

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ О ТЕПЛОБЕСПЕЧЕННОСТИ В СИСТЕМЕ  
«ПОЧВА - РАСТЕНИЕ - ВОЗДУХ»

И. И. Максимов, А.Р. Валиев, Е. П. Алексеев, Н. В. Максимов, И. В. Лукина

**Реферат.** В течение вегетационного периода культурные растения подвержены бифуркационным воздействиям, таким как засуха, заморозки, гололед, градобитие, ливневые дожди и т. д. Зависимость человечества от погоды достаточно велика. Цель работы - изучение искусственной бифуркации по теплообеспеченности растений в лабораторных условиях. Теплофизические характеристики взаимодействия системы «растение – почва – воздух» обусловлены радиационным теплообменом, включающего приход длинноволновых излучений атмосфера - растения и отраженного излучения растениями в атмосферу; приходом коротковолнового излучения солнечной радиации, используемой листьями растений для фотосинтеза и отражения части этой фотоактивной радиации; турбулентного теплообмена поверхности почвы с окружающим приземным воздухом; транспирационного теплообмена поверхности почвы с окружающим приземным воздухом; теплообмена в почве. Кроме этого солнечная радиация, достигающая поверхности склона имеет разный рассеивающий эффект на функционирование системы «растение – почва – воздух». Заметим, что растительный покров выполняет функцию теплоизоляции между атмосферой и почвой. Аналитическое определение теплообеспеченности растений достаточно сложно вследствие недостаточности данных, входящих в эти выражения и невозможности определения экспериментально соответствующих коэффициентов. Поэтому методика бифуркационного подхода в первом приближении позволяет для конкретной водосборной площади проектировать технологии возделывания сельскохозяйственных культур как по морозоустойчивости, а так и применять мероприятия по защите от заморозков. Проверка устойчивости всходов растений к заморозкам проводилась в лабораторных условиях: посев и проращивание семян ячменя в одинаковых условиях в течении семи суток; помещение в холодильную камеру при  $-18^{\circ}\text{C}$ ; извлечение из холодильной камеры с интервалом 5 мин, максимальная продолжительность 50 мин; визуальное наблюдение за состоянием растений. Экспериментальные исследования показали, гибель растений от заморозков описывается уравнением регрессии  $y = 0,0268x^2 - 0,3701x + 17,232$ . В результате исследований предложена бифуркационная функция, подтвержденная лабораторными экспериментами.

**Ключевые слова:** теплообеспеченность растений, точки бифуркации, рост растений.

**Введение.** Для оценки и изыскания управленческих решений по продуктивности культурных растений представляется целесообразным рассмотреть функционирование системы «почва - растение – воздух» при отрицательных температурах окружающего приземного воздуха (заморозках) в весенне-летний период, т.е. бифуркации подсистемы «растение» по теплообеспеченности. Целесообразность данной работы вызвана также существенными колебаниями подсистемы «воздух» в результате прецессии, нутации, возникающих волн Россби – Блиновой, течения Эль – Ниньо и Ла – Нинья (заметим, что трехлетняя Ла – Нинья сменилась в 2023 году Эль – Ниньо).

Математическому моделированию функционирования системы «почва - растение – воздух» посвящен ряд работ. Теория бифуркации и динамическое моделирование рассмотрены в работах [1, 2, 3]. В частности в работе [4] предложено использовать бифуркацию Хопфа при взаимодействии растения с почвой. Принципы математического моделирования растений, побегов и корней в стрессовых ситуациях и теории катастроф отражены в работах [5, 6, 7]. Однако на сегодняшний день недостаточно разработан термодинамический подход в системе «почва - растение – воздух» [8, 9]. Находят применение принципы биологической оптимальности в работах [10, 11].

Анализ этих исследований показывает, что в предложенные аналитические зависимости входит ряд коэффициентов и переменных, обладающих достаточной трудоемкостью определения для отдельно взятого склона, а в большинстве случаев неопределенности экспериментального определения этих коэффициентов. Кроме того нет приборов и устройств, для определения величин этих коэффициентов. Поэтому применение бифуркационного подхода для разработки конструктивных устройств и средств, представляется актуальным. А в настоящей работе представлен аналитический (бифуркационный) подход и экспериментальная проверка в лабораторных условиях.

Величины критических отрицательных температур воздуха для растений известны, но противоречивы на конкретной водосборной площади. Как показывают визуальные наблюдения, физиологические особенности растений в период заморозков различны: часть растений погибает или вегетируют с задержкой своего развития на склонах разной экспозиции и крутизны. Устойчивость растений к критическим температурам и их последствия в связи с изменением климата рассмотрены в работе [12]. Объясняется на наш взгляд это тем, что солнечная радиация, достигающая поверхности склона имеет разный рассеивающий эффект на функционирование системы

«растение – почва – воздух», а подсистема «растение» выполняет функцию теплоизоляции между атмосферой и почвой.

Таким образом, реальный ход температуры приземного воздуха для склонов разной экспозиции и крутизны предсказать достаточно сложно. Кроме того, имеющиеся исследования [13, 14] достаточно противоречивы.

Тепловой режим в приземном воздухе характеризуется температурным распределением в этом слое и температурным ходом во времени, турбулентным потоком тепла и теплоаккумуляцией в этом слое. Систематическому изучению динамики теплообмена посвящена монография Нерпина С.В. и Чудновского А.Ф. [15]. Изменение турбулентных потоков тепла по высоте растительного покрова по данным Г.В. Менжулина [16], Дубова А.С. и др. [17] зависит от распределения плотности фитоэлементов по вертикали, радиационных, водных и теплофизических характеристик. Определения количества тепла аккумулируемого или передаваемого посредством теплопроводности и конвекции между поверхностью почвы и покрытой растительностью и атмосферой рассмотрены в работе [18]. Для прогнозирования изменения температуры почвы в процессах аккумуляции и теплообмена разработаны математическая модель [19] и искусственная нейронная сеть [20]. Г.В. Менжулин [16] предложил рассмотреть посев как двухуровневую среду, состоящую из распределенных по высоте элементов фитомассы и воздуха в межлистном пространстве.

Количественной оценке рационального режима посевов посвящено большое количество работ [16, 17, 21]. Исследованию процессов поглощению, рассеиванию, пропусканию и излучению радиации посевами различной архитектуры посвящены работы Ю.К. Росса [22] и Х.Г. Тооминга [23].

Поскольку почва представляет собой многофазную среду, то различают следующие виды теплопередачи [15]:

- контактный переход тепла;
- молекулярный переход тепла воздух – влага;
- тепловое излучение от частицы почвы к частице.

В зависимости от соотношения элемента «воздух – частица почвы – влага» может обладать тот или иной вид теплопередачи.

Поэтому размещение растений разных видов по стойкости к критическим температурам (например, морозоустойчивости) на склонах разной крутизны и экспозиции должно быть выполнено на основе вышеприведенных теоретических предпосылок.

Таким образом, подводя итог краткому анализу взаимодействия системы «растение – почва – воздух» по теплообеспеченности можно предположить, что бифуркационный подход в первом приближении позволит для конкретной водосборной площади оценить и

проектировать те или иные технологии возделывания сельскохозяйственных культур как по морозоустойчивости, а так и применять мероприятия по защите от заморозков.

Однако для реализации этого предположения необходимо аналитически рассмотреть взаимодействие системы «растение – почва – воздух» и экспериментально подтвердить это предположение в лабораторных условиях. Следовательно, цель исследования - изучение искусственной бифуркации по теплообеспеченности растений в лабораторных условиях.

**Условия, материалы и методы.** В работе [1] для определения точек бифуркации растений было принято, что состояние системы «растение – почва – воздух» практически не отличается от состояния этой же системы в момент начала бифуркации  $p_3 \approx p_{биф}$ . Отсюда следует, что задавая системе разные по величине переменные параметры, можно получить те или иные ее состояния и наметить мероприятия для оценки и управления технологиями.

Рассмотрим вопросы по теплообеспеченности растений.

Коэффициент теплообеспеченности  $P_2$  для горизонтально расположенных сельскохозяйственных полей в работе [15] предложено определять по выражению

$$P_2 = \frac{(C_6 \Delta T_2)_{вз} + (C_p^p \Delta T_2)_{рз} + (C_n \Delta T_2)_{нз} + \lambda \frac{\Delta T_2}{\Delta x} \Big|_{x=a}}{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qz}^{(H)}} \quad (1)$$

где  $(C_6 \Delta T_2)_{вз}$  – аккумуляция тепла воздуха в стеблестое, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $C_6$  – теплоемкость единицы объема воздуха в стеблестое, Дж/(м<sup>3</sup>·с·К);  $\Delta T_2$  – ход температуры в стеблестое, К/м;  $(C_p^p \Delta T_2)_{рз}$  – аккумуляция тепла растений, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $C_p^p$  – теплоемкость единицы объема растительной массы;  $(C_n \Delta T_2)_{нз}$  – содержание тепла корнеобитаемого слоя (от 0 до  $a$ ), Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $C_n$  – теплоемкость единицы объема почвы корнеобитаемого слоя (от 0 до

$a$ ) Дж/(м<sup>3</sup>·с·К);  $\lambda \frac{\Delta T_2}{\Delta x} \Big|_{x=a}$  – поток тепла в почву начиная с глубины  $x = a$ , Дж/(м<sup>2</sup>·с),  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности почвы в слое  $(a - \infty)$ , Вт/(м·К);  $Q_{сз}^{(H)} + Q_{qz}^{(H)}$  – суммарная коротковолновая и длинноволновая радиации, приходящие из атмосферы к верхнему уровню стеблестоя, Дж/(м<sup>2</sup>·с).

Очевидно, что коэффициент теплообеспеченности  $P_2$  для склонов разной крутизны и экспозиции по аналогии работы [15] может быть определен по формуле

$$P_3 = \frac{(C_6 \Delta T_3)_{вз} + (C_p^p \Delta T_3)_{рз} + (C_n \Delta T_3)_{нз} + \lambda \frac{\Delta T_3}{\Delta x} \Big|_{x=a}}{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qz}^{(H)}} \quad (2)$$

В выражении (2) величины с индексом “э”, отражают различные экспозиции и крутизны склонов. Необходимо отметить, что величина  $P_3$ , вычисляемая по выражению (2) имеет

множество значений в зависимости от экспозиции и крутизны склонов.

Поскольку входящие в формулу (2) величины для склонов различной крутизны и экспозиции разные, то их влияние на коэффициент теплообеспеченности  $P_3$  представляется целесообразным учесть обобщенным коэффициентом крутизны и экспозиции склонов  $\alpha_{кэ}$ :

$$\alpha_{кэ} = \frac{P_3}{P_2} \quad (3)$$

В первом приближении коэффициент  $\alpha_{кэ}$  может быть найден следующим образом.

Допустим, что  $(C_6, C_p^p, C_n, \lambda)_{горизонтальная}$  поверхность почвы  $\approx (C_6, C_p^p, C_n, \lambda)_{склон}$ , то можно записать [24]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{(C_6 \Delta T_3)_{вз}}{(C_6 \Delta T_7)_{вз}} &\approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_7} \right)_6 \\ \frac{(C_p^p \Delta T_3)_{pз}}{(C_p^p \Delta T_2)_{pз}} &\approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_p \\ \frac{(C_n \Delta T_3)_{nз}}{(C_n \Delta T_2)_{nз}} &\approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_n \\ \lambda \frac{\Delta T_3}{\Delta x} \Big|_{x=a} &\approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_{x=a} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом (1), (2) и (4) выражение (3) примет вид:

$$\alpha_{кэ} = \frac{\left[ (C_6 \Delta T_7)_{вз} \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_7} \right)_6 + (C_p^p \Delta T_2)_{пз} \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_p + (C_n \Delta T_2)_{нз} \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_n + \lambda \frac{\Delta T_3}{\Delta x} \Big|_{x=a} \right] \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_{x=a}}{(C_6 \Delta T_7)_{вз} + (C_p^p \Delta T_2)_{пз} + (C_n \Delta T_2)_{нз} + \lambda \frac{\Delta T_3}{\Delta x} \Big|_{x=a}} \times \left[ \frac{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}}{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}} \right] \quad (5)$$

Таким образом, выражение (5) позволяет определить  $\alpha_{кэ}$ , зависящего в основном от со-

отношений  $\left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_{6, p, n, x=a}$ ,  $\frac{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}}{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}}$  и теплофизических характеристик  $C_6, C_p^p, C_n$  и  $\lambda$ .

Следует заметить, что изучению взаимодействия растение – окружающая среда посвящены многочисленные исследования в самых различных областях науки: физиологии, агроклиматологии, биологии и т.д. Наибольшее количество работ носит чисто эмпирический характер, например применение геометрических характеристик растений, в частности форму листьев и стеблей, пространственную их ориентировку и угол наклона листьев для описания взаимодействия растений с окружающей средой. Однако биометрические факторы, как отмечает А.Ф. Чудновский [15] “неудобны” для описания теплообмена на

сельскохозяйственном поле. Тем не менее, имеется ряд работ, посвященных построению количественных моделей: квазистационарная модель М.И. Будыко, Л.С. Гандина и Г.В. Менжулина, теория нестационарного теплообмена в растительном ансамбле О.Д. Сиротенко и В.А. Горбачева, упрощенная модель А.Ф. Чудновского, Д.А. Куртенера и др. В этих работах описание теплового режима в системе «растение – почва – воздух» основано на решении дифференциальных уравнении теплового баланса при соответствующих граничных условиях и ряде допущений. Анализ этих направлений количественной оценки показывает, что считается заданной временной ход температуры на уровне деятельной поверхности, а на большой высоте предполагается, что температурные колебания воздуха затухают, причем на уровне высоты растений  $H$  действие солнечной радиации максимально, а в растительном покрове и корнеобитаемом слое вертикальный профиль температуры претерпевает резкие скачки.

Учитывая изложенное, можно записать:

$$\left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_6 \approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_p \approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_n \approx \left( \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \right)_{x=a} \approx \frac{\Delta T_3^{(H)}}{\Delta T_2^{(H)}} \quad (6)$$

где  $\Delta T_3^{(H)}, \Delta T_2^{(H)}$  - изменение температуры за период наблюдений на верхнем уровне  $H$  растений, произрастающих соответственно на склонах и на горизонтальной поверхности.

С учетом (6) выражение (5) упроститься

$$\alpha_{кэ} = \frac{P_3}{P_2} \approx \frac{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}}{Q_{сз}^{(H)} + Q_{qз}^{(H)}} \Delta T_3^{(H)} \Delta T_2^{(H)}. \quad (7)$$

Величины, входящие в (2), (5) и (7), могут быть экспериментально определены. Некоторые результаты таких исследований приведены ниже. Для проверки устойчивости растений к заморозкам в лабораторных условиях нами были посеяны семена ячменя по 5 зерен в каждый стаканчик с одинаковой массой почвы и влажности. После появления всходов в течение 7 суток растения содержались в комнатных условиях (при  $t=20^\circ\text{C}$ ). Затем стаканчики с растениями в фазе активного роста по 10 штук подвергались морозному воздействию с разным интервалом времени в холодильной камере с температурой воздуха  $-18^\circ\text{C}$ . Каждые 5 минут из холодильной камеры вынимался стаканчик с растением таким образом, что продолжительность заморозки десятого стаканчика составила 50 минут. Повторность опытов 60 кратная.

**Результаты и обсуждение.** Лабораторные исследования по функционированию системы «почва - растение – воздух» при отрицательных температурах воздуха (заморозках) показали, что подсистема «растение» характеризуется гибелью и существенным замедлением роста.

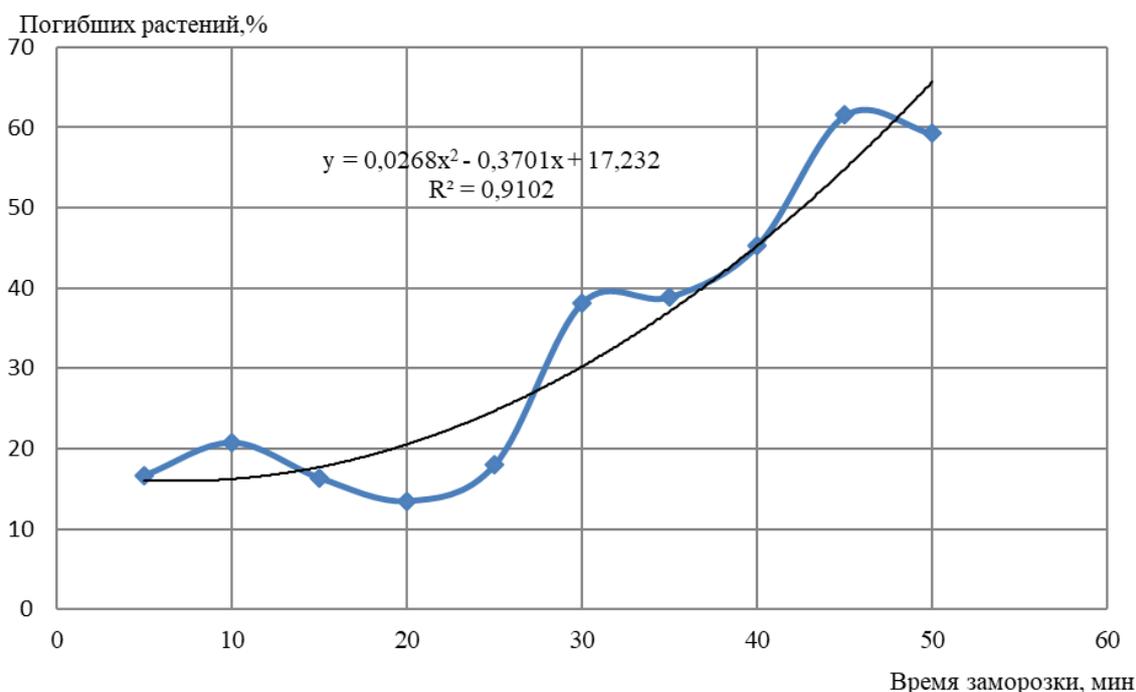


Рис. 1 – Количество погибших растений от времени заморозки

Гибель растений под действием отрицательной температуры в холодильной установке отражена на рисунке 1, а в таблице 1 приведены те же результаты лабораторных исследований, проведенных в 2022 и 2023 годах.

Таблица 1 – Результаты лабораторных исследований по заморозке растений

№	Дата	Растение	Время заморозки, мин.									
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	07.11.22	Взошло/Погибло	4/3	4/1	3/1	2/0	3/1	5/5	2/2	4/4	4/4	4/4
2	11.12.22		5/5	5/4	4/4	3/2	5/4	4/4	5/4	3/3	3/3	4/4
3	24.12.22		4/0	5/0	5/0	5/1	3/0	5/2	5/5	5/4	5/5	5/5
4	08.01.23		5/0	5/1	5/1	5/0	4/1	5/3	5/5	5/4	5/5	5/5
5	26.01.23		4/1	5/2	4/0	3/0	5/2	4/1	2/1	5/4	4/2	5/4
6	08.04.23		3/0	2/0	5/0	2/0	3/0	4/1	5/0	4/0	2/1	3/0
7	05.06.23		4/0	3/0	2/0	3/0	4/1	4/0	4/1	1/0	4/2	4/1
8	07.06.23		4/0	5/0	4/0	5/0	5/0	3/3	4/0	5/0	3/0	2/0
9	15.06.23		4/0	3/0	2/0	5/1	2/0	3/0	5/0	5/0	5/3	3/1
10	23.06.23		5/0	5/1	4/1	5/1	5/0	5/1	3/0	3/0	4/1	4/0
11	01.07.23		5/0	3/2	3/1	5/0	5/0	5/1	5/1	4/2	5/3	5/2
12	08.07.23		4/0	4/0	3/0	4/0	2/0	5/0	4/1	4/2	4/0	5/2
13	21.07.23		3/0	4/0	5/0	5/2	4/0	3/0	5/1	5/1	4/3	5/4
Сумма подходов			54/9	53/11	49/8	52/7	50/9	55/21	54/21	53/24	52/32	54/32
Среднее арифм.			4,2/0,7	4,1/0,8	3,8/0,6	4,0/0,5	3,8/0,7	4,2/1,6	4,2/0,6	4,1/1,8	4,0/2,5	4,2/2,5

Таким образом, анализ полученных данных показал, что при отрицательной температуре в холодильной камере -18°C количество погибших растений с увеличением времени заморозки от 5 до 50 минут возрастает.

Совокупное влияние отрицательной температуры на функционирование подсистемы «растение» приведено на рис. 2, которое представляет бифуркационную функцию роста и гибели растений.

Анализ графика показывает, что в благоприятных условиях происходит ежедневный прирост биомассы растения, а при

воздействии отрицательной температуры на седьмые сутки (точка бифуркации) у одной группы испытуемых растений кривая роста биомассы существенно замедляется, что характерно для области 1, а у второй группы (область 2) наблюдается снижение биомассы, свидетельствующая о гибели растений. Такой процесс может быть объяснен большим перепадом температур в процессе замерзания и последующем разморозании. Следует так же отметить, что приведенный экспериментальный материал подтверждает

методику бифуркационного подхода и ментальных исследований на конкретных существенно упрощает проведение экспери- водосборных площадях (см. выражение (7).

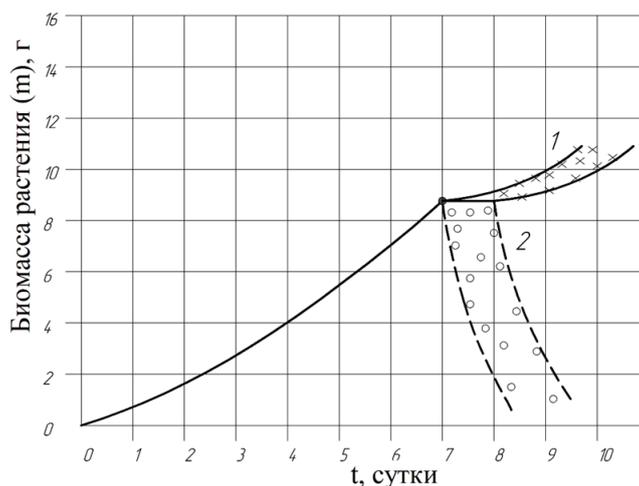


Рис.2 – Бифуркационная функция роста (1) и гибели (2) растения от заморозка

Как выше отмечалось в зависимости от крутизны и экспозиции склона предельные значения отрицательных температур по высоте склона существенно отличаются. А значит, растения расположенные на склонах подвергнутся воздействиям различных критических значений по времени и по температуре. Поэтому полученные экспериментальные данные, следовательно, и бифуркационная функция позволяет применять управленческие решения по проектированию и размещению культурных растений на склонах.

**Выводы.** 1. Полученное выражение (7)

позволяет упростить проведение экспериментальных исследований по теплообеспеченности системы «почва - растение – воздух» на реальных склонах различной экспозиции и крутизны.

2. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях подтвердили, что гибель растений при критических температурах  $-18^{\circ}\text{C}$  для данного эксперимента описывается уравнением регрессии  $y = 0,0268x^2 - 0,3701x + 17,232$ , а совокупность поведение подсистемы «растение» под морозным воздействием подчиняется бифуркационной функции.

#### Литература

1. Определение точек бифуркации в функционировании системы «почва - растение - воздух» / И. И. Максимов, М. Н. Калимуллин, Е. П. Алексеев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 2(70). С. 94-101. – doi 10.12737/2073-0462-2023-94-101.
2. Журавлева В.В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений // Известия Алтайского государственного университета. 2008. № 1 (57). С. 43-57.
3. Bessonov N., Volpert V. Dynamical Models of Plant Growth. Mathematics and Mathematical modeling. // Mathematics Subject Classification. 2000. P. 63.
4. Marasco A., Giannino F. Modelling competitive interactions and plant–soil feedback in vegetation dynamics // Ricerche di Matematica. 2020. 69(1). doi: 10.1007/s11587-020-00497-6.
5. Smithers E.T., Luo J., Dyson R.J. Mathematical principles and models of plant growth mechanics: from cell wall dynamics to tissue morphogenesis // Journal of Experimental Botany. 2019. Vol. 70. No. 14. P. 3587–3600. doi: 10.1093/jxb/erz253.
6. Mathematical Modeling of the Dynamics of Shoot-Root Interactions and Resource Partitioning in Plant Growth / C. Feller, P. Favre, A. Janka, et al. // Plos one. 2015. 10(7). doi: 10.1371/journal.pone.0127905.
7. Арнольд В.И. Теория катастроф. - М.: Наука, 1990. - 128 с.
8. Prigogine I., Wiame J. M. Biologie et thermodynamique des phenomenes irreversibles // Experientia. 1946. Vol. 2. No. 11. P. 451-453.
9. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
10. Розен Р. Принцип оптимальности в биологии. М.: Мир, 1969. 215 с.
11. Kaur D. Bifurcation induced by delay parameter in plant growth dynamics // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. URL: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2267/1/012031> (дата обращения: 21.04.2023). doi: 10.1088/1742-6596/2267/1/012031
12. Agricultural Engineering Technologies in the Control of Frost Damage in Permanent Plantations / V. Tadić, K. Gligorević, Z. Mileusnić, et al. . AgriEngineering, 2023. 5, P. 2079–2111.
13. Гольцберг И.А. Климатическая характеристика заморозков и методы борьбы с ними в СССР [Текст] / И.А. Гольцберг; под ред. Юдина М. И. - Ленинград : Гидрометеоиздат, Труды Главной геофизической обсерватории ; вып. 17 (79). - 1949. - 112 с.
14. Snyder R. L. Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics // Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005. pp. 223.
15. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух. –

Л. Гидрометеиздат, 1975, -359 с.

16. Менжулин Г.В. К методике расчета метеорологического режима в растительном сообществе. Метеорология и гидрология, 1970, № 2, с. 92–99.

17. Дубов А.С. Турбулентность в растительном покрове / А.С. Дубов, Л.П. Быкова, С.В. Марунич. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1978. - 183 с.

18. Estimation of soil thermal properties using conduction and conduction–convection heat transfer equations in the Brazilian Pampa biome / Zimmer, T., Souza, V. de A., Romio, L. C. et al. // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023. 338, 109517. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192323002083#preview-section-cited-by> (дата обращения 11.10.2024). doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109517.

19. Zhu F., Zhou Y., Zhu S. Experimental study on heat transfer in soil during heat storage and release processes. *Heat. Mass. Transfer*. 2021. 57, P. 1485–1497. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-021-03045-6> (дата обращения 11.10.2024).

20. Wardani A. K., Purqon A. Thermal conductivity prediction of soil in complex plant soil system using artificial neural networks // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2016. Т. 739. №. 1. С. 012007.

21. Agrotool - a system for crop simulation / R. A. Poluektov, S. M. Fintushal, I. V. Oparina, et al. // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2002. Vol. 48(6). P. 609–635.

22. Росс Ю.К. К математическому описанию роста растений // Доклады Академии наук СССР. 1966. Т. 171. №2. С. 481–483.

23. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая [Текст] / Х.Г. Тооминг. - Москва : Гидрометеиздат, 1977. - 197 с.

24. Функционирование системы "растение – почва – воздух" / И. И. Максимов, В. И. Максимов, С. А. Васильев, В. В. Алексеев // Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства, Киров, 12–14 декабря 2018 года. – Киров: ООО "Кировская областная типография", 2018. – С. 54–63.

#### Сведения об авторах:

Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: [maksimov48@inbox.ru](mailto:maksimov48@inbox.ru)

Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия

Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, профессор, чл.-корр. АН РТ, ректор, e-mail: [ayrat-valiev@mail.ru](mailto:ayrat-valiev@mail.ru)

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

Алексеев Евгений Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: [zhenia\\_alex@mail.ru](mailto:zhenia_alex@mail.ru)

Максимов Никита Владимирович – аспирант, e-mail: [w.nik213@yandex.ru](mailto:w.nik213@yandex.ru)

Лукина Ирина Васильевна – аспирант, e-mail: [iv\\_rabota@inbox.ru](mailto:iv_rabota@inbox.ru)

Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия

#### SOME QUESTIONS ABOUT HEAT SUPPLY IN THE SOIL-PLANT–AIR SYSTEM

I. I. Maksimov, A. R. Valiev, E. P. Alekseev, N. V. Maksimov, I. V. Lukina

**Abstract.** During the growing season, cultivated plants are subject to bifurcation effects such as drought, frost, ice, hail, heavy rains, etc. The dependence of mankind on the weather is quite large. The purpose of this work is to study artificial bifurcation by heat supply of plants in laboratory conditions. The thermophysical characteristics of the interaction of the plant-soil-air system are due to radiation heat exchange, which includes the arrival of long-wave radiation from the atmosphere - plants and reflected radiation from plants into the atmosphere; the arrival of short-wave radiation from solar radiation used by plant leaves for photosynthesis and reflection of part of this photoactive radiation; turbulent heat exchange of the soil surface with the surrounding surface air; transpiration heat exchange of the soil surface with the surrounding surface air; heat exchange in the soil. In addition, solar radiation reaching the slope surface has a different scattering effect on the functioning of the plant-soil-air system. Note that the vegetation cover performs the function of thermal insulation between the atmosphere and the soil. The analytical determination of the heat supply of plants is quite difficult, especially on slopes of different steepness and exposure, due to both the insufficiency of the data included in these analytical expressions, as well as the uncertainty (impossibility) of determining experimentally appropriate coefficients. Therefore, the technique of the bifurcation approach allows, as a first approximation, to design certain technologies for cultivating crops for a specific catchment area, both in terms of frost resistance, and to apply measures to protect against frost. The stability of plant seedlings to frost was checked in laboratory conditions: sowing and germination of barley seeds under the same conditions (according to ambient temperature and soil moisture) for seven days; placing in a refrigerator at -18°C; extraction from the refrigerator at intervals of 5 minutes, maximum duration of 50 minutes; visual monitoring of the condition of plants. Experimental studies have shown that the death of a plant from frost is described by the regression equation  $y = 0,0268x^2 - 0,3701x + 17,232$ . As a result of the research, a bifurcation function has been proposed, confirmed by laboratory experiments.

**Key words:** heat supply of plants, bifurcation points, growth.

#### References

1. Maksimov II, Kalimullin MN, Alekseev EP. [Determination of bifurcation points in the functioning of the “soil - plant – air” system]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; Vol.18. 2(70). 94–101 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2023-94-101.

2. Zhuravleva VV. [Mathematical models of regulatory processes in plant physiology]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2008; 1 (57). 43–57 p.

3. Bessonov N, Volpert V. Dynamical models of plant growth. *Mathematics and mathematical modeling. Mathematics Subject Classification*. 2000; P. 63 p.

4. Marasco A, Giannino F. Modelling competitive interactions and plant-soil feedback in vegetation dynamics. *Ricerche di Matematica*. 2020; 69(1). doi: 10.1007/s11587-020-00497-6.

5. Smithers ET, Luo J, Dyson RJ. Mathematical principles and models of plant growth mechanics: from cell wall dynamics to tissue morphogenesis. *Journal of Experimental Botany*. 2019; Vol.70. 14. 3587–3600 p. doi: 10.1093/jxb/erz253.

6. Feller C, Favre P, Janka A. Mathematical modeling of the dynamics of shoot-root interactions and resource partitioning in plant growth. *Plos one*. 2015; 10(7). doi: 10.1371/journal.pone.0127905.

7. Arnold VI. Teoriya katastrof. [Theory of catastrophes]. Moscow: Nauka. 1990; 128 p.
  8. Prigogine I, Wiame JM. Biologie et thermodynamique des phenomenes irreversibles. *Experientia*. 1946; Vol.2. 11. 451-453 p. French.
  9. Prigozhin I, Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur. [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow: Mir. 2002; 461 p.
  10. Rozen R. Printsip optimalnosti v biologii. [The principle of optimality in biology]. Moscow: Mir. 1969; 215 p.
  11. Kaur D. Bifurcation induced by delay parameter in plant growth dynamics. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022; [cited 2023, April 21]. Available from: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2267/1/012031>. doi: 10.1088/1742-6596/2267/1/012031
  12. Tadic V, Gligorevic K, Mileusnic Z. Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations. *AgriEngineering*. 2023; 5. 2079-2111 p.
  13. Goltsberg IA. Klimaticheskaya kharakteristika zamorozkov i metody borby s nimi v SSSR. [Climatic characteristics of frosts and methods of combating them in the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat. Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii. 17 (79). 1949; 112 p.
  14. Snyder RL. Frost protection: fundamentals, practice and economics. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2005; 223 p.
  15. Nerpin SV, Chudnovskiy AF. Energo- i massoobmen v sisteme rastenie-pochva-vozdukh. [Energy and mass transfer in the plant-soil-air system]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1975; 359 p.
  16. Menzhulin GV. [On the methodology for calculating the meteorological regime in a plant community]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1970; 2. 92-99 p.
  17. Dubov AS, Bykova LP, Marunich SV. Turbulentnost v rastitelnom pokrove. [Turbulence in vegetation cover]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978; 183 p.
  18. Zimmer T, Souza V. de A, Romio LC. Estimation of soil thermal properties using conduction and convection-heat transfer equations in the Brazilian Pampa biome. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 338. 109517. [cited 2024, October 11]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192323002083#preview-section-cited-by>. doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109517.
  19. Zhu F, Zhou Y, Zhu S. Experimental study on heat transfer in soil during heat storage and release processes. *Heat Mass Transfer*. 2021; 57. 1485-1497 p. [cited 2024, October 11]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-021-03045-6>.
  20. Wardani AK, Purqon A. Thermal conductivity prediction of soil in complex plant soil system using artificial neural networks. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2016; Vol.739. 1. 012007 p.
  21. Poluektov RA, Fintushal SM, Oparina IV. Agrotool - a system for crop simulation. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2002; Vol.48(6). 609-635 p.
  22. Ross YuK. [Towards a mathematical description of plant growth]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1966; Vol.171. 2. 481-483 p.
  23. Tooming KhG. Solnechnaya radiatsiya i formirovanie urozhaya. [Solar radiation and crop formation]. Moscow: Gidrometeoizdat. 1977; 197 p.
  24. Maksimov II, Maksimov VI, Vasilev SA, Alekseev VV. Funktsionirovanie sistemy "rastenie-pochva-vozdukh". Energoberegayushchie agrotekhnologii i tekhnika dlya severnogo zemledeliya i zhivotnovodstva. [Functioning of the "plant-soil-air" system. Energy-saving agricultural technologies and equipment for northern agriculture and animal husbandry]. Kirov. 12-14 dekabrya 2018 goda. Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya". 2018; 54-63 p.
- Authors:**  
Maksimov Ivan Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, e-mail: [maksimov48@inbox.ru](mailto:maksimov48@inbox.ru)  
Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia  
Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Rector, e-mail: [ayratvaliev@mail.ru](mailto:ayratvaliev@mail.ru)  
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia  
Alekseev Evgeniy Petrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, e-mail: [zhenia\\_alex@mail.ru](mailto:zhenia_alex@mail.ru)  
Maksimov Nikita Vladimirovich – post-graduate student, e-mail: [w.nik213@yandex.ru](mailto:w.nik213@yandex.ru)  
Lukina Irina Vasilievna – post-graduate student, e-mail: [iv\\_rabota@inbox.ru](mailto:iv_rabota@inbox.ru)  
Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia.