результаты расчета показателя Херста для исследуемых образов огурца и картофеля представлены в *таблице 2*.

Фрактальная размерность во всех случаях близка к 1,0, что свидетельствует о преобладании детерминированной составляющей в структуре случайного временного ряда, характеризующего процесс транспирации всходов картофеля. На процесс транспирации воздействуют случайные факторы, среди которых могут быть доминирующие. Исследуем случайные временные ряды транспирации при естественном (результаты эксперимента с рассадой огурца с фрактальной размерностью ряда 1,35) и искусственном освещении (результаты эксперимента с всходами картофеля с фрактальной размерностью 1,13) и их вероятностные характеристики, для чего выделим детерминированную и случайную составляющие.

Table 2 Таблица 2

Результаты расчета показателя Херста
Hurst exponent calculation result

Культура Culture	Формула аппроксимации, $(R/S)_{ср}$ Approximating expression, $(R/S)_{sr}$	Достоверность аппроксимации, R_2 Approximation validity, R_2	Показатель Херста, H Hurst exponent, H	Фрактальная размерность Fractal dimension
Картофель Potato	$0{,}4371n^{0{,}8658}$	0,9954	0,8658	1,13
Огурец Cucumber	$0{,}5964n^{0{,}6506}$	0,9902	0,6506	1,35

За детерминированную составляющую примем линию тренда временного ряда транспирации. Случайную составляющую найдем вычитанием величин исходного временного ряда из значений тренда этого ряда. Далее определим вероятностные характеристики. Результаты вычислений СКО и дисперсии представлены в *таблице 3*.

Результаты и обсуждение. Значения коэффициентов корреляции (*таблица 1*) близки к 1,0. Следовательно, связь между параметром порядка и переменной управления достаточно высокая, что говорит о кооперативности действия элементов системы, то есть о выполнении третьего признака синергетики – соблюдении *принципа подчинения*, при котором параметры управления системы подчинены переменной порядка.

Далее рассмотрим фрактальные размерности временных рядов транспирации при естественном и искусственном освещении, *таблица 4*.

Фрактальная размерность при искусственном освещении близка к 1,0, что говорит о преобладании детерминированной составляющей в структуре случайного временного ряда, характеризующего процесс транспирации всходов картофеля. Проанализируем случайные временные ряды транспирации при естественном и искусственном освещении и их вероятностные характеристики при математическом ожидании, равном нулю, что характерно для центрированных составляющих, *таблица 3*.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) и дисперсия для искусственного освещения, где фрактальная размерность близка к единице, имеют малые значения, что свидетельствует о преобладании детерминированной составляющей в структуре случайного временного ряда. Среднеквадратическое отклонение и дисперсия центрированной случайной составляющей, где размерность значительно отличается от 1,0, имеют бóльшие величины, что говорит о преобладании случайной составляющей в структуре случайного временного ряда транспирации.

Для дальнейших исследований про-

Table 3 Таблица 3

Вероятностные характеристики случайных временных рядов транспирации при естественном и искусственном освещении
Random time series probabilistic characteristics of transpiration in natural and artificial lighting

Тип освещения, D Type of lighting, D	Центрирование по тренду Trend centering	
	среднеквадратическое отклонение mean square deviation	дисперсия dispersion
Естественное 1,35 Natural	0,70	0,49
Искусственное 1,13 Artificial	0,28	0,08

дукционных процессов в растении исключим воздействие случайных факторов и определим транспирацию, для чего рассчитаем изменение расхода воды через растение под действием освещенности. Транспирация при воздействии искусственного постоянного освещения также постоянна: $T = 1{,}46$ г/дм^{2}ч.

Коэффициент корреляции между значениями временного ряда с постоянной величиной транспирации и значениями временного ряда роста площади листьев, измеренного в отсутствии случайных факторов, равен 0,91, что означает высокую степень связи этих двух процессов и достаточно сильное влияние искусственного освещения как постоянного фактора на продукционные процессы в растении.

Другой немаловажный результат проведенных исследований касается связи фрактальной размерности транспирационных процессов и продуктивности растений, то есть коррелирования испарительного охлаждения и роста зеленной массы (*табл. 4*).

Ограничение воздействия случайных внешних факторов на транспирацию и продукционные процессы может привести к усилению корреляционной связи между транспирационными и продукционными процессами почти в 5 раз.

Выводы

Обнаружено новое свойство транспирации – испарительного охлаждения растения в ходе фотосинтеза: транспирация есть диссипативный случайный по характеру и самоорганизующийся термодинамический процесс в открытой системе. Показано, что существует характерная для процесса самоорганизации кооперативная связь параметра порядка E_m (нагрев листьев под действием тепловой эксергии СИ) и параметра управления T (охладительная транспирация). Так, коэффициенты корреляции между временными рядами E_m и T для рассады огурца, фасоли и всходов картофеля соответственно равны 0,73, 0,84 и 0,91, что подтверждает новое свойство процесса транспирации как диссипативного самоорганизующегося процесса, лежащего в основе механизма транспирационного орошения.

Получила дальнейшее развитие научная гипотеза о влиянии лимитирующих климатических факторов на теоретический предел не только продуктивности растений, но и плодородия земельного угодия.

Table 4 Таблица 4

Связь транспирационных процессов и продуктивности растений
Transpiration processes and plant productivity relation

Тип освещения Type of lighting	Коэффициент корреляции Correlation coefficient
Естественное Natural light	0,11
Искусственное Artificial light	0,53

Исследованиями выявлено, что процесс транспирации при сокращении влияния лимитирующих факторов на него как на показатель продукционных процессов будет носить более детерминированный характер. Его фрактальная размерность приближается к 1,0. И наоборот чем интенсивнее действие лимитирующих факторов, тем более случайный характер имеет временной ряд транспирации, и его фрактальная размерность приближается к 1,5.

Так, при искусственном интенсивном освещении всходов картофеля фрактальная размерность равна 1,1, а дисперсия временного случайного ряда транспирации снизилась более чем в 6 раз по сравнению с аналогичным временным рядом при естественном освещении СИ, где присутствуют лимитирующие факторы. Снижение дисперсии отразилось на таком показателе, как рост зеленой массы растения.

Ограничение воздействия случайных внешних лимитирующих факторов на продукционные процессы приводит к усилению корреляционной связи между транспирационными и продукционными процессами почти в 5 раз. Более полное ограничение воздействия случайных внешних лимитирующих факторов на продукционные процессы приводит к усилению корреляционной связи между транспирационными и продукционными процессами и росту последних. Коэффициент корреляции между значениями временного ряда с постоянной величиной транспирации и значениями временного ряда роста площади листьев равен 0,91, что означает высокую степень связи этих двух процессов и достаточно сильное влияние постоянного фактора – искусственного освещения на усиление продукционных процессов в растении.

Учитывая, что фрактальная размерность временного ряда транспирации для случая, когда все факторы будут отвечать естественным условиям кроме освещенности, равна 1,1 против 1,35 при естественном освещении, можно заключить, что фрактальная размерность может служить индикатором продукционных процессов в растении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жученко А.А. Обеспечение продовольственной безопасности России в XXI веке на основе адаптивной стратегии устойчивого развития АПК (теория и практика) // *Трибуна Академии наук*. Вып. N5. М.: Фонд «Знание им. С.И. Вавилова», 2008. 97 с.

2. Свентицкий И.И. Биоэнергетика в селекции, растениеводстве и биотехнологиях. М.: Высшая школа, 2008. С. 458-482.

3. Мудрик В.А., Свентицкий И.И. Биоэнергетические аспекты оценки влагообеспеченности растений. Пущино: Пущинский центр биологических исследований АН СССР, 1981. 23 с.

4. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 405 с.

5. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига, 2005. 248 с.

6. Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation “Solar Energy”. 2003; 74: 469-488.

7. Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Vodnyi rezhim rassady ogurcza, tomata i fasoli // *News of science and education*, 2017; 5: 53-60.

8. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 304 с.

9. Гришин А.П. Целенаправленность действия информации в транспирационном орошении // *Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства*: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 2. М.: ВИМ, 2015. С. 224-228.

10. Гришин А.П. Энергетические потоки процесса транспирации у растений // *Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства*: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 2. М.: ВИМ, 2015. С. 210-214.

11. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Агротехническое и экологическое обоснование эффективности (целесообразности) использования биоактивных технологических способовобработки почвы в системе машинных технологий для обработки залежей и запущенных угодий // *Система технологий в АПК России*: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики академика В.П. Горячкина. ВИМ, 2013. С. 127-130.

REFERENCES

1. Zhuchenko A.A. Obespechenie prodovol`stvennoj bezopasnosti Rossii v XXI veke na osnove adaptivnoj strategii ustojchivogo razvitiya APK (teoriya i praktika) // Tribuna Akademii nauk. Volume. N5. M.: Fondation «Znanie im. S.I. Vavilova», 2008: 97. (In Russian).

2. Sventiczkij I.I. Bioe`nergetika v selekcii, rastenievodstve i biotexnologiyax // Sel`*skoxozyajstvennaya biotexnologiya*. M.: Vysshaya shkola, 2008: 458-482. (In Russian).

3. Mudrik V.A., Sventiczkij I.I. Bioenergeticheskie aspekty` ocenki vlagoobespechennosti rastenij. Pushchino: Pushhinskij centr biologicheskix issledovanij AN SSSR, 1981: 23.

4. Haken G. Sinergetika. M.: Mir. 1980: 405. (In Russian).

5. Haken G. Informaciya i samoorganizaciya. Makroskopicheskij podxod k slozhny`m sistemam. M.: KomKniga, 2005: 248. (In Russian).

6. Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation “Solar Energy”, 74. 2003: 469-488.

7. Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Vodny`j rezhim rassady` ogurcza, tomata i fasoli // News of science and education, 2017; 5: 53-60. (In English)

8. Peters E. Fraktal`nyi analiz finansovyh rynkov. M.: Internet-trading, 2004: 304. (In Russian).

9. Grishin A.P. Celenapravlennost` dejstviya informacii v transpiracionnom oroshenii // *Intellektual`nye mashinnye texnologii i texnika dlya realizacii gosudarstvennoj programmy` razvitiya sel`skogo xozyajstva*: Sbornik nauchny`x dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii. Vol. 2. M.: VIM, 2015; 224-228. (In Russian).

10. Grishin A.P. Energeticheskie potoki processa transpiracii u rastenij // *Intellektual`nye mashinnye texnologii i texnika dlya realizacii gosudarstvennoj programmy` razvitiya sel`skogo xozyajstva*: Sbornik nauchny`x dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii. Vol. 2. M.: VIM, 2015: 210-214. (In Russian).

11. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Sizov O.A., Akhalaya B. Kh., Agrotechnical and environmental justification of efficiency (expediency) of the use of bioactive technological treatment soil in the system of machine technologies for processing deposits and neglected land // System of technologies in Russian agro-industry. Collection of scientific reports of the International scientific and technical conference dedicated to the 145 th anniversary of the birth of the founder of agricultural mechanics academician V.P. Goryachkin. VIM. 2013: 127-130.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.