

О ВВЕДЕНИИ ПОНЯТИЯ «КОЭФФИЦИЕНТ МЕЖФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА» ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЛИСТВЕННИЦ

А.А. Котов✉, М.А. Лавренов, П.А. Аксенов,
А.Ф. Алябьев

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

kotov@bmstu.ru

Рассматривается применение принципиально нового способа обработки данных фенологических наблюдений. Предложен метод анализа связи наступления фенологических фаз с факторами окружающей среды с учетом скорости межфазового перехода, достаточно сильно зависящей от сезонной изменчивости данных факторов, прежде всего температуры. Описана динамика сезонного развития растений, введены коэффициенты межфазового перехода деревьев, которые характеризуют скорость трансформации дерева из одной фазы в другую. Установлены зависимости наступления конкретной фенофазы от влияния лимитирующего экологического фактора при использовании линейной и полиномиальной аппроксимации. Показана возможность устранения из расчетной модели временного промежутка накопления положительных температур и проведения сравнения независимо от индивидуальных климатических условий вегетационного периода. Представлены особенности применения описанной методики при проведении сравнительных фенологических исследований близких таксонов в целях выявления различий в их реакции на лимитирующие факторы окружающей среды. Предлагаемый способ расчета фенологических данных приведен и опробован на примере различных видов рода лиственница. Установлен основной фактор, влияющий на сезонное развитие видов, — сумма положительных температур. Рекомендуется использовать полученные данные в дальнейшем для детального сравнения возможностей интродукции изучаемых видов на территории средней полосы Российской Федерации.

Ключевые слова: фенология, лиственница, коэффициент межфазового перехода, сумма положительных температур, распускание хвои, появление стробил, созревание шишек

Ссылка для цитирования: Котов А.А., Лавренов М.А., Аксенов П.А., Алябьев А.Ф. О введении понятия «коэффициент межфазового перехода» при анализе данных фенологических наблюдений на примере различных видов лиственниц // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 4. С. 59–73. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-59-73

Фенологическое развитие деревьев и кустарников отражает их биологические свойства, закодированные в гено типе. Сезонные и суточные изменения окружающей среды прямо или косвенно влияют на их ритм жизни [1–3].

Фенология имеет важное значение при решении проблем сохранения биоразнообразия древесных пород, обеспечивает научную базу для принятия обоснованных решений в лесном хозяйстве и природоохранной деятельности [4–8]. В частности, знания фенологических ритмов растений необходимы для выбора ассортимента пород, наиболее устойчивых к измененным климатическим условиям.

Цель работы

Цель работы — анализ динамики наступления фенологических фаз видов рода *Larix* Mill. и рассмотрение особенностей применения коэффициентов межфазового перехода при фенологическом развитии.

Материалы и методы

Актуальность исследования фенофаз обусловлена сезонным развитием растений, отражающим их экологическую реакцию на климатические изменения факторов внешней среды [9–15]. Выполненные работы позволяют провести предварительную оценку успешности адаптации лиственниц к условиям центра Европейской части России (на примере Главного ботанического сада имени Н.В. Цицина РАН — ГБС РАН).

Т а б л и ц а 1

**Даты наступления фаз охвоения различных видов лиственницы
в зависимости от суммы положительных температур**

**Dates of the onset of the needle-forming phases of various larch species depending
on the sum of positive temperatures**

Вид	Набухание почек		Распускание почек		Развертывание хвои		Полное охвоение	
	Дата	Сумма t , °C	Дата	Сумма t , °C	Дата	Сумма t , °C	Дата	Сумма t , °C
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	19.04	75,5	24.04	113,7	01.05	157,4	10.05	231,3
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	19.04	75,5	22.04	96,7	26.04	135,1	04.05	181,4
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A. Henry) Ostenf. & Syrach	14.04	55,3	19.04	75,5	22.04	96,7	03.05	176,6
<i>L. decidua</i> Mill.	19.04	75,5	23.04	105,2	28.04	146,1	08.05	219,2
<i>L. Sukaczewii</i> Dylis	21.04	90	25.04	123,8	30.04	152,4	06.05	194,3
<i>L. ochotensis</i> Kolesn.	19.04	75,5	24.04	113,7	27.04	142,6	08.05	219,2
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	15.04	60,6	20.04	83,8	26.04	135,1	05.05	185,6
<i>L. × lubarskii</i> Sukaczew	09.04	39,9	15.04	60,6	25.04	123,8	07.05	206,9
<i>L. potaninii</i> Batalin	15.04	60,6	20.04	83,8	24.04	113,7	06.05	194,5

Примечание. Для выбранных видов указаны календарные даты наступления фенофаз охвоения и сумма положительных температур для каждой фенофазы.

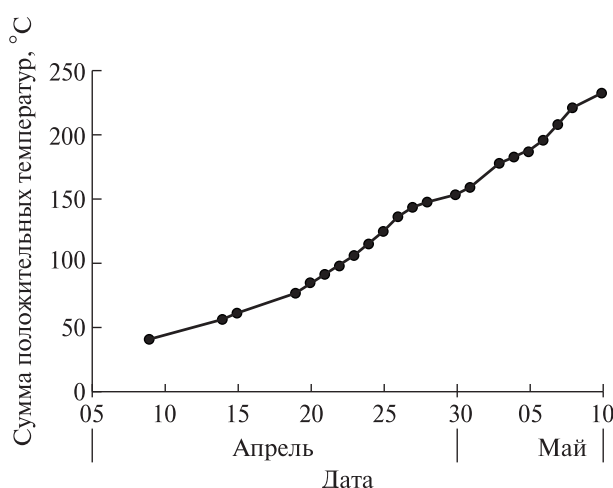


Рис. 1. Зависимость суммы положительных температур от календарной даты в 2022 г.

Fig. 1. Dependence of the sum of positive temperatures on the calendar date in 2022

Биолого-физиологические особенности лиственниц в естественных условиях произрастания существенно отличаются от особенностей лиственниц в городской среде, где растения вынуждены приспосабливаться к неблагоприятным для них факторам, что может привести к

ухудшению их устойчивости [16–25]. Оценить такое влияние условий можно по фенологическому развитию растений. Проведение фенологических наблюдений и их анализ необходимы для понимания реакции различных видов лиственницы на абиотические и биотические факторы окружающей среды [26, 27].

Построенные математические модели зависимости динамики фенофаз от суммы положительных значений температуры показывают, что наступление фенологических фаз растений в первую очередь вызвано сменой погодных условий [28–30]. Например, по данным работы [28], между суммой эффективных температур и весенними фенодатами существует корреляция, близкая к единице. Таким образом, можно утверждать, что цветение древесных пород происходит при накоплении определенной суммы температур. Даты прохождения фенологических фаз могут изменяться в зависимости от погодных условий, при этом данные по накоплению суммы положительных температур практически неизменны [31–34]. Их можно использовать в практических целях, например для установления прогноза ожидаемого урожая семян лиственницы и, следовательно, более целесообразного планирования сбора шишек [31].

Т а б л и ц а 2

Характеристика межфазовых переходов при охвоении лиственницы

Characteristics of interphase transitions during larch needle formation

Вид	Показатель	Набухание — распускание почек	Распускание почек — развертыва- ние хвои	Развертывание хвои — полное охвоение
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	ΔD , сут.	5	7	9
	Δt , °C	38,2	43,7	73,9
	K_1 , сут./°C	0,13	0,16	0,12
	K_2 , °C/сут.	7,64	6,24	8,21
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	ΔD , сут.	3	4	8
	Δt , °C	21,2	38,4	46,3
	K_1 , сут./°C	0,14	0,10	0,19
	K_2 , °C/сут.	7,07	9,60	5,19
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	ΔD , сут.	5	3	11
	Δt , °C	20,2	21,2	79,9
	K_1 , сут./°C	0,25	0,14	0,14
	K_2 , °C /сут.	4,04	7,07	7,26
<i>L. decidua</i> Mill.	ΔD , сут.	4	5	10
	Δt , °C	29,7	40,9	73,1
	K_1 , сут./°C	0,13	0,12	0,14
	K_2 , °C/сут.	7,43	8,18	7,31
<i>L. Sukaczewii</i> Dylis	ΔD , сут.	4	5	6
	Δt , °C	33,8	28,6	41,9
	K_1 , сут./°C	0,12	0,17	0,14
	K_2 , °C/сут.	8,45	5,72	6,98
<i>L. ochotensis</i> Kolesn.	ΔD , сут.	5	3	11
	Δt , °C	38,2	28,9	76,6
	K_1 , сут./°C	0,13	0,10	0,14
	K_2 , °C/сут.	7,64	9,63	6,96
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	ΔD , сут.	5	6	9
	Δt , °C	23,2	51,3	50,5
	K_1 , сут./°C	0,22	0,12	0,18
	K_2 , °C/сут.	4,64	8,55	5,61
<i>L. × lubarskii</i> Sukaczew	ΔD , сут.	6	10	12
	Δt , °C	20,7	63,2	83,1
	K_1 , сут./°C	0,29	0,16	0,14
	K_2 , °C/сут.	3,45	6,32	6,93
<i>L. potaninii</i> Batalin	ΔD , сут.	5	4	12
	Δt , °C	23,2	29,9	80,8
	K_1 , сут./°C	0,22	0,13	0,15
	K_2 , °C/сут.	4,64	7,48	6,73

Объектом исследования служили некоторые виды лиственниц: л. американская, л. европейская, л. сибирская, л. Сукачева, л. Кемпфера, л. Любарского, л. охотская, л. Потанина, л. ольгинская, произрастающие в дендрарии ГБС РАН.

Даты наступления фенологических фаз отмечались при их проявлении более чем у 50 % деревьев каждого из указанных видов.

Фенологические наблюдения для оценки сезонного развития были проведены в соответствии с общепринятыми методиками [35–38].

Рассмотрим переходы из одной фазы в другую на примере разных видов лиственниц в зависимости от влияния суммы положительных температур. При межфазовом переходе деревьев учитывается как сумма положительных температур окружающего воздуха, так и даты наступления фенологических фаз.

В связи с этим введено понятие «коэффициент межфазового перехода деревьев», которое характеризует скорость перехода дерева из одной фазы в другую. Если ввести числовую нумерацию фаз, то можно от качественного анализа переходов перейти к количественному. Это позволит установить зависимости проявления конкретной фазы от суммы положительных температур либо в виде линейной кусочной функции, либо в виде полинома второго порядка $y = f(x)$, где x — сумма положительных температур, °C; y — порядковый номер фазы. Взяв первую производную от этой функции, можно получить коэффициент межфазового перехода. При этом выявляется зависимость: чем больше значение коэффициента, тем выше скорость перехода дерева из одной фазы в другую.

Полученные значения коэффициента межфазового перехода позволят проводить срав-

нение успешности интродукции различных видов лиственницы в зависимости от суммы положительных температур.

Уравнение $y = f(x)$ можно получить для каждого межфазового перехода или всего периода вегетации.

Начальными данными для обработки, по предложенной нами методике, послужили исследования динамики фенологических фаз охвоения и распускания стробил лиственницы. Фиксация данных проводилась в 2022 г. в дендрарии ГБС РАН. Для изучения охвоения были взяты девять видов лиственницы (табл. 1, рис. 1).

Рассчитаны следующие показатели: межфазовые интервалы времени ΔD (сут.), приращение суммы положительных температур за эти интервалы Δt (°C); коэффициент потребного интервала времени для межфазового перехода K_1 (сут./°C); коэффициент приращения суммы положительных температур при межфазовом переходе K_2 , (°C/сут.) (табл. 2):

$$K_1 = \frac{\Delta D}{\Delta t}; \quad K_2 = \frac{1}{K_1};$$

$$\Delta D = D_{i+1} - D_i; \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i.$$

Т а б л и ц а 3

Расчетные скорректированные коэффициенты межфазовых переходов при охвоении лиственницы

Calculated adjusted coefficients of interphase transitions during larch needle formation

Вид	Параметр	Период между фенофазами		
		Набухание — распускание почек	Распускание почек — развертывание хвои	Развертывание хвои — полное охвоение
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	K_{1K} 1/°C	0,026	0,023	0,014
	K_{2K} °C	38,2	43,7	73,9
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	K_{1K} 1/°C	0,047	0,026	0,022
	K_{2K} °C	21,2	38,4	46,3
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	K_{1K} 1/°C	0,050	0,047	0,013
	K_{2K} °C	20,2	21,2	79,9
<i>L. decidua</i> Mill.	K_{1K} 1/°C	0,034	0,024	0,014
	K_{2K} °C	29,7	40,9	73,1
<i>L. sukaczewii</i> Dylis	K_{1K} 1/°C	0,030	0,035	0,024
	K_{2K} °C	33,8	28,6	41,9
<i>L. ochotensis</i> Kolesn.	K_{1K} 1/°C	0,026	0,035	0,013
	K_{2K} °C	38,2	28,9	76,6
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	K_{1K} 1/°C	0,043	0,019	0,020
	K_{2K} °C	23,2	51,3	50,5
<i>L. × lubarskii</i> Sukaczew	K_{1K} 1/°C	0,048	0,016	0,012
	K_{2K} °C	20,7	63,2	83,1
<i>L. potaninii</i> Batalin	K_{1K} 1/°C	0,043	0,033	0,012
	K_{2K} °C	23,2	29,9	80,8

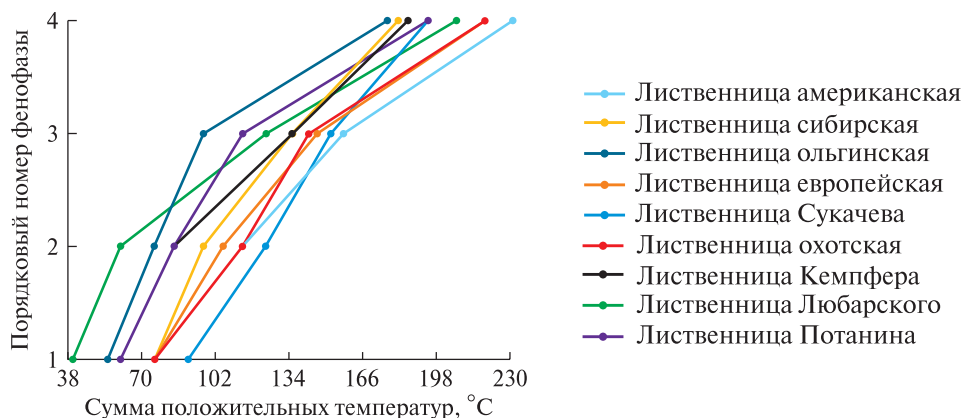


Рис. 2. Зависимость наступления фенофазы от суммы положительных температур: 1 — набухание почек; 2 — распускание почек; 3 — развертывание хвои; 4 — полное охвоение

Fig. 2. Dependence of the onset of the phenophase on the sum of positive temperatures: 1 — bud swelling; 2 — bud break; 3 — needle unfolding; 4 — complete needle formation

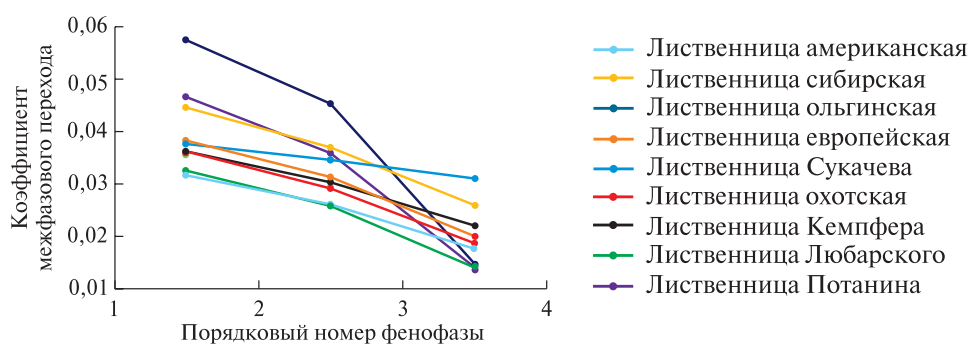


Рис. 3. Зависимость коэффициента межфазового перехода от порядкового номера фенофазы: 1 — набухание почек; 2 — распускание почек; 3 — развертывание хвои; 4 — полное охвоение

Fig. 3. Interphase transition coefficient versus phenophase ordinal number: 1 — bud swelling; 2 — bud break; 3 — needle unfolding; 4 — full needle cover

Уравнения вида $y = f(x)$ получены для каждого интервала. В итоге имеем линейные кусочные функции, первая производная которых и представляет коэффициент K_1 .

Из табл. 2 видно, что быстрее проходят фенологические фазы набухания, распускания почек и развертывания хвои лиственницы сибирской и лиственницы Сукачева. Данные виды являются таксономически близкими [39–42]. Полученные данные могут указывать на их биологические особенности, отличающие их от прочих в условиях интродукции центра Европейской части России, и на их схожесть. Наиболее длительное прохождение фенофаз отмечилось у лиственницы Любарского, причем по каждой фенофазе этот вид по протяженности сильно отличается от других.

Наступление каждой фенофазы зависит от значения суммы положительных температур, которая, в свою очередь, зависит от даты (число, месяц, год). В связи с этим полученные здесь коэффициенты K_1 и K_2 несколько некорректны и справедливы только для конкретного года, поскольку сумма положительных температур в каждом году изменяется по-разному.

Предлагаем ввести скорректированные коэффициенты $K_{1к}$ и $K_{2к}$, зависящие от суммы положительных температур и не зависящие от временного промежутка.

В табл. 3 для каждого вида лиственницы представлены межфазовые переходы ΔD , приращение суммы положительных температур за эти переходы Δt , коэффициент, показывающий долю межфазового перехода при повышении

Т а б л и ц а 4

Вычисление коэффициентов межфазовых переходов при охвоении лиственницы с помощью полинома 2-го порядка (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$)

Calculation of interphase transition coefficients during larch needle formation using a second-order polynomial (approximation reliability value $R^2 = 0,99$)

Вид	Параметр	Период между фенофазами		
		Набухание — распускание почек	Распускание почек — развертывание хвои	Развертывание хвои — полное охвоение
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	Уравнения	$y = -0,00007x^2 + 0,04x - 1,64; y' = -0,0001x + 0,04$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,027	0,021	0,013
	$K_{2к}, °C$	37,5	47,9	78,7
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	Уравнения	$y = -0,00013x^2 + 0,06x - 2,86; y' = -0,00026x + 0,06$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,040	0,032	0,021
	$K_{2к}, °C$	25,0	31,3	47,6
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	Уравнения	$y = -0,0003x^2 + 0,09x - 3,22; y' = -0,0006x + 0,09$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,053	0,040	0,010
	$K_{2к}, °C$	19,0	24,9	102,0
<i>L. decidua</i> Mill.	Уравнения	$y = -0,0001x^2 + 0,05x - 2,27; y' = -0,0002x + 0,05$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,033	0,026	0,015
	$K_{2к}, °C$	30,0	38,0	67,1
<i>L. sukaczewii</i> Dylis	Уравнения	$y = -0,00005x^2 + 0,04x - 2,52; y' = -0,0001x + 0,04$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,033	0,030	0,026
	$K_{2к}, °C$	30,6	33,8	38,3
<i>L. ochotensis</i> Kolesn.	Уравнения	$y = -0,0001x^2 + 0,05x - 2,26; y' = -0,0002x + 0,05$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,031	0,024	0,014
	$K_{2к}, °C$	32,4	41,3	73,5
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	Уравнения	$y = -0,00008x^2 + 0,04x - 1,2; y' = -0,00016x + 0,04$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,031	0,025	0,017
	$K_{2к}, °C$	32,3	40,0	58,8
<i>L. × lubarskii</i> Sukaczew	Уравнения*	$y = -0,00008x^2 + 0,03x - 0,13; y' = -0,00016x + 0,03$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,028	0,021	0,010
	$K_{2к}, °C$	36,2	48,1	109,9
<i>L. potaninii</i> Batalin	Уравнения	$y = -0,0002x^2 + 0,07x - 2,58; y' = -0,0004x + 0,07$		
	$K_{1к}, 1/°C$	0,042	0,031	0,009
	$K_{2к}, °C$	24,0	32,3	112,4
* $R^2 = 0,98$				

суммы положительных температур на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $K_{1к}$, коэффициент приращения суммы положительных температур при межфазовом переходе $K_{2к}$. Последний коэффициент тождествен Δt : он показывает, насколько должна увеличиться сумма положительных температур, чтобы произошел межфазовый переход:

$$K_{1к} = \frac{K_1}{\Delta D} \text{ или } K_{1к} = \frac{1}{\Delta t}; \quad K_{2к} = \frac{1}{K_{1к}};$$

$$\Delta D = D_{i+1} - D_i; \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i.$$

Уравнение вида $y = f(x)$ получено для каждого перехода. В итоге имеем линейные кусочные функции, первая производная которых и представляет коэффициент $K_{1к}$ (см. табл. 3).

Из табл. 3 следует, что, например, для лиственницы Кемпфера увеличение суммы положительных температур на каждый градус при межфазовом переходе «развертывание хвои — полное охвоение» обеспечивает прирост в 2 % ($K_{1к} = 0,02\text{ }1/^{\circ}\text{C}$) этого перехода, т. е. повышение суммы положительных температур

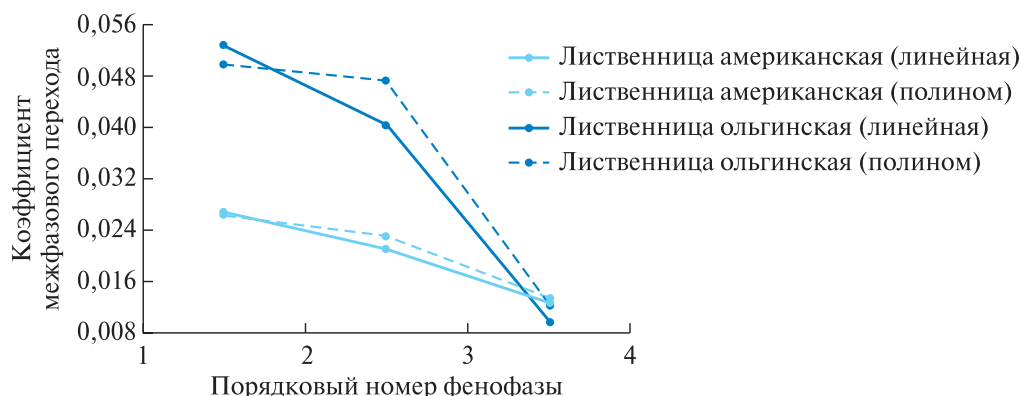


Рис. 4. Сравнение зависимости коэффициента межфазового перехода от порядкового номера фенофазы при линейной и полиномиальной аппроксимации

Fig. 4. Comparison of the interphase transition coefficient versus phenophase ordinal number using linear and polynomial approximations

примерно на 50 °С ($K_{2k} = 50,5$ °С) приводит к полной смене фаз.

Коэффициент K_{1k} показывает, что первый межфазовый переход быстрее преодолевает лиственница Любарского ($K_{1k} = 0,048$), а медленнее — л. американская и л. охотская ($K_{1k} = 0,026$). Переход «распускание почек — разворачивание хвои» быстрее всех протекает у л. ольгинской ($K_{1k} = 0,047$), а медленнее — у л. Любарского ($K_{1k} = 0,016$), которая опережала всех в предыдущем случае. По третьему межфазовому переходу опережает прочие виды лиственница Сукачева ($K_{1k} = 0,024$), отстает снова л. Любарского ($K_{1k} = 0,012$), а также л. Потанина ($K_{1k} = 0,012$).

Отметим, что наиболее быстро в большинстве случаев у лиственниц проходит фаза «набухание — распускание почек». Однако есть исключения (лиственница Сукачева и л. охотская быстрее преодолевают переход «распускание почек — разворачивание хвои»). Наиболее длительный переход у всех исследуемых лиственниц, кроме лиственницы Кемпфера, установлен между фазами «разворачивание хвои — полное охвоевание». Коэффициент K_{1k} позволит определить дату наступления конкретной фенофазы в развитии растений при известном прогнозе погоды на ближайшие 10–12 сут., также, зная даты наступления фаз, вычислить суммы положительных температур за прошедший период без метеостанций.

Анализ рис. 2 показал, что у лиственницы Любарского процесс охвоевания начинается раньше всех изучаемых видов, однако для полного охвоевания ей требуется большая сумма положительных температур, чем большинству из представленных видов. Быстрее всех происходит полное охвоевание у лиственницы ольгинской, при этом и набухание почек у нее происходит раньше, чем у большинства видов.

Вычислим эти же коэффициенты с помощью полиномов 2-го порядка, полученных с применением Microsoft Excel (рис. 3, табл. 4). Вначале найдем уравнение кривой в виде полинома второй степени $y = f(x) = ax^2 + bx + c$. Затем вычислим его первую производную y' и определим значение производной в середине каждого температурного интервала межфазового перехода.

Из рис. 3 следует, что, например, для лиственницы ольгинской коэффициент K_{1k} при первом межфазовом переходе имеет самое высокое значение, а при последнем — одно из самых низких, т. е. переход от первой фенофазы ко второй осуществляется очень быстро, а переход от третьей фенофазы к четвертой — очень медленно. Вначале требуется небольшое приращение суммы положительных температур, а в конце — примерно в 5 раз большее. Кроме того, по рис. 3 можно определить скорость межфазовых переходов на том основании, что физический смысл первой производной функции здесь представляет собой тангенс угла наклона. Чем круче кривая, тем быстрее снижается скорость перехода.

Попарно сравнивая полученные коэффициенты (см. табл. 3 и табл. 4), можно отметить, что они близки между собой, поэтому в дальнейших исследованиях необходимо использовать как линейную, так и полиномиальную аппроксимацию, хотя вторая более трудоемка в применении.

Приведем пример графического сравнения зависимостей коэффициентов K_{1k} , полученных с помощью двух указанных видов аппроксимации для лиственниц американской и ольгинской, он показывает удовлетворительную сходимость результатов (рис. 4).

Аналогично найдены коэффициенты K_{1k} и K_{2k} для фаз появления стробил (табл. 5–8). Здесь изучено шесть видов лиственницы.

Т а б л и ц а 5

**Даты наступления фаз появления стробил различных видов лиственницы
в зависимости от суммы положительных температур**

**Dates of strobilus emergence phases for various larch species depending
on the sum of positive temperatures**

Вид	Начало появления стробил		Массовое появление стробил		Окончание появления стробил	
	Дата	Сумма t , °C	Дата	Сумма t , °C	Дата	Сумма t , °C
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	27.04	145,1	04.05	184,02	7.05	209,5
<i>L. decidua</i> Mill.	21.04	91,3	29.04	150,94	2.05	168,56
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	29.05	151	11.05	244,91	15.05	287,14
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	29.04	150,94	10.05	233,69	14.05	277,13
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	26.04	136,4	03.05	168,56	04.05	184,02
<i>L. potaninii</i> Batalin	28.04	147,4	03.05	179,06	06.05	196,88

Т а б л и ц а 6

Характеристика межфазовых переходов при появлении стробил лиственниц

Characteristics of interphase transitions during strobilus emergence in larch trees

Вид	Параметр	Начало появления стробил — массовое появления стробил	Массовое появления стробил — окончание появления стробил
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	ΔD , сут.	7	3
	Δt , °C	38,92	25,48
	K_1 , сут./°C	0,18	0,12
	K_2 , °C/сут.	5,56	8,49
<i>L. decidua</i> Mill.	ΔD , сут.	8	3
	Δt , °C	59,64	17,62
	K_1 , сут./°C	0,13	0,17
	K_2 , °C/сут.	7,46	5,87
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	ΔD , сут.	12	4
	Δt , °C	93,91	42,23
	K_1 , сут./°C	0,13	0,09
	K_2 , °C/сут.	7,83	10,56
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	ΔD , сут.	11	4
	Δt , °C	82,75	43,44
	K_1 , сут./°C	0,13	0,09
	K_2 , °C/сут.	7,52	10,86
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	ΔD , сут.	7	1
	Δt , °C	32,16	15,46
	K_1 , сут./°C	0,22	0,06
	K_2 , °C/сут.	4,59	15,46
<i>L. potaninii</i> Batalin	ΔD , сут.	5	3
	Δt , °C	31,66	17,82
	K_1 , сут./°C	0,16	0,17
	K_2 , °C/сут.	6,33	5,94

Т а б л и ц а 7

**Вычисление коэффициентов при появлении стробил
с помощью линейной аппроксимации**

Calculation of strobilus emergence coefficients using linear approximation

Вид	Параметр	Период между фенофазами	
		Начало появления стробил — массовое появления стробил	Массовое появления стробил — окончание появления стробил
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	$K_{1к}, 1/°C$	0,026	0,039
	$K_{2к}, °C$	38,92	25,48
<i>L. decidua</i> Mill.	$K_{1к}, 1/°C$	0,017	0,057
	$K_{2к}, °C$	59,64	17,62
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	$K_{1к}, 1/°C$	0,011	0,024
	$K_{2к}, °C$	93,91	42,23
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	$K_{1к}, 1/°C$	0,012	0,023
	$K_{2к}, °C$	82,75	43,44
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	$K_{1к}, 1/°C$	0,031	0,065
	$K_{2к}, °C$	32,16	15,46
<i>L. potaninii</i> Batalin	$K_{1к}, 1/°C$	0,032	0,056
	$K_{2к}, °C$	31,66	17,82

Т а б л и ц а 8

**Вычисление коэффициентов при появлении стробил
с помощью полинома 2-го порядка ($R^2 = 0,99$)**

Calculation of strobilus emergence coefficients using a second-order polynomial ($R^2 = 0,99$)

Вид	Параметр	Начало появления стробил — массовое появления стробил	Массовое появления стробил — окончание появления стробил
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	Уравнения	$y = 0,0002x^2 - 0,04x + 2,89; y' = 0,0004x - 0,04$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,022	0,035
	$K_{2к}, °C$	45,45	28,57
<i>L. decidua</i> Mill.	Уравнения	$y = 0,0005x^2 - 0,11x + 6,6; y' = 0,0010x - 0,11$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,013	0,051
	$K_{2к}, °C$	79,87	19,55
<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	Уравнения	$y = 0,0001x^2 - 0,03x + 2,93; y' = 0,0002x - 0,03$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,012	0,026
	$K_{2к}, °C$	80,68	38,45
<i>L. sibirica</i> Ledeb.	Уравнения	$y = 0,00009x^2 - 0,0212x + 2,2327; y' = 0,00018x - 0,0212$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,013	0,025
	$K_{2к}, °C$	74,53	40,37
<i>L. gmelinii</i> var. <i>olgensis</i> (A.Henry) Ostenf. & Syrach	Уравнения	$y = 0,0007x^2 - 0,18x + 12,97; y' = 0,0014x - 0,18$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,029	0,063
	$K_{2к}, °C$	33,93	15,92
<i>L. potaninii</i> Batalin	Уравнения	$y = 0,0005x^2 - 0,13x + 9,42; y' = 0,001x^2 - 0,13$	
	$K_{1к}, 1/°C$	0,033	0,058
	$K_{2к}, °C$	30,37	17,34

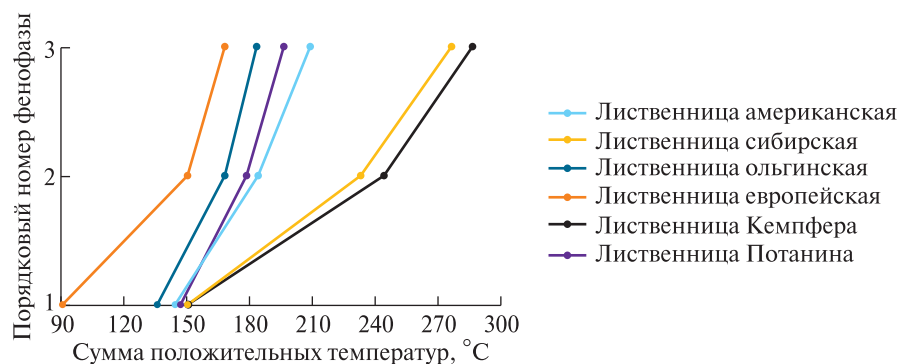


Рис. 5. Зависимость проявления фенофазы от суммы положительных температур: 1 — начало появления стробил; 2 — массовое появления стробил; 3 — окончание появления стробил

Fig. 5. Phenophase onset versus the sum of positive temperatures: 1 — beginning of strobilus emergence; 2 — mass appearance of strobili; 3 — end of strobili appearance

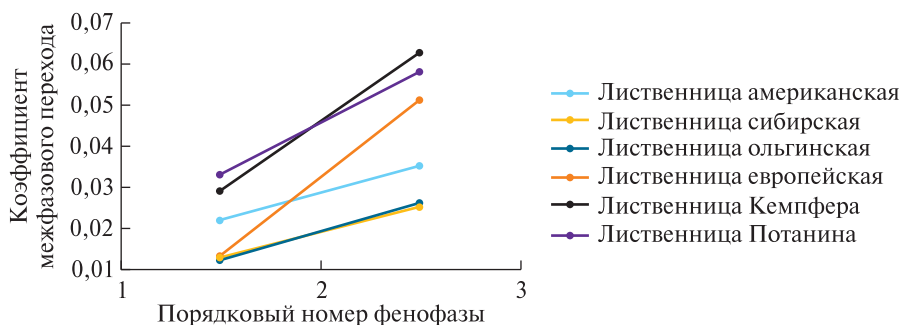


Рис. 6. Зависимость коэффициента доли межфазового перехода от фенофазы

Fig. 6. Dependence of the interphase transition coefficient on the phenophase

Сравнение полученных результатов с данными из табл. 1 показывает, что для лиственниц американской и европейской для окончания «цветения» нужна меньшая сумма положительных температур, чем для их полного охвоения. Однако для лиственниц сибирской и Кемпфера окончание «цветения» наступает при большей сумме положительных температур, чем при полном охвоении. Для лиственниц ольгинской и Потанина требуются примерно равные условия для полного охвоения и окончания «цветения».

От начала появления стробил до его окончания быстрее остальных прошли путь дальневосточные виды — лиственницы ольгинская и Потанина. Наиболее длительный межфазовый переход наблюдался у лиственницы Кемпфера.

Оценивая фенологические фазы появления стробил с помощью коэффициентов $K_{1к}$, можно сделать вывод о том, что первый межфазовый переход быстрее происходит у лиственницы Потанина ($K_{1к} = 0,032$), медленнее всех у лиственницы Кемпфера ($K_{1к} = 0,011$).

Второй межфазовый переход быстрее проходит у лиственницы ольгинской ($K_{1к} = 0,065$), медленнее всех у лиственницы сибирской ($K_{1к} = 0,023$).

Во всех приведенных случаях финальная фаза появления стробил проходит быстрее, чем промежуток между началом и массовым появлением стробил.

Установлена зависимость наступления определенной фенофазы от суммы положительных температур для каждого вида лиственниц при появлении стробил (рис. 5). Процесс появления стробил лиственниц начинается при сумме положительных температур 91,3 °C, заканчивается — при 287,1 °C. Раньше по времени начинается и заканчивается появление стробил у лиственницы американской, позже — у лиственниц Кемпфера и сибирской.

Переход от первой фенофазы ко второй происходит при большем приращении суммы положительных температур, чем от второй к третьей (рис. 6).

Таким образом, в ходе исследования нами выявлены видовые особенности в фенологическом развитии. Однако стоит отметить, что для более глубокого анализа требуется значительно более длительное наблюдение за сезонным развитием лиственниц.

Рассмотренные виды лиственниц прошли все важнейшие фенологические фазы в рассмотренные нами периоды, что свидетельствует об их успешной адаптации к условиям центра Европейской части России. На примере наступления фенологических фаз периодов охвоения и развития стробил лиственницы мы рассмотрели особенности применения коэффициентов межфазного перехода. Показано использование данных коэффициентов для углубленного анализа фенологических наблюдений с целью вскрытия динамики наступления фенофаз. При этом, основным фактором, влияющим на динамику фенологических фаз в качестве примера рассмотрена сумма накопленных температур окружающего воздуха.

Представленная нами методика обработки фенологических данных может найти применение при оценке успешности интродукции древесных растений как с целью озеленения, так и с целью введения их в лесное хозяйство РФ.

Выводы

Установлено, что у большинства рассмотренных видов лиственниц наиболее быстро в весенний период проходит фаза между массовым появлением стробил и окончанием появления стробил за исключением лиственниц сибирской и Кемпфера которые наиболее быстро преодолевают фазу от набухания до распускания почек.

Фенологические фазы распускания листьев (от набухания почек до разворачивания хвои) быстрее всех проходят лиственницы сибирская и Сукачева. Полученные данные указывают о биологическом и, следовательно, таксономическом сходстве данных пород.

По результатам исследований видно, что предложенный нами «коэффициент межфазового перехода» позволяет определить дату наступления конкретной фенофазы в развитии растений при известном прогнозе погоды, а также, зная даты наступления фаз, вычислять суммы положительных температур за прошедший период без использования данных от метеостанций.

Список литературы

[1] Паутова Н.В. Особенности фенологического развития и адаптации лиственницы сибирской в условиях Европейского Северо-Востока // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т. 13. № 1 (14). С. 1020–1023.

[2] Федотова В.Г. Современное состояние отечественной фенологии // Общество. Среда. Развитие (TerraHumana), 2009. №4. С. 166–176

[3] Федотова В.Г. Основы фенологии. Ч. 1. Теоретический курс. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 39 с.

[4] Шульц Г.Э. Общая фенология. Л.: Наука, 1981. 188 с.

[5] Рудский В.Г. Экскурсии в природу. Томск глазами фенолога. Томск: Печатная мануфактура, 2012. 43 с.

[6] Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П. Фенологические аспекты в исследовании климатических особенностей Тюменской области. М.: МАКС ПРЕСС, 2014. 148 с.

[7] Янцер О.В., Терентьева Е.Ю. Общая фенология и методы фенологических исследований. Екатеринбург: Изд-во УрГПУ, 2013. 218 с.

[8] Соловьев А.Н. Биота и климат в XX столетии. Региональная фенология. М.: Пасьева, 2005. 288 с.

[9] Карасева М.А., Карасев В.Н., Маторкин А.А. Физиологическая оценка устойчивости лиственницы сибирской в Среднем Поволжье // Хвойные бореальной зоны, 2003. Т. XXI. № 1. С. 27–35

[10] Шестопалова В.В. Особенности роста, развития и устойчивости видов сосновых в условиях Ботанического сада Воронежского госуниверситета // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2003. № 1. С. 89–95.

[11] Сурсо М.В. Фенология репродуктивных циклов и качество семян хвойных (*Pinaceae*, *Cupressaceae*) в северной тайге // Arctic Environmental Research, 2017. № 17 (4). С. 355–367.

[12] Васильева, Г.В., Жук, Е.А., Попов, А.Г. Фенология цветения кедрового стланика (*Pinus sibirica* Du Tour), кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) и гибридов между ними // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2010. № 1 (9). С. 61–67.

[13] Коновалова Е.В. Кисова С.В. Ставников Д.Ю. Влияние ростогенерирующих веществ на показатели всхожести и фенологическое состояние семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и сосны сибирской (*Pinus sibirica*) // Успехи современного естествознания, 2021. № 12. С. 27–32

[14] Автономов А.Н. Фенология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на склоновых землях экзогенного типа // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2014. № 1 (29). С. 78–80

[15] Автономов А.Н., Артемьева, Г.Н. Рост культур сосны обыкновенной на склонах разной экспозиции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. № 14. С. 1946–1949.

[16] Ирошников А.И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. М.: Изд-во ВНИИЛМ, 2004. 182 с.

[17] Гуков Г.В. Лиственницы и лиственничные леса российского Дальнего Востока. Владивосток: ГТС ДВО РАН, 2009. 350 с

[18] Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений. М.: МГУЛ, 2014. 552 с.

[19] Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Интродукция ценных хвойных экзотов // Лесохозяйственная информация, 2002. № 10. С. 30–53.

[20] Урусов В.М., Лобанова И.И., Варченко Л.И. Хвойные российского Дальнего Востока — ценные объ-

- екты изучения, охраны, разведения и использования. Владивосток: Дальнаука, 2007. 440 с.
- [21] Урусов В.М. Гибридизация в природной флоре Дальнего Востока и Сибири // Причины и перспективы использования. Владивосток: Дальнаука, 2002. 230 с.
- [22] Авров Ф.Д. Экология и селекция лиственницы. Томск: Спектр, 1996. 213 с.
- [23] Рысин Л.П. Лиственничные леса России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 343 с.
- [24] Коропачинский И.Ю., Милютин Л.И. Естественная гибридизация древесных растений. Новосибирск: Гео, 2006. 223 с.
- [25] Макаров В.П., Бобринев В.П., Милютин Л.И. Географические культуры лиственницы в Восточном Забайкалье. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2002. 192 с.
- [26] Бакутис В.Э., Горохов В.А., Лунц Л.Б., Расторгуев О.С. Инженерное благоустройство городских территорий. М., Стройиздат, 2002. 239 с.
- [27] Булыгин Н.Е., Кулагин Ю.Г. Фенологические особенности некоторых видов *Larix* Mill. в Санкт-Петербурге // Растительные ресурсы, 2000. Вып. 3. С. 39–47.
- [28] Машина Ю.А. Особенности интродукции видов рода *Larix* в Центральной лесостепи: дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж, 2002. 138 с.
- [29] Воробьев В.Н. Особенности плодоношения кедра сибирского в горных условиях // Биология семенного размножения хвойных Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 15–70.
- [30] Карбасников А.А. Лесоводственно-биологические особенности роста и развития лиственницы в условиях Вологодской области: дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2018. 166 с.
- [31] Карбасникова Е.Б., Бабич Н.А., Карбасников А.А. Особенности сезонного развития лиственницы (*Larix* Mill.) в условиях южной подзоны тайги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 53–59. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59
- [32] Кищенко И.Т. Сезонное развитие и перспективность интродуцированных видов *Pinus* L. в таежной зоне (Карелия) // Вестник Пермского университета. Серия: Биология, 2021. № 3. С. 149–157.
- [33] Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонный рост деревьев лиственных лесобразующих видов в таежной зоне // ИзВУЗ Лесной журнал, 2017. № 1. С. 51–63.
- [34] Шестак К.В. Фенологические исследования в дендрарии СибГТУ // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2006. № 10. С. 103–108.
- [35] Булыгин Н.Е., Коротаев А.А. Особенности сезонного роста корней древесных растений в условиях засухи // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение, 1976. № 5. С. 126–131.
- [36] Преображенский С.М., Галахов Н.Н. Фенологические наблюдения. М.: Детгиз, 1948. 158 с.
- [37] Елагин И.Н. О методике регистрации фенологических наблюдений во внутриландшафтном районировании // Труды фенологического совещания. Л.: Гидрометеорологическое изд., 1960. С. 111–121.
- [38] Иваненко Б.И. Фенология древесных и кустарниковых пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 184 с.
- [39] Милютин Л.И. Биоразнообразие лиственниц Азиатской России / под ред. А.П. Абаймова, С.П. Ефремова. Новосибирск: Гео, 2010. 159 с.
- [40] Araki N., Khatib I., Hemamali U., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* L. inferred from nucleotide variation of nuclear genes // Tree genetics & genomes, 2008, no. 4 (4), pp. 611–23.
- [41] Бобров Е.Г. История и систематика лиственниц. Л.: Наука, 1972. 96 с.
- [42] Наквасина Е.Н., Тихонов П.Р. Внутривидовая изменчивость лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii* Dyl.) по габитуальным признакам в естественных насаждениях Архангельской области // Вестник Поморского государственного университета. Серия «Естественные и точные науки», 2005. Вып. 2 (8). С. 29–5.

Сведения об авторах

Котов Алексей Александрович✉ — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kotov@bmstu.ru

Лавренов Максим Александрович — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), maxlavrenov93@mail.ru

Аксенов Петр Андреевич — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), aksenovpa@bmstu.ru

Алябьев Алексей Федорович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), alyabiev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 25.01.2024.

Одобрено после рецензирования 08.02.2024.

Принята к публикации 26.06.2025.

ON INTRODUCTION OF TERM «INTERPHASE TRANSITION COEFFICIENT» IN DATA ANALYSIS FROM PHENOLOGICAL OBSERVATIONS AS CASE STUDY OF VARIOUS SPECIES OF LARCH

A.A. Kotov✉, M.A. Lavrenov, P.A. Aksenov, A.F. Alyab'ev

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

kotov@bmstu.ru

The work is devoted to the application of a fundamentally new method of processing data from phenological observations. The proposed method analyzes the relationship of the onset of phenological phases with environmental factors, taking into account the rate of interphase transition, which strongly depends on the seasonal variability of these factors, primarily temperature. Describing the dynamics of seasonal development of plants, the coefficients of the interphase transition of trees are introduced, which characterize the rate of transformation of a tree from one phase to another. This makes it possible to establish the dependences of the onset of a specific phenophase on the influence of a limiting environmental factor when using linear and polynomial approximation. This method also makes it possible to eliminate the time interval of accumulation of positive temperatures from the calculation model and make comparisons regardless of the individual climatic conditions of the growing season. The application of the described technique is possible when conducting comparative phenological studies of similar taxa in order to identify differences in their response to limiting environmental factors. The proposed method for calculating phenological data is given and tested on the example of various species of the Larch genus. At the same time, the main factor under consideration affecting the seasonal development of species is the sum of positive temperatures. The obtained data are supposed to be used in the future for a detailed comparison of introduction of the studied species in the territory of the middle zone of the Russian Federation.

Keywords: phenology, larch, interphase transition coefficient, sum of positive temperatures, budding of needles, appearance of strobils, ripening of cones

Suggested citation: Kotov A.A., Lavrenov M.A., Aksenov P.A., Alyab'ev A.F. *O vvedenii ponyatiya «koeffitsient mezhfazovogo perekhoda» pri analize dannykh fenologicheskikh nablyudeniy na primere razlichnykh vidov listvennits* [On introduction of term «interphase transition coefficient» in data analysis from phenological observations as case study of various species of larch]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 4, pp. 59–73. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-59-73

References

- [1] Pautova N.V. *Osobennosti fenologicheskogo razvitiya i adaptatsii listvennitsy sibirskoy v usloviyakh Evropeyskogo Severo-Vostoka* [Features of the phenological development and adaptation of Siberian larch in the conditions of the European Northeast]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 2011, t. 13, no. 1 (14), pp. 1020–1023.
- [2] Fedotova V.G. *Sovremennoe sostoyanie otechestvennoy fenologii* [The current state of domestic phenology]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (TerraHumana)* [Society. Wednesday. Development (TerraHumana)], 2009, no. 4, pp. 166–176.
- [3] Fedotova V.G. *Osnovy fenologii. Chast' I. Teoreticheskii kurs* [Fundamentals of phenology. Part 1. Theoretical course]. Saint-Petersburg: ETU «LETI», 2003, 39 p.
- [4] Shul'ts G.E. *Obshchaya fenologiya* [General phenology]. Leningrad: Nauka, 1981, 188 p.
- [5] Rudskiy V.G. *Ekskursii v prirodu. Tomsk glazami fenologa* [Excursions to nature. Tomsk through the eyes of a phenologist]. Tomsk: Pechatnaya manufaktura, 2012, 43 p.
- [6] Grebenyuk G.N., Kuznetsova V.P. *Fenologicheskie aspekty v issledovanii klimaticheskikh osobennostey Tyumenskoy oblasti* [Phenological aspects in the study of climatic features of the Tyumen region]. Moscow: MAKSPress, 2014, 148 p.
- [7] Yantser O.V., Terent'eva E.Yu. *Obshchaya fenologiya i metody fenologicheskikh issledovaniy* [General phenology and methods of phenological research]. Ekaterinburg: USPU Publishing House, 2013, 218 p.
- [8] Solov'ev A.N. *Biota i klimat v XX stoletii. Regional'naya fenologiya* [Biota and climate in the XX century. Regional phenology]. Moscow: Pasva, 2005, 288 p.
- [9] Karaseva M.A., Karasev V.N., Matorkin A.A. *Fiziologicheskaya otsenka ustoychivosti listvennitsy sibirskoy v Srednem Povolzh'e* [Physiological assessment of the stability of Siberian larch in the Middle Volga region]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zones], 2003, t. XXI, no. 1, pp. 27–35.
- [10] Shestopalova V.V. *Osobennosti rosta, razvitiya i ustoychivosti vidov sosnovykh v usloviyakh Botanicheskogo sada Voronezhskogo gosuniversiteta* [Features of growth, development and sustainability of pine species in the conditions of the Botanical Garden of the Voronezh State University]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. № 1.* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy], 2003, pp. 89–95.

- [11] Surso M.V. *Fenologiya reproduktivnykh tsiklov i kachestvo semyan khvoynykh (Pinaceae, Cupressaceae) v severnoy tayge* [Phenology of reproductive cycles and quality of coniferous seeds (Pinaceae, Cupressaceae) in the Northern taiga]. Arctic Environmental Research, 2017, no. 17 (4), pp. 355–367.
- [12] Vasil'eva, G.V., Zhuk, E.A., Popov, A.G. *Fenologiya tsveteniya kedra sibirskogo (Pinus sibirica du tour), kedrovogo stlanika (Pinus pumila (Pall.) Regel) i gibridov mezhdru nimi* [Phenology of flowering of Siberian cedar (Pinus sibirica Du Tour), cedar elfin (Pinus pumila (Pall.) Regel) and hybrids between them]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Bulletin of Tomsk State University. Biology], 2010, no. 1 (9), pp. 61–67.
- [13] Konovalova E.V. Kisova S.V. Stavnikov D.Yu. *Vliyanie rostogeneriruyushchikh veshchestv na pokazateli vskhozhesti i fenologicheskoe sostoyanie seyantsev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris) i sosny sibirskoy (Pinus sibirica)* [Influence of growth-generating substances on germination indicators and phenological condition of seedlings of scots pine (Pinus sylvestris) and Siberian pine (Pinus sibirica)]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of modern natural science], 2021, no. 12, pp. 27–32.
- [14] Avtonomov A.N. *Fenologiya sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) na sklonovykh zemlyakh ekzogennoy tipa* [Phenology of scots pine (Pinus sylvestris L.) on exogenous slope lands]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Bashkir State Agrarian University], 2014, no. 1 (29), pp. 78–80.
- [15] Avtonomov A.N., Artem'eva, G.N. *Rost kul'tur sosny obyknovennoy na sklonakh raznoy ekspozitsii* [The growth of common pine crops on the slopes of different expositions]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, no. 14, pp. 1946–1949.
- [16] Iroshnikov A.I. *Listvenitsy Rossii. Bioraznootsuzhdeniye i selektsiya* [Larch trees of Russia. Biodiversity and breeding]. Moscow: VNIILM, 2004, 182 p.
- [17] Gukov G.V. *Listvenitsy i listvennichnye lesa rossiyanskogo Dal'nego Vostoka* [Larches and larch forests of the Russian Far East]. Vladivostok: GTS DVO RAN, 2009, 350 p.
- [18] Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Selektsiya lesnykh i dekorativnykh drevesnykh rasteniy* [Selection of forest and ornamental woody plants]. Moscow: MGUL, 2014, 552 p.
- [19] Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Introduktsiya tsennykh khvoynykh ekzotov* [Introduction of valuable coniferous exotics]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information], 2002, no. 10, pp. 30–53.
- [20] Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko L.I. *Khvoynye rossiyanskogo Dal'nego Vostoka — tsennyye ob'ekty izucheniya, okhrany, razvedeniya i ispol'zovaniya* [Conifers of the Russian Far East are valuable objects of study, protection, breeding and use]. Vladivostok: Dalnauka, 2007, 440 p.
- [21] Urusov V.M. *Gibridizatsiya v prirodnoy flore Dal'nego Vostoka i Sibiri* [Hybridization in the natural flora of the Far East and Siberia]. Prichiny i perspektivy ispol'zovaniya [Reasons and prospects of use]. Vladivostok: Dalnauka, 2002, 230 p.
- [22] Avrov F.D. *Ekologiya i selektsiya listvenitsy* [Ecology and breeding of larch]. Tomsk: Spektr, 1996, 213 p.
- [23] Rysin L.P. *Listvennichnye lesa Rossii* [Larch forests]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010, 343 p.
- [24] Koropachinskiy I.Yu., Milyutin L.I. *Estestvennaya gibridizatsiya drevesnykh rasteniy* [Natural hybridization of woody plants]. Novosibirsk: Geo, 2006, 223 p.
- [25] Makarov V.P., Bobrinev V.P., Milyutin L.I. *Geograficheskie kul'tury listvenitsy v Vostochnom Zabaykal'e* [Geographical cultures of larch in Eastern Transbaikalia]. Ulan-Ude: BNTs SO RAN, 2002, 192 p.
- [26] Bakutis V.E., Gorokhov V.A., Lunts L.B., Rastorguev O.S. *Inzhenernoye blagoustroystvo gorodskikh territoriy* [Engineering improvement of urban areas]. Moscow: Stroyizdat, 2002, 239 p.
- [27] Bulygin N.E., Kulagin Yu.G. *Fenologicheskie osobennosti nekotorykh vidov Larix Mill. v Sankt-Peterburge* [Phenological features of some species of Larix Mill. in St. Petersburg]. Rastitel'nye resursy [Plant resources], 2000, no. 3, pp. 39–47.
- [28] Mashina Yu.A. *Osobennosti introduktsii vidov roda Larix v Tsentral'noy lesostepi* [Features of the introduction of species of the genus Larix in the Central forest-steppe]. Dis Cand. Sci. (Agric.). Voronezh, 2002, 138 p.
- [29] Vorob'ev V.N. *Osobennosti plodonosheniya kedra sibirskogo v gornyykh usloviyakh* [Features of Siberian cedar fruiting in mountainous conditions]. Biologiya semennogo razmnosheniya khvoynykh Zapadnoy Sibiri [Biology of seed propagation of conifers of Western Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1974, pp. 15–70.
- [30] Karbasnikov A.A. *Lesovodstvenno-biologicheskie osobennosti rosta i razvitiya listvenitsy v usloviyakh Vologodskoy oblasti* [Forestry and biological features of the growth and development of larch in the Vologda region]. Dis Cand. Sci. (Agric.). Sankt-Peterburg, 2018, 166 p.
- [31] Karbasnikova E.B., Babich N.A., Karbasnikov A.A. *Osobennosti sezonnogo razvitiya listvenitsy (Larix Mill.) v usloviyakh yuzhnoy podzony taygi* [Peculiarities of Larch (Larix Mill.) seasonal development in conditions of South Taiga sub-zone]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 53–59. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59
- [32] Kishchenko I.T. *Sezonnoye razvitiye i perspektivnost' introdutsirovannykh vidov Pinus L. v taezhnoy zone (Kareliya)* [Seasonal development and prospects of introduced Pinus L. species in the taiga zone (Karelia)]. Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya [Bulletin of Perm University. Series: Biology]. 2021, no. 3, pp. 149–157.
- [33] Kishchenko I.T. *Vliyanie klimaticheskikh faktorov na sezonnyy rost derev'ev listvennykh lesoobrazuyushchikh vidov v taezhnoy zone* [The influence of climatic factors on the seasonal growth of deciduous forest-forming species in the taiga zone]. Russian Forestry J., 2017, pp. 51–63.
- [34] Shestak K.V. *Fenologicheskie issledovaniya v dendrarii SibGTU* [Phenological studies in the arboretum of SibSTU]. Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2006, no. 10, pp. 103–108.

- [35] Bulygin N.E., Korotaev A.A. *Osobennosti sezonnogo rosta korney drevesnykh rasteniy v usloviyakh zasukhi* [Features of seasonal growth of roots of woody plants in drought conditions]. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedenie* [Forestry, forest crops and soil science], 1976, no. 5, pp. 126–131.
- [36] Preobrazhenskiy S.M., Galakhov N.N. *Fenologicheskie nablyudaeniya* [Phenological observations]. Moscow: Detgiz Publishing House, 1948, 158 p.
- [37] Elagin I.N. *O metodike registratsii fenologicheskikh nablyudeniy vo vnutrilandschaftnom rayonirovanii* [On the methodology of registration of phenological observations in intra-landscape zoning]. *Trudy fenologicheskogo soveshchaniya* [Proceedings of the phenological meeting]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd, 1960, pp. 111–121.
- [38] Ivanenko B.I. *Fenologiya drevesnykh i kustarnikovykh porod* [Phenology of tree and shrub species]. Moscow: Selhozdat, 1962, 184 p.
- [39] Abaimov A.P. *Bioraznoobrazie listvennits Aziatskoy Rossii* [Biodiversity of larches in Asian Russia]. Novosibirsk: Geo, 2010, 159 p.
- [40] Araki N., Khatib I., Hemamali U., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* L. inferred from nucleotide variation of nuclear genes // *Tree genetics & genomes*, 2008, no. 4 (4), pp. 611–23.
- [41] Bobrov E.G. *Istoriya i sistematika listvennits* [History and systematics of larch]. Leningrad: Izdatel'stvo Nauka, 1972, 96 p.
- [42] Nakvasina E.N., Tikhonov P.R. *Vnutrividovaya izmenchivost' listvennitsy Sukacheva (Larix sukaczowii Dyl.) po gabitual'nym priznakam v estestvennykh nasazhdeniyakh Arkhangel'skoy oblasti* [Intraspecific variability of Sukachev larch (*Larix sukaczowii* Dyl.) by habitual characteristics in natural plantations of the Arkhangelsk region]. *Vestnik Pomorskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Estestvennye i tochnye nauki»* [Bulletin of the Pomor State University. Series «Natural and exact sciences»]. Arkhangelsk: PGU, 2005, no. 2 (8), pp. 29–35.

Author's information

Kotov Aleksey Aleksandrovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor, BMSTU (Mytishchi branch), kotov@bmstu.ru

Lavrenov Maksim Aleksandrovich — Cand. Sc. (Agriculture), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), lavrenov@bmstu.ru

Aksenov Petr Andreevich — Cand. Sc. (Agriculture), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), akxenovpa@bmstu.ru

Alyab'ev Aleksey Fedorovich — Dr. Sci. (Technical), Professor, BMSTU (Mytishchi branch), alyabiev@bmstu.ru

Received 25.01.2024.

Approved after review 08.02.2024.

Accepted for publication 26.06.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest