УДК 504.064.2: 502.057:57.025:574.24:519.876

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ ШИРИНЫ КАЖДОГО УЧЕТНОГО ЛИСТА БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ ОКОЛО МАКСИМУМА РОСТА В ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ

Мазуркин П.М., Кудряшова А.И.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола,
e-mail: kaf_po@mail.ru, Little-one7@yandex.ru

Доказано, что каждый учетный лист березы повислой (*Betula pendula*) имеет свою картину поведения в окружающей воздушной среде с колебательной адаптацией. По новому дополнению к патенту 2606189 на изобретение РФ сбоку на высоте 1,5–2,0 м со стороны преобладающих ветров по динамике с 15 июля по 23 сентября 2018 г. измерялась ширина каждого из 10 учетных листьев у ослабленной березы, растущей около автомобильной дороги на ул. Эшкинина г. Йошкар-Ола Республики Марий Эл. Доказано, что для таких слабых деревьев начало измерений нужно сдвинуть на 01–10 июля. На каждый учетный лист время вегетации около максимума роста влияет с коэффициентом корреляции более 0,99, поэтому можно измерять параметры микросреды вокруг каждого учетного листа. Опыты показали, что для высокого уровня адекватности всего можно измерять только 5 учетных листьев. Получено, что вегетационные органы имеют механизмы колебательной адаптации к окружающей среде не только всего дерева, но и по отдельным учетным листьям. Способность учетных листьев березы повислой давать отклик с высокой точностью на изменения микросреды вокруг каждого из них расширяет возможности косвенного биотестирования, причем без сопоставления с трудоемкими химическими анализами загрязнений воздуха. Такое сравнение можно выполнить только в первую серию экспериментов. Для повышения точности измерений в дальнейшем нужно использовать приборы, измеряющие метеопараметры вокруг каждого учетного листа и физиологические показатели также от каждого живого учетного листа.

Ключевые слова: вегетация ослабленной березы, 10 учетных листьев, ширина, динамика, колебательная адаптация, закономерности поведения

REGULARITIES OF THE DYNAMICS OF THE AVERAGE WIDTH OF THE LEAVES OF SILVER BIRCH NEAR THE MAXIMUM GROWTH IN THE VEGETATION PERIOD

Mazurkin P.M., Kudryashova A.I.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: kaf_po@mail.ru, Little-one7@yandex.ru

ABSTRACT It is proved that each measured birch leaf (*Betula pendula*) has its own picture of behavior in the surrounding microenvironment with strong vibrational adaptation. According to the new addition to the patent No. 2606189 for the invention of the Russian Federation from the side at an altitude of 1.5–2.0 m from the prevailing winds in dynamics from July 15 to September 23, 2018, the width of each of 10 registration leaves was measured for a weakened birch near the automobile roads on Eshkinin street of Yoshkar-Ola city. It is proved that for such trees, the beginning of measurements must be rescheduled earlier on July 01–10. The vegetation time near the growth maximum affects each record sheet with a correlation coefficient of more than 0.99, therefore, it is possible to measure the microenvironment parameters around each measured sheet. Vegetative organs have mechanisms of vibrational adaptation to the environment not only of the whole tree, but also on individual leaves. The ability of birch leaves to respond with high accuracy to changes in the microenvironment around each of them expands the possibilities of indirect biotesting, and without comparison with labor-intensive chemical analyzes of contaminants. Therefore, in the future, it is necessary to use instruments that measure meteorological parameters around each measured sheet and physiological indicators also from each such sheet.

Keywords: vegetation of weakened birch, 10 leaves, width, dynamics, vibrational adaptation, patterns of behavior

Летом 2018 года были проведены эксперименты по изучению влияния метеопараметров и загрязнений воздуха на динамику роста ширины учетных листьев березы повислой (*Betula pendula*). Вначале было выбрано направление преобладающих ветров для выбора локальной зоны на боковой поверхности кроны. Из этой зоны у 10 деревьев березы без срезания были измерены за вегетационный период по 10 учетных листьев. Отдельно было изучено влияние координат расположения осей ствола деревьев, а также расстояния до локальных зон

от края автомобильной дороги и от поверхности почвы. Кроме того, были сравнены ширина листьев с тремя видами загрязнения на улицах. Было замечено, что высокая адекватность моделей динамики роста и развития ширины листьев позволяет рассматривать их по отдельности. Тогда каждый учетный лист на планете может стать индикатором.

Глобальное число деревьев на планете составляет примерно 3,04 триллиона [1].

Россия является лидером: в Сибири, на Дальнем Востоке и других местах рас-

тет 640 миллиардов деревьев. Далее по 300 миллиардов деревьев имеют Канада и Бразилия. Самыми зелеными уголками планеты, помимо России, являются Скандинавия, Северная Америка и тропики. В северных широтах деревья растут плотно, занимая меньшую площадь [2].

Человечество использует ископаемые виды топлива, к середине XXI в. значения CO_2 будут одинаковы с ранним эоценом (50 млн лет назад). Если концентрация CO_2 продолжит расти до XXIII в., Земля будет реагировать как за 1,5 миллиарда лет [3].

Эти знания повышают шансы на разработку моделей для описания лесной системы в изменяющихся климатических условиях [4]. Можно утверждать, что будущее сдерживания количества CO_2 находится, прежде всего, в увеличении площади лесов [5].

Динамику метеопараметров можно описать множеством асимметричных вейвлетов вплоть до ошибки измерений. Аналогично хорошо квантуется содержание CO_2 в атмосфере. По вейвлетам универсальной конструкции изменяется динамика углерода в Европе [6].

В экологических технологиях с использованием листьев березы повислой [7] постепенно приходит понимание о необходимости моделирования взаимных связей между параметрами структуры листьев растений методом идентификации [8].

Онтогенез – индивидуальное развитие организма от вегетативного зачатка до природной смерти. Благодаря активной деятельности меристем и фотосинтетической активности листьев зеленое растение при-

обретает ряд черт, которые характеризуют его рост [9, 10].

Если на каждом хвойном или лиственном дереве находится примерно 10^5 листьев, то в мире за год будет находиться около $3 \cdot 10^{17}$ листьев. Каждый из них имеет свою жизнь.

Цель статьи: повышение точности индикации качества окружающей среды; каждый лист одной березы микросреды в динамике около максимума ширины по патенту 2606189 на высоте 1,5–2,0 м со стороны преобладающих ветров с 15 июля по 23 сентября 2018 г. у всех 10 учетных листьев около автомобильной дороги на ул. Эшкинина г. Йошкар-Ола.

Материалы и методы исследования

Колебания записываются волновой формулой [8] вида

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}),$$

$$A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}),$$

$$p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \quad (1)$$

где y – показатель (зависимый фактор), i – номер составляющей (1), m – количество членов в (1), x – объясняющая переменная (влияющий фактор), $a_1 \dots a_8$ – параметры модели (1) в CurveExpert-1.40, A_i – амплитуда (половина) на оси y , p_i – полупериод колебания (ось x).

Из 10 учетных берез в г. Йошкар-Ола самым сложным по колебательной адаптации оказалось дерево № 3, произрастающее на ул. Эшкинина (рис. 1, рис. 2).

Рис. 1. Береза на ул. Эшкинина

Рис. 2. Карта-схема расположения учетной березы № 3

Из графиков на рис. 3 видно, что в среднем все 100 листьев имеют коэффициент корреляции 0,9133, а береза № 3 на ул. Эшкинина меньше – 0,8136. При этом наименьший из 10 берез максимум средней ширины был достигнут уже через 92 суток и равен 39,77 мм.

Для всех 100 учетных листьев было получено уравнение биотехнического закона:

$$b_{100} = 0,059882\tau^{1.77824} \exp(-0,018210\tau^{0.97935}), \quad (2)$$

а для 10 учетных листьев березы № 3 на улице Эшкинина –

$$b_{10} = 1,00469 \cdot 10^7 \tau^{6.43181} \exp(-20,62680\tau^{0.15494}). \quad (3)$$

Первый параметр получает очень высокое значение $1,00469 \cdot 10^7$ и образуется так называемый странный аттрактор поведения. Нужно отодвинуть начало измерений, например опыты начать с 01.07. Тогда появится определенность в поведении слабых в росте листьев.

В табл. 1 приведены средние ширины для 10 учетных листьев.

Всего получились 18 строк. Первая точка 01 мая в 2018 г. – начало вегетационного периода, поэтому ставим 0. Из данных таблицы видно, что каждый учетный лист имеет свой характер роста, поэтому можно считать индивидуальный рост зависящим от микросреды со своими параметрами. Тогда каждый лист березы повислой имеет свою картину динамики.

100 учетных листьев от всех 10 берез

10 учетных листьев березы № 3 на ул. Эшкинина

Рис. 3. Графики динамики ширины учетных листьев березы повислой

Таблица 1

Динамика ширины 10 учетных листьев березы повислой на ул. Эшкинина

Дата	Время <i>t</i> , сутки	Ширина учетных листьев по их номерам										$\bar{b}$, мм
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
01.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.07	75	36,0	28,3	35,3	44,8	22,6	33,0	43,8	43,5	31,6	39,1	35,80
22.07	82	36,2	30,2	35,3	44,9	32,1	38,0	43,8	45,7	32,7	39,4	37,81
25.07	85	36,2	36,2	35,3	45,0	32,3	40,5	44,1	45,7	33,0	41,0	38,93
29.07	89	36,2	36,3	35,3	45,0	32,3	41,0	46,0	45,8	36,0	42,5	39,64
01.08	92	31,5	36,3	35,3	45,0	32,5	41,0	46,1	45,8	37,0	42,5	39,77
05.08	96	31,5	36,4	35,3	45,0	32,6	41,1	46,1	45,8	37,0	43,0	39,38
08.08	99	31,5	36,1	34,4	45,0	32,3	41,1	48,2	45,7	36,0	39,6	38,99
12.08	103	31,5	32,1	34,3	45,0	32,3	39,3	46,3	45,5	36,5	39,6	38,24
15.08	106	31,5	31,1	26,0	44,7	32,0	38,0	46,0	45,2	33,0	39,6	36,71
19.08	110	31,5	30,2	26,0	44,0	30,5	37,8	46,0	45,0	32,4	39,6	36,30
22.08	113	31,0	30,2	26,0	43,5	29,5	37,5	46,0	45,0	32,0	39,6	36,03
26.08	117	31,0	30,2	26,0	43,4	29,1	37,5	46,0	45,0	31,8	39,6	35,96
29.08	120	31,0	30,2	26,0	43,4	29,0	37,5	46,0	45,0	31,8	39,6	35,95
02.09	124	31,0	30,2	26,0	43,4	28,2	37,5	45,9	45,0	31,8	39,6	35,86
09.09	131	31,0	30,2	26,0	43,3	28,0	37,5	45,9	45,0	31,8	39,6	35,83
16.09	138	31,0	30,0	26,0	43,3	28,0	37,2	45,9	45,0	31,8	39,6	35,78
23.09	145	30,9	29,9	25,9	43,2	27,4	37,0	45,8	44,9	31,7	37,3	35,40

Примечание. Полужирным шрифтом показаны максимальные значения ширины учетного листа.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 приведены параметры модели (1) с 10 составляющими для средней ширины листа, первый из которых является трендом в виде биотехнического закона [9]. Цикличность колебания на 01.05.2018 г. в виде полупериода a_{5i} в начале вегетационного

периода, для 10 учетных листьев в среднем, изменяется от 2,70 до 13,15 суток.

На рис. 4 приведены графики трех первых формул по данным табл. 2.

Первое колебание началось рано, и листья березы испытывали сильное возмущение, которое затем успокоилось с увеличением полупериода колебания.

Таблица 2

Динамика (1) средней ширины у 10 учетных листьев березы на ул. Эшкинина

Номер <i>i</i>	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i}x^{a_{4i}}) \cos(\pi x / (a_{5i} + a_{6i}x^{a_{7i}}) - a_{8i})$								Коэф. корр.
	Амплітуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	<i>r</i>
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
1	4,32635e7	6,24869	21,67686	0,14732	0	0	0	0	1,0000
2	-2,05969e-17	11,49000	0,26966	0,85592	8,78467	0,00060033	1,86181	-3,30341	
3	8,74349e-136	80,02657	1,32663	0,13010	7,86293	0	0	-3,70420	
4	-4,93075e-69	41,89169	0,37427	0,99985	7,96111	-0,020461	1,00021	-4,80105	0,9213
5	1,52730e-8	3,77585	0,011217	1,19244	13,14522	0	0	4,35457	0,6294
6	-8,35746e-6	1,97862	0,012755	1,01717	7,55676	0,060658	1,00352	6,13634	0,4563
7	-3,41083e-16	6,77343	0	0	7,91189	8,26111e-7	1	2,51452	0,8994
8	-5,63008e-7	2,23344	0,0045877	1,03250	2,70469	-1,02809e-5	1	3,64260	0,6651
9	0,0092940	2,19661	0,10515	0,99992	7,56131	7,96849e-5	1,02590	-2,04167	0,7055
10	-6,81989e-7	2,72738	0,035661	1,00012	4,15456	-7,23839e-5	1,03938	5,44068	0,5014

Тренд по биотехническому закону

Первое колебание

Второе колебание

Биотехнический закон и два колебания

Рис. 4. Графики динамики средней ширины группы из 10 учетных листьев березы повислой

Четвертая составляющая модели (1)

Пятая составляющая

Шестая составляющая

Седьмая составляющая

Восьмая составляющая

Девятая составляющая

Десятая составляющая

Остатки после десятой составляющей

Рис. 5. Графики динамики средней ширины группы из 10 учетных листьев березы повислой

Второе колебание показывает сильный тремор после максимума через 92 сутки после 01.05.2018 у средней ширины 10 учетных листьев.

Остальные волны колебательного возмущения показаны на рис. 5.

Причина ранней остановки роста заключается в седьмом члене. Здесь амплитуда колебания резко нарастает по показательному закону. В итоге система из множества листьев березы повислой на ул. Эшкинина как бы «идет в разнос». Таким образом, все растения через свои вегетационные органы имеют механизмы колебательной адаптации к окружающей среде не только всего дерева, но и, как будет показано далее, и по отдельным учетным листьям.

В табл. 3 даны параметры моделей динамики каждого из 10 листьев по табл. 1.

Из-за раннего торможения роста дата 15.07 оказалась запоздалой для учетных листьев № 3 и № 1. Лист № 5 получил медленный рост, а лист № 8 до достижения максимума ширины получил только одну минимальную точку. Поэтому нужно для

ослабленных деревьев, имеющих плохие классы санитарного состояния, начинать измерения с 10.07 или даже с 01.07. Тогда все учетные листья, даже с худшими физиологическими состояниями, получают возможность идентификации закономерностей по измеренным данным. Коэффициент корреляции у остальных шести листьев выше 0,99. Это доказывает возможность моделирования индивидуально динамики роста каждого учетного листа, что повышает возможности фитоиндикации.

На рис. 6 показаны графики поведения в динамике роста каждого учетного листа.

Второй учетный лист получил сильное колебательное возмущение уже со старта вегетации 01.05.2018 Четвертый лист получил ранние рост и развитие. Поэтому сравнение показывает, что каждый учетный лист, из-за изменчивости микросреды вокруг каждого вегетационного органа, имеет собственную картину поведения. Поэтому нужно использовать приборы, измеряющие метеопараметры и физиологические показатели от каждого учетного листа.

Таблица 3

Модели (1) динамики ширины каждого учетного листа березы повислой

Номер <i>i</i>	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i}x^{a_{4i}}) \cos(\pi x / (a_{5i} + a_{6i}x^{a_{7i}}) - a_{8i})$								Кэф. корр. <i>r</i>
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}		
Первый учетный лист березы повислой на ул. Эшкинина не моделируется									
Второй учетный лист									
1	2,45859e7	12,04915	30,61914	0,17640	0	0	0	0	0,9956
2	2,74472	0,40913	0,017410	1	0,13872	0,015508	1	2,40441	
Третий учетный лист не моделируется									
Четвертый учетный лист									
1	23,05398	0,30760	0,076063	0,49920	0	0	0	0	0,9999
2	2,05754e-20	11,89785	0,086420	1,03522	18,18754	0,00011413	1,99469	3,28656	
Пятый учетный лист, моделируется только тренд									
Шестой учетный лист									
1	1,88897e6	10,38497	26,28833	0,17413	0	0	0	0	0,9994
2	1,22163e-15	10,48126	0,12818	1	8,59950	0,071161	1	0	
Седьмой учетный лист									
1	0,87549	2,313443	1,45493	0,331123	0	0	0	0	0,9993
2	7,90984e-13	8,41780	0,18484	0,88813	0,54963	0,016879	1,06059	5,51059	
Восьмой учетный лист, моделируется только тренд									
Девятый учетный лист									
1	2,28361e6	9,71912	25,01316	0,17443	0	0	0	0	0,9981
2	8,84779e-13	20,91926	16,43723	0,30733	3,80694	0,0039357	1,45025	0,32783	
Десятый учетный лист									
1	1,19530	1,19843	0,11066	0,62734	0	0	0	0	0,9986
2	5,35516e-16	11,09754	0,26600	0,88222	0,25417	0,013188	1,03976	-4,70878

Второй учетный лист

Четвертый учетный лист

Шестой учетный лист

Седьмой учетный лист

Девятый учетный лист

Десятый учетный лист

Рис. 6. Графики динамики ширины учетных листьев березы повислой

Закключение

По патенту 2606189 на изобретение сбоку на высоте 1,5–2,0 м со стороны преобладающих ветров по динамике с 15 июля по 23 сентября 2018 г. измерялась ширина 10 учетных листьев у ослабленной березы около автомобильной дороги на ул. Эшкинина г. Йошкар-Ола. Доказано, что для таких деревьев начало измерений нужно сдвинуть до 01–10.07.

На каждый учетный лист время вегетации около максимума влияет с коэффициентом корреляции более 0.99, поэтому

можно измерять параметр микросреды даже вокруг каждого учетного листа. Вегетационные органы имеют механизмы колебательной адаптации к окружающей среде не только всего дерева, но и по отдельным учетным листьям.

Способность учетных листьев березы повислой давать отклик с высокой точностью на изменения микросреды вокруг каждого из них расширяет возможности косвенного биотестирования, причем без сопоставления с трудоемкими химическими загрязнениями.

Список литературы / References

1. Crowther T.W., Glick H.B., Covey K.R., Bettigole C., et al. Mapping tree density at a global scale. *Nature*. 2015. V. 525. P. 201–205. DOI: 10.1038/nature14967.
2. Баранова А. Больше всего деревьев на Земле растет в России. *National Geographic Россия*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nat-geo.ru/nature/762321-bolshe-vsego-derevev-na-zemle-rastet-v-rossii> (дата обращения: 18.08.2019).
- Barinova A. Most of the trees on Earth grow in Russia. *National Geographic Russia*. 2015. [Electronic resource]. URL: <https://www.nat-geo.ru/nature/762321-bolshe-vsego-derevev-na-zemle-rastet-v-rossii> (date of access: 18.08.2019) (in Russian).
3. Foster G.L., Royer D.L., Lunt D.J. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nature communications*. 2017. V. 4. Iss. 8. P. 14845. DOI: 10.1038/ncomms14845.
4. Mdenpp M. Impacts of temperature and ozone on carbon retention processes of birch and aspen *Dissertations in Forestry and Natural Sciences*. Finland, Joensuu, on June, 08, 2012, 54 p.
5. Büntgen U., Wacker L., Galván J.D., Arnold S., et al. Tree rings reveal globally coherent signature of cosmogenic radiocarbon events in 774 and 993 CE. *Nature communications*. 2018. V. 9. P. 3605. DOI: 10.1038/s41467-018-06036-0.
6. Mazurkin P.M., Kudrjashova A.I. Factor analysis of annual global carbon dynamics (according to Global Carbon Budget_2017v1.3.xlsx). Materials of the International Conference «Research transfer» – Reports in English (part 2). November 28. Beijing: PRC, 2018. P. 192–224.
7. Zhang Y., Bielory L., Georgopoulos P. Climate change effect on Betula (birch) and Quercus (oak) pollen seasons in US. *Int. J. Biometeorol.* 2014. V. 58. Iss. 5. P. 909–919. DOI:10.1007/s00484-013-0674-7.
8. Mazurkin P.M. Method of identification. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Albena, 2014. V. 1 (6). P. 427–434.
9. Polgar C.A., Primack R.B. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*. 2011. V. 191(4). P. 926–941. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2011.03803.
10. Rousi M., Pusenius J. Variations in phenology and growth of European white birch (*Betula Pendula*) clones. *Tree Physiology*. 2005. V. 25. P. 201–210. DOI: 10.1093/treephys/25.2.201.