

Инфраниантные ритмы динамики нарастания побегов в клонах ивы трехтычинковой (*Salix triandra*)

А. А. Афонин¹✉

¹Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, Брянск, Россия

✉E-mail: afonin.salix@gmail.com

Аннотация. Цель исследования – гармонический анализ структуры сезонной динамики суточного прироста побегов в клонах ивы трехтычинковой (*Salix triandra*). **Методология и методы исследования.** Объект – модельная популяция, созданная черенкованием сибсовых семян из одной семьи, полученной путем регулярного инбридинга на протяжении трех поколений. Материал – растущие прутьевидные побеги. Экспериментальная группа – семь клонов из черенковых саженцев первого года жизни; повторность 6-кратная. Контрольная группа – семена из той же семьи на собственных корнях четвертого года жизни. Методы: сравнительно-морфологический, хронобиологический, численный анализ временных рядов. Наблюдения велись на протяжении вегетационного периода 2020 г. **Результаты.** Начало роста побегов – конец первой декады мая. Максимальный суточный прирост – в начале лета (06.06–14.06). Далее суточный прирост неравномерно снижался до конца августа. Сезонная динамика суточного прироста определяется взаимодействием линейных и нелинейных компонент. Линейные компоненты определяют сезонный тренд динамики суточного прироста. Аппроксимируются соответствующими уравнениями регрессии с различной надежностью. Нелинейные компоненты определяют цикличность сезонной динамики суточного прироста. Аппроксимируются суммами гармоник с периодом колебаний 9–144 суток с очень высокой надежностью. **Научная новизна.** Цикличность сезонной динамики суточного прироста определяется взаимодействием биоритмов с различными периодами. Субаннуальные биоритмы с периодом свыше 48 суток корректируют сезонные тренды суточного прироста. Инфраниантные биоритмы с периодом 9–36 суток определяют чередование пиков и провалов в сезонной динамике суточного прироста. Биоритмы с периодом 29–36 суток синхронизированы в экспериментальной и контрольной группах, но смещены по фазе при сравнении эксперимента и контроля. Биоритмы с периодом от 21 до 24 суток синхронизированы на всех исследованных побегах. Биоритмы с периодом 9–18 суток не синхронизированы, однако их результирующие колебания влияют на динамику суточного прироста в начале и в конце вегетационного периода.

Ключевые слова: ива трехтычинковая, *Salix triandra*, черенковые саженцы, однолетние побеги, суточный прирост, сезонная динамика, инфраниантные биоритмы, синхронизация биоритмов.

Для цитирования: Афонин А. А. Инфраниантные ритмы динамики нарастания побегов в клонах ивы трехтычинковой (*Salix triandra*) // Аграрный вестник Урала. 2021. № 02 (205). С. 2–11. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-205-02-2-11.

Дата поступления статьи: 15.01.2021.

Постановка проблемы (Introduction)

Ивы (*Salix* L.) – это центральный род семейства Salicaceae Mirb. (1815) порядка Malpighiales Juss. ex Bercht. & J. Presl (1820) отдела Magnoliophyta (Angiospermae) [1, с. 3]. Включает 450–520 видов с более чем 200 известными гибридами [2, с. 1]. Многие ивы находят применение в самых разнообразных областях человеческой деятельности благодаря таким качествам, как быстрый рост, способность к размножению черенками, стрессоустойчивость [3, с. 1]. Эти виды *Salix* и их гибриды культивируются с целью получения высококачественного прута для плетения, древесной биомассы и химического сырья, а также используются в различных экологических проектах, включая противоэрозионные и фиторемедиационные [4, с. 97], [5, с. 526].

Ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.) – широко известный представитель кустарниковых ив Старого Света. Традиционно относится к секции *Amygdalinae* Koch, 1837

(*Triandrae* Dum., 1825) подрода *Salix* Nas., 1936 (*Amerina* Dum., 1862) (s. l.) [6, с. 103–104]. По результатам молекулярно-генетических исследований таксон *Triandrae* заслуживает статуса самостоятельного подрода [7, с. 29], [8, с. 3571]. С цитогенетической точки зрения *S. triandra* – диплоид ($2n = 2x = 38$) [9, с. 176], размер генома составляет 386 Mb [3, с. 1]. Вследствие небольшого генома используется как модельный объект для получения новой ценной информации [10, с. 1].

Является признанной культурой, выращиваемой в режимах коппинга для изготовления корзиночных материалов [11, с. 1]. Используется для создания защитных насаждений, в т. ч. для фиторемедиации почв, загрязненных нефтепродуктами [12, с. 4723]. Отличный медонос [8, с. 3571]. Перспективный источник фармацевтического сырья [13, с. 318]. Традиционный объект лесной селекции [14, с. 1608]. Для создания устойчивых высокопродуктивных

культур *Salix* необходимо соблюдать правила подготовки посадочных мест, заготовки и посадки черенков, а также ухода за черенковыми саженцами [15, с. 257], [16, с. 796].

Деревья и кустарники демонстрируют богатое разнообразие ритмических явлений, которые обусловлены либо факторами окружающей среды, либо влиянием эндогенных осцилляторов [17, с. 1], причем синхронизация осцилляторов даже самого простого вида до сих пор не совсем понятна [18, с. 69]. Функции внешних синхронизаторов ритмов развития побегов могут выполнять как температурные факторы, так и изменение продолжительности светового дня [19, с. 278], [20, с. 5397]. У изученных видов *Populus* (Salicoids, Salicaceae) в зимующих почках обнаружено два типа метамеров. Вначале формируются ранние метамеры в базальной части побегов, а с формированием поздних метамеров начинается бурный рост основной части побегов [21, с. 699]. Ритм роста побегов древесных растений складывается из целой серии разных ритмов [22, с. 71]. Инфраниантные (многодневные) биоритмы достаточно хорошо изучены у животных с их сложными регуляторными системами, однако механизмы синхронизации этих биоритмов между разными особями недостаточно изучены [23, с. 152].

Изменчивости адаптивных и хозяйственно-ценных признаков в клонах *Salix* посвящен ряд исследований [24, с. 174], [25, с. 703]. Цель нашего исследования: – гармонический анализ структуры сезонной динамики суточного прироста побегов в клонах *S. triandra*.

Методология и методы исследования (Methods)

Исследования проводились в салицетуме Брянского государственного университета (53°16'23.50" с. ш., 34°21'11.50" в. д.). Объект – модельная инбредно-клоновая популяция *S. triandra*. Материал – растущие прутьевидные побеги на черенковых саженцах первого года жизни. Для создания модельной популяции использовалась разработанная нами система популяционно-клоновой селекции *Salix* [26, с. 18]. Родоначальники клонов – сибсы из генетически выровненной семьи, полученной путем регулярного инбридинга в трех семенных поколениях *S. triandra* [27, с. 22].

Модельное инбредно-клоновое насаждение создано весной 2020 г. путем посадки черенков, нарезанных из нижних частей маточных побегов сибсовых сеянцев-родоначальников. Количество клонов – 7, повторность – 6-кратная, общее число черенковых саженцев – 42. В качестве контроля использовались сибсы родоначальников клонов – четырехлетние сеянцы на собственных корнях (4 шт.). Каждый черенковый саженец формировался в один побег, каждый контрольный сеянец – в два побега на низком штамбе. Технология создания данного насаждения описана нами ранее [28, с. 19].

Наблюдения за развитием побегов проводили на протяжении вегетационного периода 2020 г.: с 09.05 по 29.08. Каждые 4 суток замеряли длину побегов: L , см. Выполнено 1217 измерений L . В итоге получили эмпирические траектории роста – $L(\vartheta)$, см – временные ряды, отражающие зависимость длины побегов L от календарной даты ϑ вегетационного периода 2020 г.

При описании временных рядов использовалась терминология, принятая в гармоническом анализе [29].

На основании рядов $L(\vartheta)$ вычислили ряды сезонной динамики суточного прироста побегов – $\Delta L(\vartheta)$, см/сут – выровненные временные ряды, отражающие зависимость суточного прироста побегов ΔL от календарной даты ϑ вегетационного периода 2020 г. При вычислении ΔL использовался метод скользящей рамки с интервалом 8 суток и шагом 4 суток. Вычислено 1117 значений ΔL .

Для анализа сезонной динамики суточного прироста побегов использовали алгоритм, подробно описанный ранее [30, с. 44]:

1. Вычисление линейных трендов динамики суточного прироста – $\Delta L(t)_{lin}$, см/сут.
2. Вычисление рядов отклонений суточного прироста от линейных трендов – $dL(t)$, см/сут.
3. Аппроксимация рядов отклонений $dL(t)$ суммами гармонических колебаний (гармоник) с периодом τ , сут.

Коэффициенты уравнений гармонических колебаний вычисляли итерационным методом, используя возможности MS Office Excel. Достоверность аппроксимации оценивали, используя F -критерий Фишера и коэффициент детерминации R^2 .

Результаты (Results)

В экспериментальных клонах активный рост побегов начался в конце первой декады мая. Самые слабые побеги (окончательная длина $L = 125 \dots 137$ см) завершили рост к 20.07. Часть побегов (окончательная длина $L = 125 \dots 193$ см) завершила рост к 05.08. Оставшиеся побеги (окончательная длина $L = 146 \dots 288$ см) продолжили рост до 25.08. В контрольной группе сеянцев активный рост побегов начался в первых числах мая и завершился к 29.08; окончательная длина побегов составила $L = 278 \dots 330$ см. Для дальнейшего анализа были использованы побеги саженцев экспериментальных клонов длиной 125...215 см (от 2 до 5 саженцев каждого клона) общим числом 27 шт. Предварительное описание сезонной динамики суточного прироста побегов дано нами ранее [28, с. 19].

Максимальный прирост побегов – 3,0...4,9 см/сут – выявлен в период с 06.06 по 14.06. При вычислении линейных трендов динамики $\Delta L(t)_{lin}$ за исходный день наблюдений ($t = 1$) была принята дата 06.06, предшествующая максимальным приростам. Надежность линейной аппроксимации варьируется в пределах $R^2 = 0,425 \dots 0,928$. Соответственно, влияние нелинейных (точнее, криволинейных) компонент на сезонную динамику суточного прироста побегов в летний период составляет 0,072...0,575. Линейные тренды суточного прироста побегов охарактеризовались отрицательной динамикой: расчетный суточный прирост убывает от 2,5...4,5 см/сут до 1,3 и менее см/сут. Фактор клона для линейных трендов не установлен.

Графики рядов отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов – $dL(\vartheta)$ – показаны на рис. 1 (клоны, представленные объемом в 5 саженцев, обозначены разными цветами: красным, зеленым, синим; средний ряд $\Delta L(\vartheta)_{av}$ показан маркерами ●; особые точки показаны увеличенными маркерами).

В экспериментальных клонах сезонная динамика $dL(\vartheta)$ носит циклический характер, обусловленный чередованием пиков и провалов dL . Фактор клона для рядов $dL(\vartheta)$ не установлен. Аналогичные закономерности сезонной динамики $dL(\vartheta)$ выявлены в контрольной группе сеянцев.

Эмпирические ряды с исключительно высокой надежностью – $P < 0,001$ (при девяти итерациях) – были аппроксимированы суммами гармоник с периодом колебаний τ от 9 до 144 суток. В соответствии с периодом колебаний гармоник было выделено две группы биоритмов развития побегов: субаннуальные (субсезонные, с периодом $\tau > 48$ суток) и инфрадианные (многодневные, с периодом $\tau = 9...36$ суток). Субаннуальные биоритмы, корректирующие сезонные тренды, в данном исследовании не анализировались.

Графики гармоник, аппроксимирующих инфрадианные биоритмы с периодом $\tau = 29...36$ суток, показаны на

рис. 2 (цветовая легенда та же, что на рис. 1; маркером + показаны графики контрольной группы сеянцев).

На всех побегах экспериментальных клонов биоритмы с периодом $\tau = 29...36$ суток синхронизированы между собой. Соответствующие графики в группе контрольных сеянцев значительно смещены на более поздние сроки. В результате рассматриваемые биоритмы экспериментальных клонов и контрольной группы сеянцев находятся в противофазе относительно друг друга.

Графики гармоник, аппроксимирующих инфрадианные биоритмы с периодом τ от 21 до 24 суток, показаны на рис. 3 (обозначения те же, что на рис. 2).

Биоритмы с периодом τ от 21 до 24 суток синхронизированы между собой и на побегах экспериментальных клонов, и на побегах контрольной группы сеянцев. Иначе биоритмы экспериментальных клонов и контрольной группы сеянцев находятся в синфазе относительно друг друга.

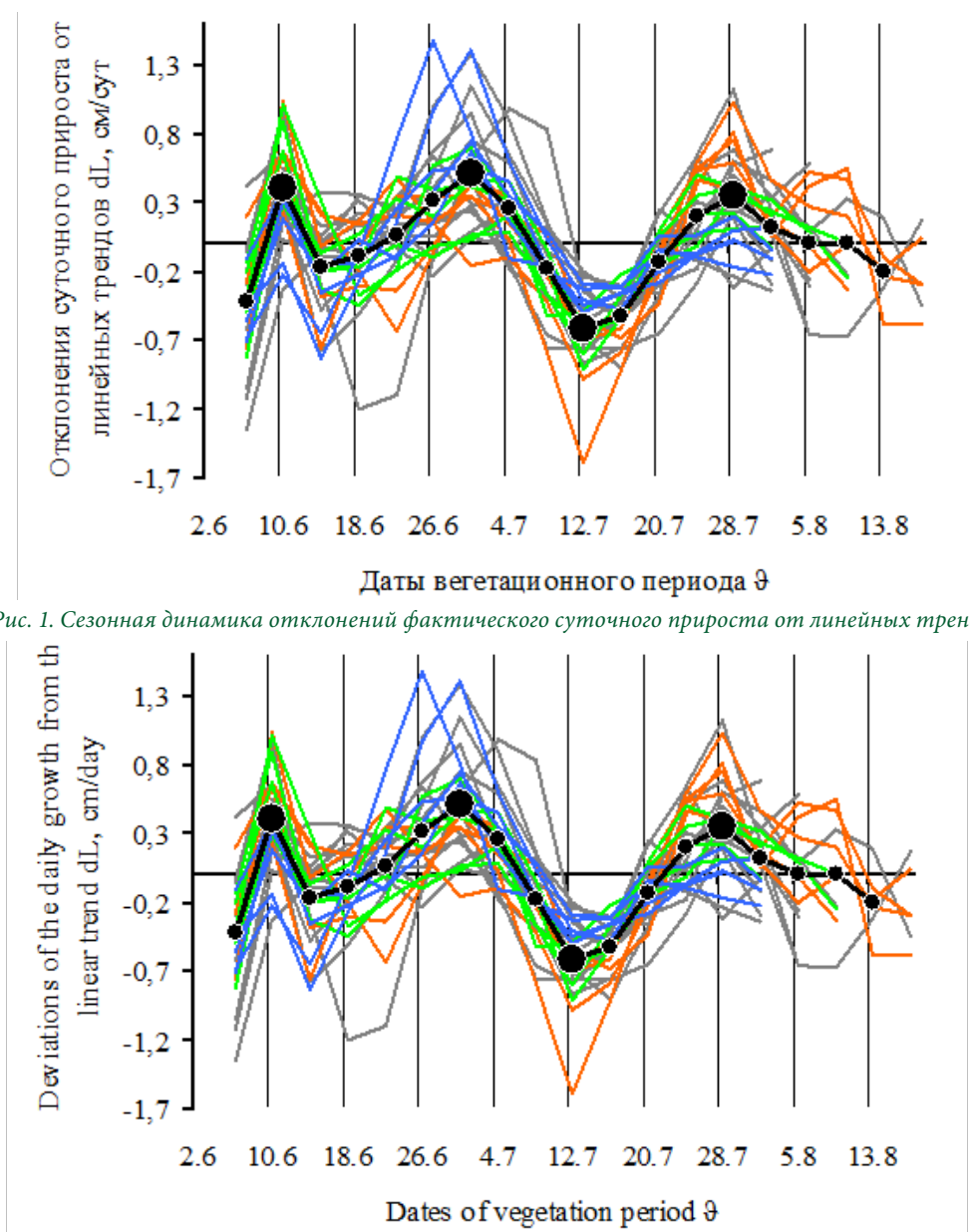


Рис. 1. Сезонная динамика отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов

Fig. 1. Seasonal dynamics of deviations of the actual daily growth from linear trends

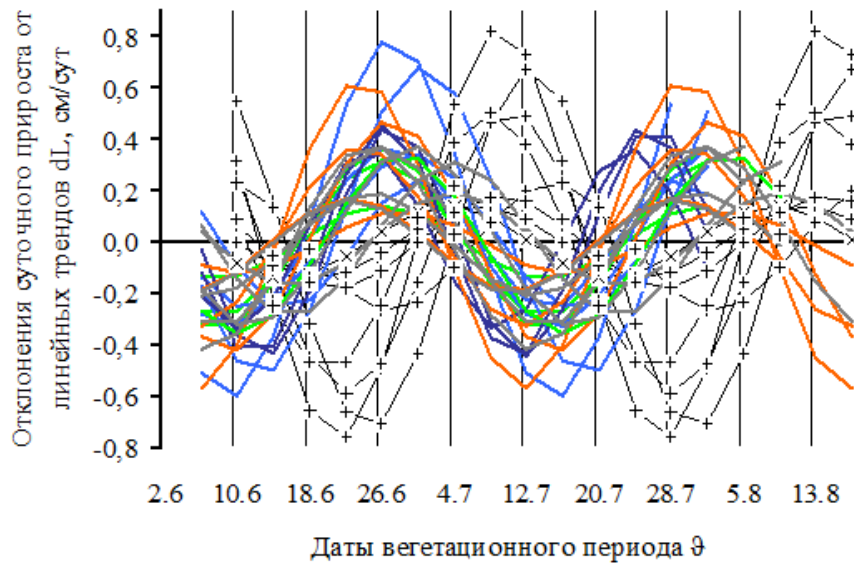


Рис. 2. Гармонические компоненты колебаний отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов с периодом $\tau = 29...36$ суток

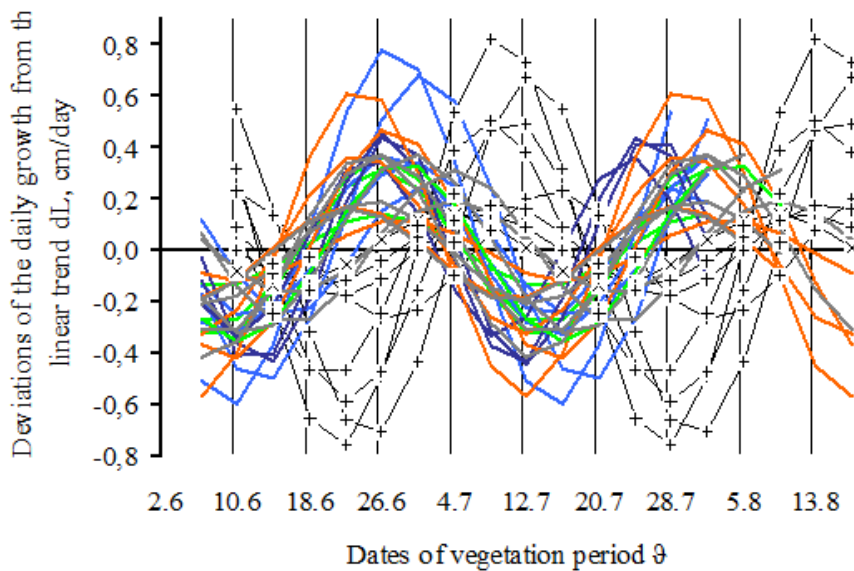


Fig. 2. Harmonic components of fluctuations of deviations of the actual daily increment from linear trends with a period $\tau = 29...36$ days

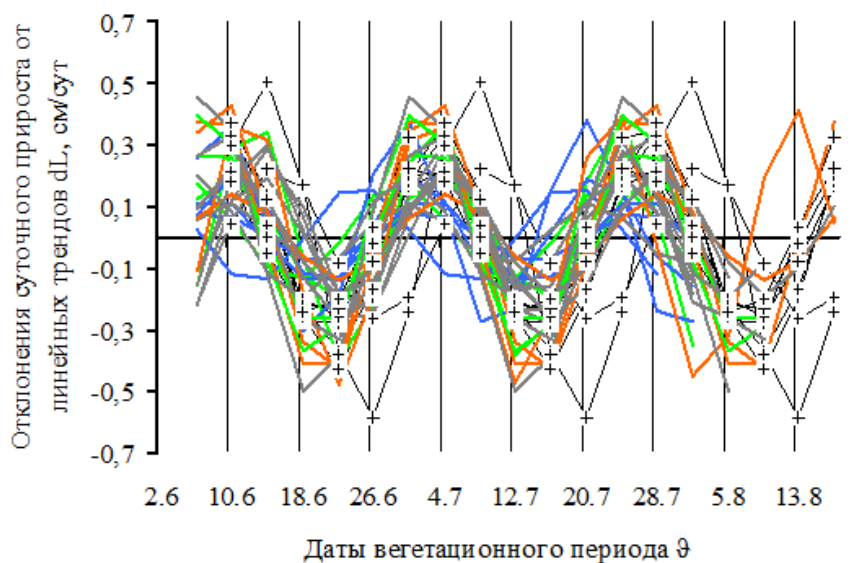


Рис. 3. Гармонические компоненты колебаний отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов с периодом τ от 21 до 24 суток

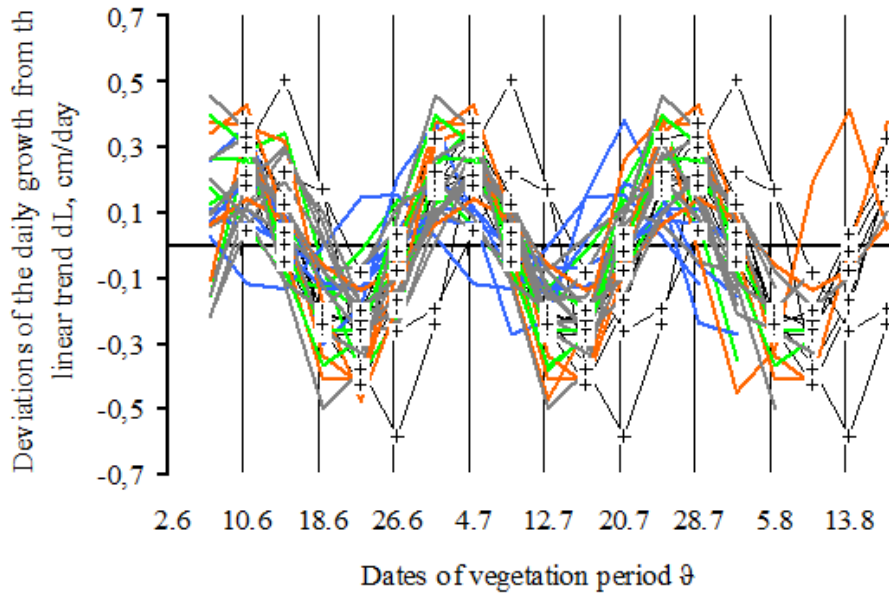


Fig. 3. Harmonic components of fluctuations of deviations of the actual daily increment from linear trends with a period $\tau = 21...24$ days

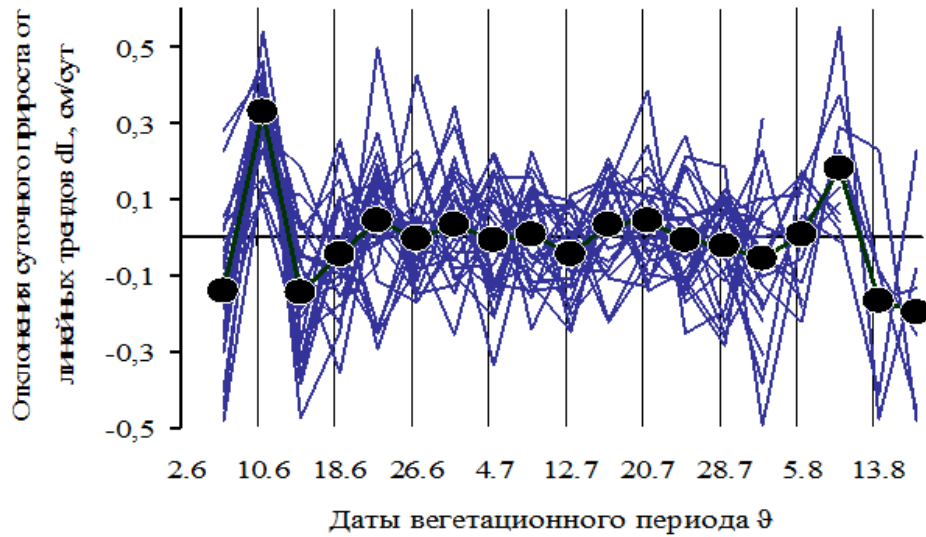


Рис. 4. Ангармонические компоненты колебаний отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов с периодом $\tau = 9...18$ суток

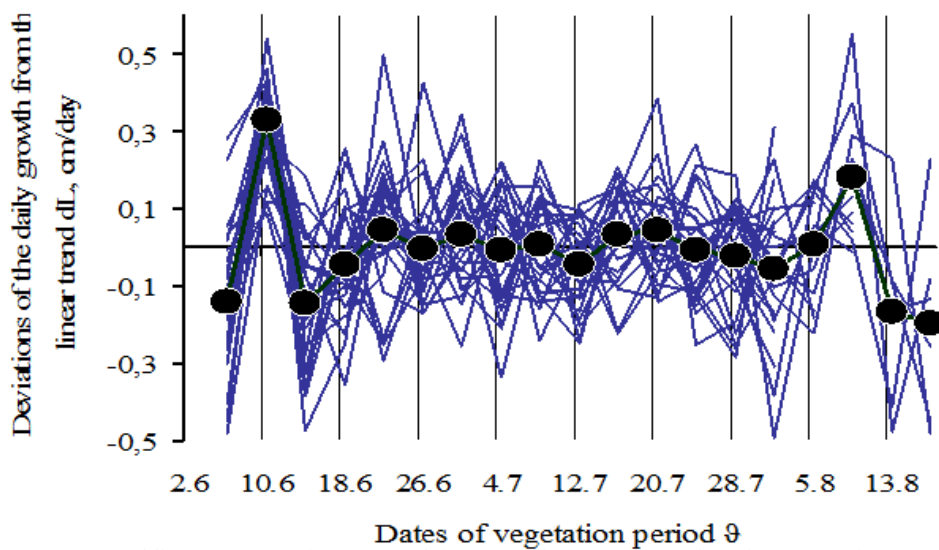


Fig. 4. Anharmonic components of fluctuations in deviations of the actual daily increment from linear trends a period $\tau = 9...18$ days

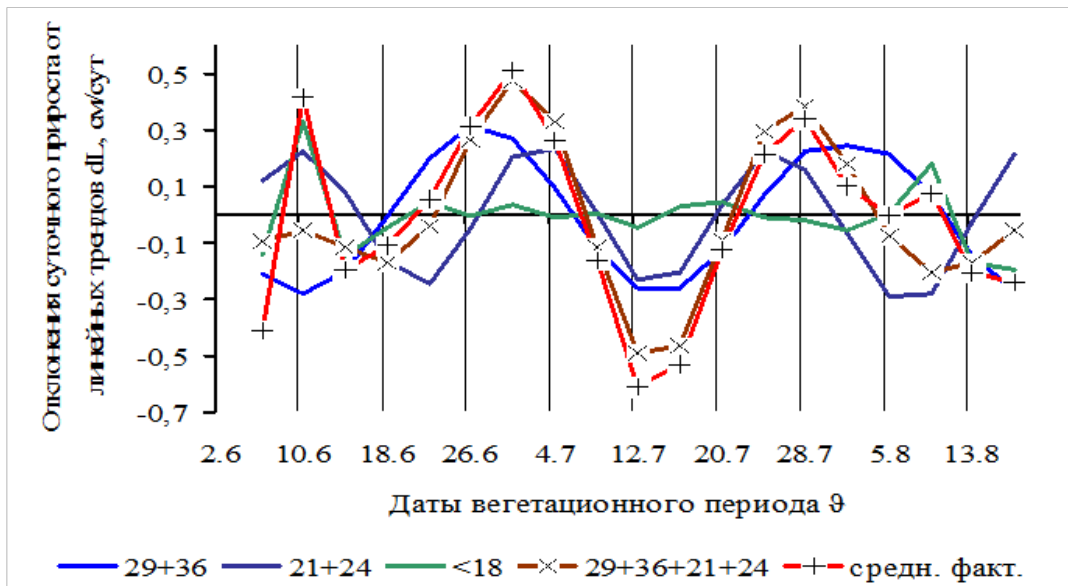


Рис. 5. Нелинейная структура сезонной динамики отклонений фактического суточного прироста от линейных трендов

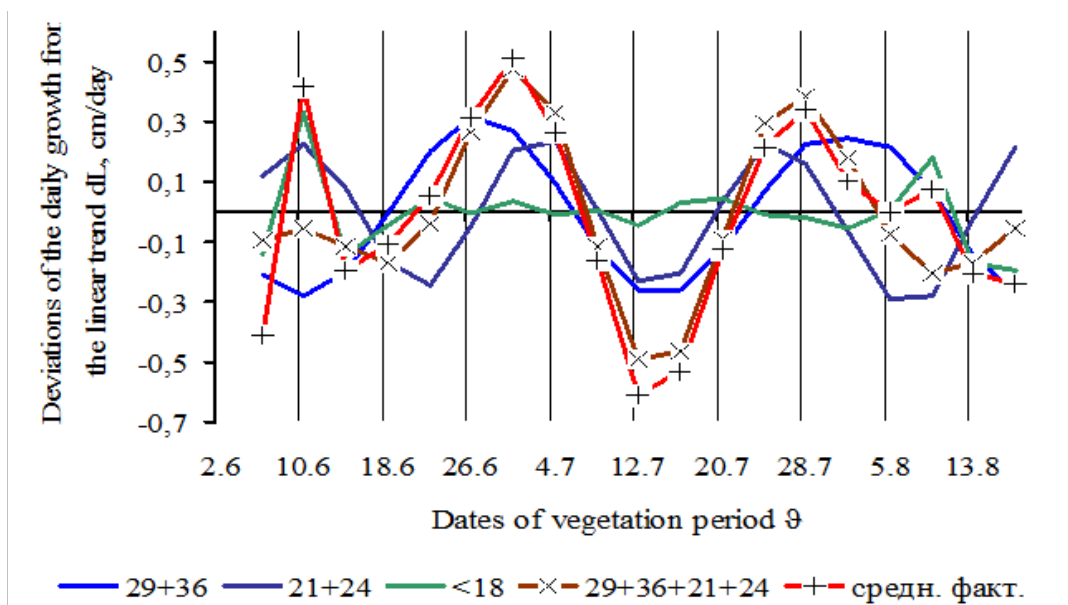


Fig. 5. Nonlinear structure of seasonal dynamics of deviations of the actual daily increment from linear trends

Графики результирующих колебаний, аппроксимирующих инфрадианные биоритмы с периодом $\tau = 9 \dots 18$ суток в экспериментальных клонах, показаны на рис. 4 (результирующие колебания на всех побегах показаны одним цветом, средний ряд показан маркером \bullet , побеги контрольных сеянцев не показаны).

Биоритмы, аппроксимируемые суммами гармоник с периодом $\tau = 9 \dots 18$ суток, хаотически смещены относительно друг друга. Однако в начале (10.06) и в конце (09.08) вегетационного периода эти биоритмы синхронизированы (находятся в положительной синфазе).

Средние временные ряды, вычисленные для каждой группы биоритмов, показаны на рисунке 5 (приведены графики фактического среднего ряда $dL(\vartheta)_{av}$ и результирующего ряда, полученного путем сложения высокоамплитудных гармоник).

На протяжении большей части вегетационного периода – с 14.06 по 05.08 – цикличность отклонений факти-

ческого суточного прироста от линейных трендов аппроксимируется суммой гармоник, отражающих существование инфрадианных биоритмов с периодами τ от 21 до 24 суток и от 29 до 36 суток. В результате взаимодействия этих гармоник возникают экстремумы: пик 30.06, провал 12.07...16.07 и пик 28.07. В интервале с 04.07 по 24.07 длиннопериодические гармоник синхронизированы (находятся в отрицательной синфазе). Пики 10.06 и 09.08 аппроксимируются гармониками с периодами $\tau = 9 \dots 18$ суток. Кроме того, пику 10.06 соответствует пик гармоник с периодами τ от 21 до 24 суток, однако вклад гармоник с периодами τ от 21 до 24 суток компенсируется противофазой гармоник с периодами $\tau = 29 \dots 36$ суток.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Ива трехтычинковая *S. triandra* выполняет важные экосистемные функции в природе и в разнообразных культурах [5] благодаря своей экологической пластичности и способности образовывать длинные прутьевидные побеги на черенковых саженцах уже в первые годы жизни [4].

В условиях данного эксперимента подтверждено, что в модельной популяции развитие побегов *S. triandra* носит циклический характер [27], [28]. Ряды сезонной динамики суточного прироста побегов однолетних саженцев в высшей степени синхронизированы. Можно предположить, что максимум суточного прироста в начале лета определяется мощным синхронизатором неизвестной природы. Возможно, этот синхронизатор определяет завершение развития ранних (преформированных) метамеров и начало развития поздних (примордиальных) метамеров.

Выявленная цикличность сезонной динамики суточного прироста обусловлена взаимодействием инфраничных (многодневных) биоритмов трех уровней: с периодами 29–36 суток, от 21 до 24 суток и 9–18 суток. Биоритмы с периодом 29–36 суток синхронизированы отдельно в экспериментальной группе клонов и отдельно в контрольной группе сеянцев. Можно предположить, что смещения по фазе биоритмов с данным периодом определяются фактором возраста корневых систем. Биоритмы с периодом от 21 до 24 суток синхронизированы на всех побегах: и в экспериментальной, и в контрольной группах. Можно предположить, что синхронизация биоритмов с указанным периодом определяется влиянием какого-то внешнего синхронизатора. Биоритмы с периодом 9–18 суток характеризуются низкими амплитудами и неупоря-

доченными смещениями по фазе. Однако при сложении этих колебаний возникает результирующий сигнал с двумя пиками. Можно предположить, что эти пики отражают существование некоторого синхронизатора, действующего в начале и в конце вегетационного периода.

Фактор клона (в сущности, генетический фактор), влияющий на цикличность сезонной динамики суточного прироста побегов, в данном исследовании не выявлен. Возможно, что заметное (но не единственное) влияние на цикличность сезонной динамики суточного прироста оказывает степень сформированности корневых систем. В остальном цикличность сезонной динамики суточного прироста определяется какими-то синхронизаторами неизвестной природы. Можно предположить, что в весенне-летний период таким синхронизатором является температурный фактор (например, накопленная сумма неких критических температур), а в позднелетний период – фактор фотопериодизма (что не исключает взаимодействие фотопериодизма с температурным фактором). Высказанные предположения не противоречат известным литературным данным [19, с. 278], [20, с. 5397], [31, с. 511], [32, с. 449].

Для верификации данной гипотезы нами разработана схема трехлетнего эксперимента, позволяющего сравнить ростовые реакции разновозрастных черенковых саженцев одних и тех же клонов в разные годы.

Библиографический список

1. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV // Botanical Journal of the Linnean Society. 2016. No. 181 (1). Pp. 1–20. DOI: 10.1111/boj.12385.
2. Wu J., Nyman T., Wang D.-C., et al. Phylogeny of *Salix* subgenus *Salix* s.l. (Salicaceae): delimitation, biogeography, and reticulate evolution // BMC Evolutionary Biology. 2015. No. 15. Article number 31. DOI: 10.1186/s12862-015-0311-7.
3. Zhang J., Yuan H., Li Y, et al. Genome sequencing and phylogenetic analysis of allotetraploid *Salix matsudana* Koidz // Horticulture Research. 2020. No. 7. Article number 201. DOI: 10.1038/s41438-020-00424-8.
4. Епанчинцева О. В., Тишкина Е. А., Мищикина Ю. Д. Динамика прироста ив при использовании различных агротехнических приемов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (84). С. 97–103. DOI: 10.37670/2073-0853-2020-84-4-97-103.
5. Fredette C., Labrecque M., Comeau Y., Brisson J. Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix* // Journal of Environmental Management. 2019. No. 246. Pp. 526–537. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.010.
6. Skvortsov A. K. Willows of Russia and adjacent countries. Taxonomical and geographical revision. Joensuu: University of Joensuu, 1999. 307 p.
7. Chen J. H., Sun H., Wen J., Yang Y.-P. Molecular phylogeny of *Salix* L. (Salicaceae) inferred from three chloroplast datasets and its systematic implications // Taxon. 2010. No. 59 (1). Pp. 29–37. DOI: 10.1002/tax.591004.
8. Wu D., Wang Y., Zhang L., Dou L., Gao L. The complete chloroplast genome and phylogenetic analysis of *Salix triandra* from China // Mitochondrial DNA Part B. 2019. No. 4 (2). Pp. 3571–3572. DOI: 10.1080/23802359.2019.1674743.
9. Macalpine W. J., Shield I. F., Trybush S. O., Hayes C. M., Karp A. Overcoming barriers to crossing in willow (*Salix* spp.) breeding // Biomass and Energy Crops III. Aspects of Applied Biology. 2008. No. 90. Pp. 173–180.
10. Li W., Wu H., Li X., Chen Y., Yin T. Fine mapping of the sex locus in *Salix triandra* confirms a consistent sex determination mechanism in genus *Salix* // Horticulture Research. 2020. No. 7. Article number 64. DOI: 10.1038/s41438-020-0289-1.
11. Noleto-Dias C., Wu Y., Bellisai, A., et al. Phenylalkanoid Glycosides (Non-Salicinoids) from Wood Chips of *Salix triandra* × *dasyclados* Hybrid Willow // Molecules. 2019. No. 24 (6). Article number 1152. DOI: 10.3390/molecules24061152.
12. Da Cunha A. C. B., Sabedot S., Sampaio C. H., Ramos C.G., da Silva A.R. *Salix rubens* and *Salix triandra* Species as Phytoremediators of Soil Contaminated with Petroleum-Derived Hydrocarbons // Water, Air & Soil Pollution. 2012. No. 223. Pp. 4723–4731. DOI: 10.1007/s11270-012-1228-z.
13. Санникова Е. Г., Попова О. И., Компанцева Е. В. Ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.) – перспективы и возможности использования в медицине и фармации // Фармация и фармакология. 2018. № 6 (4). С. 318–339. DOI: 10.19163/2307-9266-2018-6-4-318-339.

14. Kuzovkina Yu. A. Compilation of the checklist for cultivars of *Salix* L. (Willow) // HortScience. 2015. No. 50 (11). Pp. 1608–1609. DOI: 10.21273/HORTSCI.50.11.1608.
15. Verwijst T., Lundkvist A., Edelfeldt S., Forkman J., Nordh N.-E. Effects of clone and cutting traits on shoot emergence and early growth of willow // Biomass Bioenergy. 2012. No. 37. Pp. 257–264. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.12.004.
16. Edelfeldt S., Lundkvist A., Forkman J., Verwijst T. Effects of cutting length, orientation and planting depth on early willow shoot establishment // BioEnergy Research. 2015. No. 8. Pp. 796–806. DOI: 10.1007/s12155-014-9560-3.
17. Lüttge U., Hertel B. Diurnal and annual rhythms in trees // Trees. 2009. No. 23. Article number 683. DOI: 10.1007/s00468-009-0324-1.
18. Lloyd D. Oscillations, Synchrony and Deterministic Chaos // In: Progress in Botany, Lüttge U. et al. (eds). 2009. No. 70. Pp. 69–92. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-68421-3_4.
19. Junttila O. Apical Growth Cessation and Shoot Tip Abscission in *Salix*. Physiologia Plantarum. 1976. No. 38 (4). Pp. 278–286. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1976.tb04004.x.
20. Heide O. M. Temperature rather than photoperiod controls growth cessation and dormancy in *Sorbus species* // Journal of Experimental Botany. 2011. No. 62 (15). Pp. 5397–5404. DOI: 10.1093/jxb/err213.
21. Critchfield W. B. Leaf dimorphism in *Populus trichocarpa* // American Journal of Botany. 1960. No. 47. Pp. 699–711. DOI: 10.1002/j.1537-2197.1960.tb07154.x.
22. Mikhalevskaya O. B. Growth rhythms at different stages of shoot morphogenesis in woody plants // Russian Journal of Developmental Biology. 2008. No. 39 (2). Pp. 65–72.
23. Диагтропов М. Е., Панчелюга В. А., Станкевич А. А. Динамика смены первостепенного махового оперения у воробьиных птиц, возможные факторы синхронизации // Биофизика. 2020. Т. 65. № 1. С. 152–164. DOI: 10.31857/S0006302920010172.
24. Doffo G. N., Monteoliva S. E., Rodríguez M. E., Luquez V. M. C. Physiological responses to alternative flooding and drought stress episodes in two willow (*Salix* spp.) clones // Canadian Journal of Forest Research. 2017. No. 47. Pp. 174–182. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0202.
25. Welc M., Lundkvist A., Verwijst T. Effects of propagule phenology (non-dormant versus dormant) and planting system (vertical versus horizontal) on growth performance of willow clones grown under different weeding regimes // BioEnergy Research. 2018. No. 11 (3). Pp. 703–714. DOI: 10.1007/s12155-018-9929-9.
26. Фучило Я. Д., Афонин А. А., Сбитная М. В. Селекционные основы выведения новых сортов семейства Ивовые (*Salicaceae* Mirb.) для создания энергетических плантаций // Plant Varieties Studying and Protection. 2016. № 4 (33). С. 18–25.
27. Афонин А. А. Структурный анализ ритмов развития однолетних побегов ивы трехтычинковой // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 1. С. 22–32. DOI: 10.5281/zenodo.2539541.
28. Афонин А. А. Поливариантность морфогенеза побегов в клонах *Salix triandra* (*Salicaceae*) на фоне периодичности ливневых осадков // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. № 1. С. 19–32. DOI: 10.33619/2414-2948/62/02.
29. Васильев С. Н. Шевалдин В. Т. Гармонический анализ: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 80 с.
30. Афонин А. А. Хронобиологические аспекты оптимизации пестицидной нагрузки в насаждениях ивы корзиночной (*Salix viminalis* L.) интенсивного типа // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2019. № 2. С. 43–50. DOI: 10.36906/2311-4444/19-2/06.
31. Singh R. K., Svystun T., Aldahmash B., Jönsson A. M., Bhalerao R. P. Photoperiod- and temperature-mediated control of phenology in trees – a molecular perspective // New Phytologist. 2017. No. 213. Pp. 511–524. DOI: 10.1111/nph.14346.
32. Richards T. J., Karacic A., Apuli R. P., et al. Quantitative genetic architecture of adaptive phenology traits in the deciduous tree, *Populus trichocarpa* (Torr. and Gray) // Heredity. 2020. No. 125. Pp. 449–458. DOI: 10.1038/s41437-020-00363-z.

Об авторах:

Алексей Алексеевич Афонин¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ORCID 0000-0002-9392-2527, AuthorID 264352, +7 910 230 69 75, afonin.salix@gmail.com

¹Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, Брянск, Россия

Infradian rhythms of increment dynamics of shoots in clones of almond willow (*Salix triandra*)

A. A. Afonin¹✉

¹Bryansk State University named after academician I. G. Petrovskiy, Bryansk, Russia

✉E-mail: afonin.salix@gmail.com

Abstract. Purpose of research – harmonic analysis of the structure of seasonal dynamics of daily increment of shoots in almond willow (*Salix triandra*) clones. **Research methodology and methods.** Object is a model population created by cuttings

of sibs-seedlings from the same family obtained by regular inbreeding over three generations. Material – growing long shoots. Experimental group: seven clones of one-year saplings from cuttings; 6-fold repetition. Control group – seedlings from the same family on their own roots of the fourth year of life. Methods: comparative morphological, chronobiological, numerical analysis of time series. Observations were made during the growing season of 2020. **Results.** The beginning of the growth of shoots – the end of the first decade of May. The maximum daily increase is in early summer (06.06...14.06). Further, the daily growth decreased unevenly until the end of August. Seasonal dynamics of daily increment is determined by the interaction of linear and nonlinear components. Linear components determine the seasonal trend of daily increment dynamics. They are approximated by the corresponding regression equations with different reliability. Nonlinear components determine the cyclical nature of the seasonal dynamics of daily increment. They are approximated by sums of harmonics with an oscillation period of 9–144 days with very high reliability. **Scientific novelty.** The cyclical nature of the seasonal dynamics of daily increment is determined by the interaction of biorhythms with different periods. Subannual biorhythms with a period of more than 48 days correct seasonal trends of daily increment. Infradian biorhythms with a period of 9...36 days determine the alternation of peaks and dips in the seasonal dynamics of daily increment. Biorhythms with a period of 29...36 days were synchronized in the experimental and control groups, but shifted in phase when comparing the experiment and control. Biorhythms with a period of 21...24 days are synchronized on all the researched shoots. Biorhythms with a period of 9...18 days are not synchronized, but their resulting fluctuations affect the dynamics of daily increment at the beginning and end of the growing season.

Keywords: almond willow, *Salix triandra*, saplings from cuttings, one-year shoots, daily increment, seasonal dynamics, infradian biorhythms, synchronization of biorhythms.

For citation: Afonin A. A. Infradiannye ritmy dinamiki narastaniya pobegov v klonakh *Salix triandra* [Infradian rhythms of increment dynamics of shoots in *Salix triandra* clones] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2021. No. 02 (205). Pp. 2–11. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-205-02-2-11. (In Russian.)

Paper submitted: 15.01.2021.

References

1. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV // Botanical Journal of the Linnean Society. 2016. No. 181 (1). Pp. 1–20. DOI: 10.1111/boj.12385.
2. Wu J., Nyman T., Wang D.-C., et al. Phylogeny of *Salix* subgenus *Salix* s.l. (Salicaceae): delimitation, biogeography, and reticulate evolution // BMC Evolutionary Biology. 2015. No. 15. Article number 31. DOI: 10.1186/s12862-015-0311-7.
3. Zhang J., Yuan H., Li Y., et al. Genome sequencing and phylogenetic analysis of allotetraploid *Salix matsudana* Koidz. // Horticulture Research. 2020. No. 7. Article number 201. DOI: 10.1038/s41438-020-00424-8.
4. Epanchintseva O. V., Tishkina E. A., Mishchikhina Yu. D. Dinamika prirosta iv pri ispol'zovanii razlichnykh agrotekhnicheskikh priyemov [The growth dynamics of willows due to the use of various agricultural techniques] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. No. 4 (84). Pp. 97–103. DOI: 10.37670/2073-0853-2020-84-4-97-103. (In Russian.)
5. Fredette C., Labrecque M., Comeau Y., Brisson J. Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix* // Journal of Environmental Management. 2019. No. 246. Pp. 526–537. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.010.
6. Skvortsov A. K. Willows of Russia and adjacent countries. Taxonomical and geographical revision. Joensuu: University of Joensuu, 1999. 307 p.
7. Chen J. H., Sun H., Wen J., Yang Y.-P. Molecular phylogeny of *Salix* L. (Salicaceae) inferred from three chloroplast datasets and its systematic implications // Taxon. 2010. No. 59 (1). Pp. 29–37. DOI: 10.1002/tax.591004.
8. Wu D., Wang Y., Zhang L., Dou L., Gao L. The complete chloroplast genome and phylogenetic analysis of *Salix triandra* from China // Mitochondrial DNA Part B. 2019. No. 4 (2). Pp. 3571–3572. DOI: 10.1080/23802359.2019.1674743.
9. Macalpine W. J., Shield I. F., Trybush S. O., Hayes C. M., Karp A. Overcoming barriers to crossing in willow (*Salix* spp.) breeding // Biomass and Energy Crops III. Aspects of Applied Biology. 2008. No. 90. Pp. 173–180.
10. Li W., Wu H., Li X., Chen Y., Yin T. Fine mapping of the sex locus in *Salix triandra* confirms a consistent sex determination mechanism in genus *Salix* // Horticulture Research. 2020. No. 7. Article number 64. DOI: 10.1038/s41438-020-0289-1.
11. Noleto-Dias C., Wu Y., Bellisai, A., et al. Phenylalkanoid Glycosides (Non-Salicinoids) from Wood Chips of *Salix triandra* × *dasyclados* Hybrid Willow // Molecules. 2019. No. 24 (6). Article number 1152. DOI: 10.3390/molecules24061152.
12. Da Cunha A. C. B., Sabedot S., Sampaio C. H., Ramos C.G., da Silva A.R. *Salix rubens* and *Salix triandra* Species as Phytoremediators of Soil Contaminated with Petroleum-Derived Hydrocarbons // Water, Air & Soil Pollution. 2012. No. 223. Pp. 4723–4731. DOI: 10.1007/s11270-012-1228-z.
13. Sannikova E. G., Popova O. I., Kompantseva E. V. Iva trekhtychinkovaya (*Salix triandra* L.) – perspektivy i vozmozhnosti ispol'zovaniya v meditsine i farmatsii [Willow triandra (*Salix triandra* L.): prospects and opportunities for use in medicine and pharmacy] // Pharmacy & Pharmacology. 2018. No. 6 (4). Pp. 318–339. DOI: 10.19163/2307-9266-2018-6-4-318-339. (In Russian.)
14. Kuzovkina Yu. A. Compilation of the checklist for cultivars of *Salix* L. (Willow) // HortScience. 2015. No. 50 (11). Pp. 1608–1609. DOI: 10.21273/HORTSCI.50.11.1608.

15. Verwijst T., Lundkvist A., Edelfeldt S., Forkman J., Nordh N.-E. Effects of clone and cutting traits on shoot emergence and early growth of willow // *Biomass Bioenergy*. 2012. No. 37. Pp. 257–264. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.12.004.
16. Edelfeldt S., Lundkvist A., Forkman J., Verwijst T. Effects of cutting length, orientation and planting depth on early willow shoot establishment // *BioEnergy Research*. 2015. No. 8. Pp. 796–806. DOI: 10.1007/s12155-014-9560-3.
17. Lüttge U., Hertel B. Diurnal and annual rhythms in trees // *Trees*. 2009. No. 23. Article number 683. DOI: 10.1007/s00468-009-0324-1.
18. Lloyd D. Oscillations, Synchrony and Deterministic Chaos // In: *Progress in Botany*, Lüttge U. et al. (eds). 2009. No. 70. Pp. 69–92. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-68421-3_4.
19. Junttila O. Apical Growth Cessation and Shoot Tip Abscission in *Salix*. *Physiologia Plantarum*. 1976. No. 38 (4). Pp. 278–286. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1976.tb04004.x.
20. Heide O. M. Temperature rather than photoperiod controls growth cessation and dormancy in *Sorbus species* // *Journal of Experimental Botany*. 2011. No. 62 (15). Pp. 5397–5404. DOI: 10.1093/jxb/err213.
21. Critchfield W. B. Leaf dimorphism in *Populus trichocarpa* // *American Journal of Botany*. 1960. No. 47. Pp. 699–711. DOI: 10.1002/j.1537-2197.1960.tb07154.x.
22. Mikhalevskaya O. B. Growth rhythms at different stages of shoot morphogenesis in woody plants // *Russian Journal of Developmental Biology*. 2008. No. 39 (2). Pp. 65–72.
23. Diatropov M. E., Panchelyuga V. A., Stankevich A. A. Dinamika smeny pervostepennogo makhovogo opereniya u vorob'inykh ptits, vozmozhnyye faktory sinkhronizatsii [The Dynamics of the Replacement of Primary Flight Feathers in Passerine Birds and Possible Synchronization Factors] // *Biophysics*. 2020. No. 65 (1). Pp. 131–142. DOI: 10.1134/S0006350920010042. (In Russian.)
24. Doffo G. N., Monteoliva S. E., Rodríguez M. E., Luquez V. M. C. Physiological responses to alternative flooding and drought stress episodes in two willow (*Salix* spp.) clones // *Canadian Journal of Forest Research*. 2017. No. 47. Pp. 174–182. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0202.
25. Welc M., Lundkvist A., Verwijst T. Effects of propagule phenology (non-dormant versus dormant) and planting system (vertical versus horizontal) on growth performance of willow clones grown under different weeding regimes // *BioEnergy Research*. 2018. No. 11 (3). Pp. 703–714. DOI: 10.1007/s12155-018-9929-9.
26. Fuchylo Ya. D., Afonin A. A., Sbytina M. V. Selektionsnyye osnovy vyvedeniya novykh sortov semeystva Ivovye (*Salicaceae* Mirb.) dlya sozdaniya energeticheskikh plantatsiy [Selection bases of developing new varieties of willow family (*Salicaceae* Mirb.) to create energy plantations] // *Plant Varieties Studying and Protection*. 2016. No. 4 (33). Pp. 18–25. (In Russian.)
27. Afonin A. A. Strukturnyy analiz ritmov razvitiya odnoletnikh pobegov ivy trekhtychinkovoy [Structural analysis of the rhythms of development of annual shoots of almond willow] // *Bulletin of Science and Practice*. 2019. No. 5 (1). Pp. 22–32. DOI: 10.5281/zenodo.2539541. (In Russian.)
28. Afonin A. A. Polivariantnost' morfogeneza pobegov v klonakh *Salix triandra* (*Salicaceae*) na fone periodichnosti livnevnykh osadkov [Polyvariance of shoot morphogenesis in clones of *Salix triandra* (*Salicaceae*) against the background of the periodicity of rainstorms] // *Bulletin of Science and Practice*. 2021. No. 7 (1). Pp. 19–32. DOI: 10.33619/2414-2948/62/02. (In Russian.)
29. Vasil'yev S. N. Shevaldin V. T. Garmonicheskiy analiz: uchebnoye posobiye [Harmonic analysis: textbook]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2014. 80 p. (In Russian.)
30. Afonin A. A. Khronobiologicheskiye aspekty optimizatsii pestitsidnoy nagruzki v nasazhdeniyakh ivy korzinochnoy [Chronobiological aspects of pesticide load optimization in *Salix viminalis* L. plantings of intensive type] // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2019. No. 2. Pp. 43–50. DOI: 10.36906/2311-4444/19-2/06. (In Russian.)
31. Singh R. K., Svystun T., AlDahmash B., Jönsson A. M., Bhalerao R. P. Photoperiod- and temperature-mediated control of phenology in trees – a molecular perspective // *New Phytologist*. 2017. No. 213. Pp. 511–524. DOI: 10.1111/nph.14346.
32. Richards T. J., Karacic A., Apuli R. P., et al. Quantitative genetic architecture of adaptive phenology traits in the deciduous tree, *Populus trichocarpa* (Torr. and Gray) // *Heredity*. 2020. No. 125. Pp. 449–458. DOI: 10.1038/s41437-020-00363-z.

Authors' information:

Aleksey A. Afonin¹, doctor of agricultural sciences, professor, ORCID 0000-0002-9392-2527, AuthorID 264352; +7 910 230 69 75, afonin.salix@gmail.com

¹ Bryansk State University named after academician I. G. Petrovskiy, Bryansk, Russia