

34. Conover W. J., Iman R. L. 1979. On multiple-comparisons procedures. Technical Report LA-7677-MS, Los Alamos Scientific Laboratory. Los Alamos, NM. 14 p.
35. Holm S. 1979. A simple sequentially rejective multiple test procedure. — Scand. J. Statistics. 6(2): 65—70.
36. Pohlert T. 2014. The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR). R package. <http://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>
37. Abrams M. D., Kubiske M. E. 1990. Leaf structural characteristics of 31 hardwood and conifer tree species in central Wisconsin — influence of light regime and shade-tolerance rank. — Forest Ecol. Manag. 31: 245—253.
38. Ustin S. L., Gamon J. A. 2010. Remote sensing of plant functional types. — New Phytol. 186: 795—816.
39. Hutchison K. D., Mahoney R. L., Vermote E. F., Kopp T. J., Jackson J. M., Sei A., Iisager B. D. 2009. A geometry-based approach to identifying cloud shadows in the VIIRS cloud mask algorithm for NPOESS. — J. Atmosph. Ocean. Technol. 26(7): 1388—1397.
40. Masek J. G., Huang C., Wolfe R., Cohen W., Hall F., Kutler J., Nelson P. 2008. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record. — Remote Sens. Environ. 112(6): 2914—2926.
41. Zhu Z., Woodcock C. E., Olofsson P. 2012. Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. — Remote Sens. Environ. 122(1): 75—91.
42. Vermote E., Saleous N. January. 2007. LEDAPS surface reflectance product description. Version 2.0. 21 p.
43. QGIS Development Team. 2016. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://www.qgis.org>
44. Wichtmann W., Oehmke C., Bärtsch S., Deschan F., Malashevich U., Tanneberger F. 2013. Combustibility of biomass from wet fens in Belarus and its potential as a substitute for peat in fuel briquettes. — Mires and Peat. 13(6): 1—10.
45. Shaver G. R., Street L. E., Rastetter E. B., Van Wijk M. T., Williams M. 2007. Functional convergence in regulation of net CO₂ flux in heterogeneous tundra landscapes in Alaska and Sweden. — J. Ecol. 95(4): 802—817.

Раст. ресурсы. 2017, 53(4): 580—593

НОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА СТВОЛОВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

© *А. Ю. Лянгузов,¹ В. Т. Ярмишко,² И. В. Лянгузова*,²*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: ILyanguzova@binran.ru

Предложен метод оценки площади годичного прироста древесных растений на примере сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (Pinaceae) с использованием приближенных, а не точно измеренных значений площадей годичных приростов древесины, исходя из предположения о нарастания древесины стволов в виде концентрических

колец. Для статистического анализа площадей годичных приростов модельных деревьев рекомендуется применять непараметрические методы в сочетании с бутстреп-методом, что позволяет получать несмещенные оценки среднего при малом объеме выборок и дают более наглядное графическое представление результатов. Автоматизация вычислений и графического представления результатов осуществлена с помощью скрипта (микропрограммы), написанного на языке *R* свободного статистического пакета [17]. Для реализации метода бутстрепа использовали модуль *bootstrap* из репозитория *R*. Предложенный метод обладает вполне удовлетворительной точностью, не требует больших затрат времени и специальной подготовки, что позволяет проводить анализ площади годичных приростов стволов древесных растений как в пределах одного местообитания, так и в разных экологических условиях произрастания деревьев.

Ключевые слова: радиальный прирост, площадь годичных слоев древесины, бутстреп-метод, *Pinus sylvestris*, Кольский п-ов.

Методы дендрохронологии основаны на сборе информации о ширине годичных колец (радиальном приросте) древесины деревьев, особенностях роста и структуры древесины различных видов древесных растений [1—5]. Эти сведения дают интегральную биоэкологическую информацию об условиях роста отдельных древесных растений. Наиболее часто используемым в дендрохронологических исследованиях показателем является радиальный прирост, величина которого в значительной мере варьирует в зависимости от воздействия разнообразных природных и антропогенных факторов. В связи с этим оценка прироста зависит, в том числе, и от азимутального направления (север—юг) отбора кернов. Однако линейный размер годичных колец не отражает величины годичного прироста массы древесины по годам, так как при постоянных климатических условиях, начиная с некоторого возраста, радиальный прирост снижается, в то время как диаметр и масса дерева прирастает [2, 6—9]. В последнее время в качестве комплексного показателя, характеризующего рост дерева, используют площадь ежегодного прироста, которая дает наиболее точную информацию о ежегодной продукции древесины [10—12]. Сложность применения для анализа площадей ежегодного прироста связана с ограниченной возможностью сбора древесных спилов. Для расчета площадей используют керны, отобранные в нескольких азимутальных направлениях. Полученные данные дают возможность рассчитать средний радиус колец, используемый для дальнейшего расчета площадей приростов с некоторой ошибкой усреднения.

Анализ научных публикаций в области дендрэкологии, дендрохронологии и дендроклиматологии показывает, что в настоящее время для моделирования и анализа дендрэкологических данных используется достаточно широкий спектр аппаратно-программных средств, что обусловлено задачами исследований [10—16]. Это может быть статистическая обработка первичных данных измерений радиального прироста и получение надежных обобщенных хронологий вплоть до 1000 лет и более назад, сопоставление характеристик прироста с факторами внешней среды (биоиндикация), моделирование процессов роста, изучение пространственного распределения величины радиального прироста на спилах модельных деревьев, а также визуализация результатов анализа. Так, например, Ю. В. Волковым и В. А. Тартаковским [11, 12] для биоиндикационных целей разработан специальный алгоритм анализа площадей годичных слоев древесины с использованием численного и натурального экспериментов, которые дают весьма сопоставимые результаты, однако требуют специальной подготовки исследователя и занимают достаточно много времени. Кроме того, наличие разновозрастных деревьев на исследуемом участке

леса приводит к существенному варьированию площади годичных приростов древесины деревьев в пределах одного местообитания. Еще большую неоднородность вносят различия в экологических условиях произрастания деревьев. Вследствие указанных причин интервал варьирования данных по площадям годичных слоев древесины очень велик, излишняя точность в оценивании индивидуальных характеристик не оправдана и затрудняет сопоставление продуктивности различных древостоев. В связи с этим для сравнительного анализа древостоев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., находящихся в условиях разного режима аэротехногенной нагрузки (см. статью Ярмишко и др., в этом выпуске журнала), мы разработали метод оценивания ежегодного прироста древесины стволов сосны с использованием радиального прироста и площади годичных слоев древесины.

Исследования проводили в центральной части Кольского п-ова в августе 2014 г. на серии постоянных пробных площадей (ППП) в средневозрастных сосняках лишайниково-зеленомошных в фоновом районе, удаленном от комбината «Североникель» на 70 км, и в пределах импактной зоны (15 км от комбината). Краткая характеристика ППП приведена в таблице (см. статью Ярмишко и др. в этом выпуске журнала). На каждой ППП выбирали по 6—12 модельных деревьев сосны обыкновенной примерно одного возраста, у которых на высоте 1.3 м с двух противоположных сторон ствола (южной и северной) отбирали керны буравом Пресслера. На каждом керне проводили измерения радиального прироста (ширины годичных колец древесины) с помощью прибора Линтаб.

Рабочая гипотеза. Предлагается рассматривать поперечный срез ствола дерева как набор концентрических кругов, площадь каждого годичного кольца представляет собой разность между двумя кругами соседних годов. Полагаем, что величины таких приближенных и точно измеренных площадей колец близки и приближенные значения площади колец вполне пригодны для сравнительной количественной оценки ежегодного прироста древесины деревьев на различных участках леса.

Мы предполагаем, что распределение площадей годичных приростов древесины может отличаться от нормального закона, в связи с этим стандартные параметрические методы статистической обработки результатов будут приводить к смещенным оценкам. В этом случае вследствие малого объема выборок эмпирических данных целесообразно применять бутстреп-метод для получения несмещенных значений площадей годичных приростов модельных деревьев и сглаженного более наглядного представления результатов.

Алгоритм расчета площади годичного прироста колец древесины. Прежде всего необходимо знать общий радиус всего ствола (древесины без коры). Есть два способа для этого: а) просуммировать все радиальные приросты ствола дерева от первого до последнего; б) измерить диаметр (радиус) ствола напрямую (более корректный способ, но трудно выполнимый на практике, так как необходимо измерять диаметр ствола без коры).

Нами был использован следующий подход. Годичный радиальный прирост (P) каждого дерева был представлен числовым рядом $P_1 \dots P_n$ (мм) за период от условно первого года жизни (первый радиус R_1) до последнего (в нашем случае 2014 г). Радиусы колец (R) вычисляли последовательным суммированием $R_1 = P_1$, $R_2 = R_1 + P_2$, $R_3 = R_2 + P_3$, ..., $R_n = R_{n-1} + P_n$ (или обратной процедурой вычитания из полного радиуса ствола $R_{n-1} = R_n - P_n$...). Затем последовательно вычисляли площади кругов по формуле $S_i = \pi R_i^2$. Для расчета площади годичного прироста (dS_i) древесины вычитали площадь меньшего круга из площади большего $dS_i = S_i - S_{i-1}$. Для осуществления вышеописанных вычис-

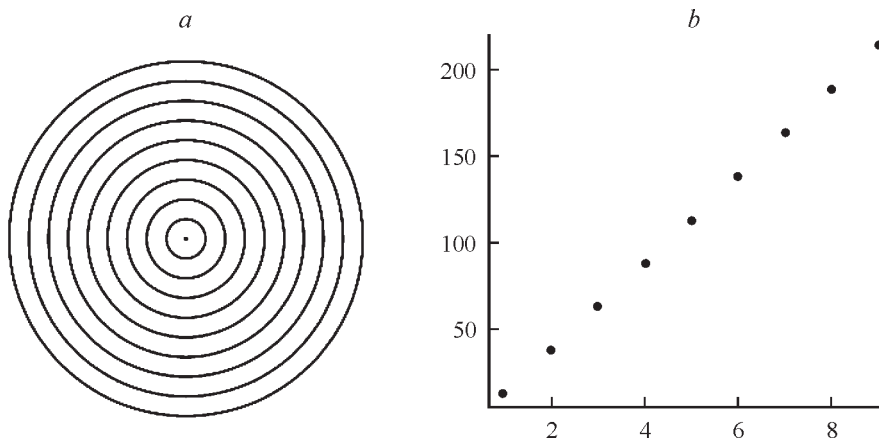


Рис. 1. Годичные кольца теоретического дерева с постоянным годичным приростом (а) и зависимость их площади от возраста дерева (b).

По горизонтали — номер кольца; по вертикали — площадь кольца, см².

Fig. 1. Theoretical annual tree-rings with constant annual increment (a) and dependence of their area from the age of a tree (b).

X-axis — the ring number; y-axis — annual ring area, cm².

лений, графического представления результатов и проведения статистического анализа применяли скрипт (микропрограмму), написанный на языке R (свободного статистического пакета) [17].

Сначала рассмотрим теоретическое дерево с постоянным радиальным приростом (рис. 1а). В этом случае площадь прироста кольца находится в линейной зависимости от возраста дерева (рис. 1b). Однако при рассмотрении поперечного среза реального дерева сосны наблюдаются существенные отличия от теоретического дерева (рис. 2).

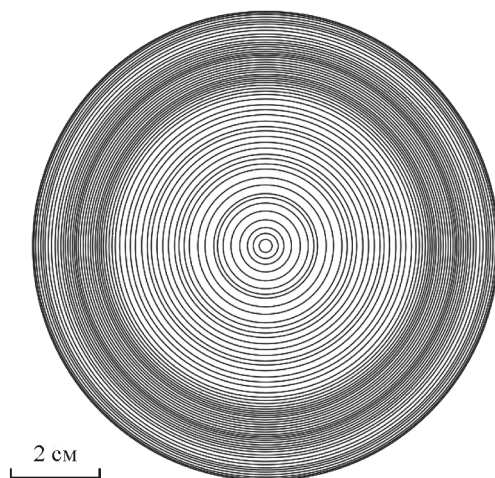


Рис. 2. Приближенное представление годичных колец реального дерева в виде концентрических кругов.

Fig. 2. Approximate representation of annual rings of a real tree as concentric circles.

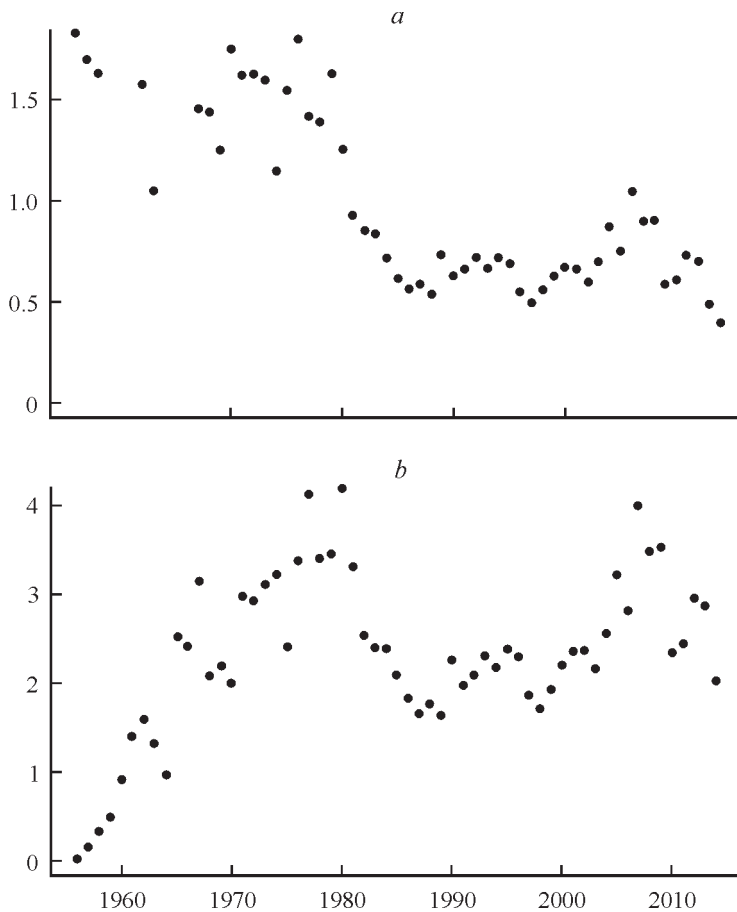


Рис. 3. Радиальный прирост (*a*) и площадь годичных приростов (*b*) древесины ствола 1-го модельного дерева сосны обыкновенной (фоновый район на территории Кольского п-ова).

Здесь и на рис. 5. По горизонтали — год; по вертикали: *a* — радиальный прирост, мм; *b* — площадь кольца, см².

Fig. 3. Radial increment (*a*) and area (*b*) of stem wood annual increment of the 1-st model Scots pine tree (background area of the Kola peninsula).

Here and in Fig. 5. *X*-axis — year; *y*-axis: *a* — radial increment, mm; *b* — annual ring area, cm².

Как видно из рис. 3*a*, на котором представлена зависимость радиального прироста древесины ствола модельного дерева сосны из фонового района от его возраста, отмечается постепенное снижение радиального прироста колец к 20—30-летнему возрасту с выходом на плато, в то время как зависимость площади прироста колец этого же дерева от возраста имеет противоположную направленность (рис. 3*b*). Примерно до 15—25-летнего возраста происходит активное увеличение площади прироста древесины ствола, а затем величина этого показателя выходит примерно на постоянный уровень.

Принципиально другую картину представляет поперечный срез 2-го модельного дерева сосны, произрастающей в импактной зоне комбината «Североникель» (рис. 4). В этом случае характер изменения годичного радиального

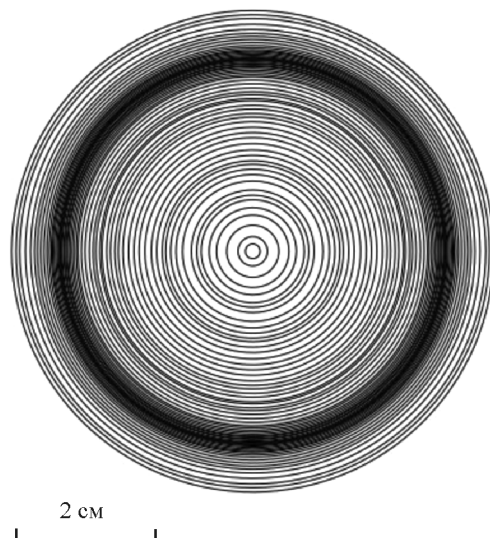


Рис. 4. Приближенное представление поперечного среза ствола сосны обыкновенной из импактной зоны комбината «Североникель» (Кольский п-ов).

Fig. 4. Approximate representation of a cross-section of Scots pine stem from the impacted zone of «Severonickel» smelter (Kola peninsula).

прироста в зависимости от возраста дерева напоминает синусоиду, а площадь годичных приростов постоянно возрастает (рис. 5*a, b*). Однако если у 1-го модельного дерева площадь годичных приростов варьирует в основном в пределах 2—4 см², то максимальная величина площади прироста 2-го модельного дерева за 2014 г. не превышает 1.8 см², что указывает на худшие условия роста.

При сопоставлении профилей площадей годичных приростов всех модельных деревьев, произрастающих на одной ППП, выявляется следующая закономерность. Профили всех деревьев имеют в основном сходный характер изменения площади годичных приростов с увеличением возраста дерева, что отражает однотипность условий местообитания (рис. 6). В то же время интервал варьирования значений достаточно велик, что свидетельствует об отсутствии необходимости в максимально точном измерении площади годичных приростов и вполне удовлетворительной точности предлагаемого метода оценки площади колец.

Для количественной оценки годичных приростов древесины стволов деревьев на отдельной ППП и сравнительного анализа этого показателя для разных условий местообитаний необходимо провести статистическую обработку данных с целью выявления центра распределения и точности его оценивания. Чаще всего для этих целей применяют среднее арифметическое (математическое ожидание) и его 95%-ный доверительный интервал. Причиной этого является простота нахождения этих оценок и их наименьшая дисперсия. Однако если распределение исследуемых величин не подчиняется нормальному закону распределения или не может быть сведено к нему, что и наблюдается в нашем случае, рекомендуется вместо среднего арифметического использовать непараметрический критерий — медиану, более устойчивый к выбросам отдельных результатов и асимметрии распределения. Для нахождения доверительного интервала медианы существуют простые формулы, однако они при-

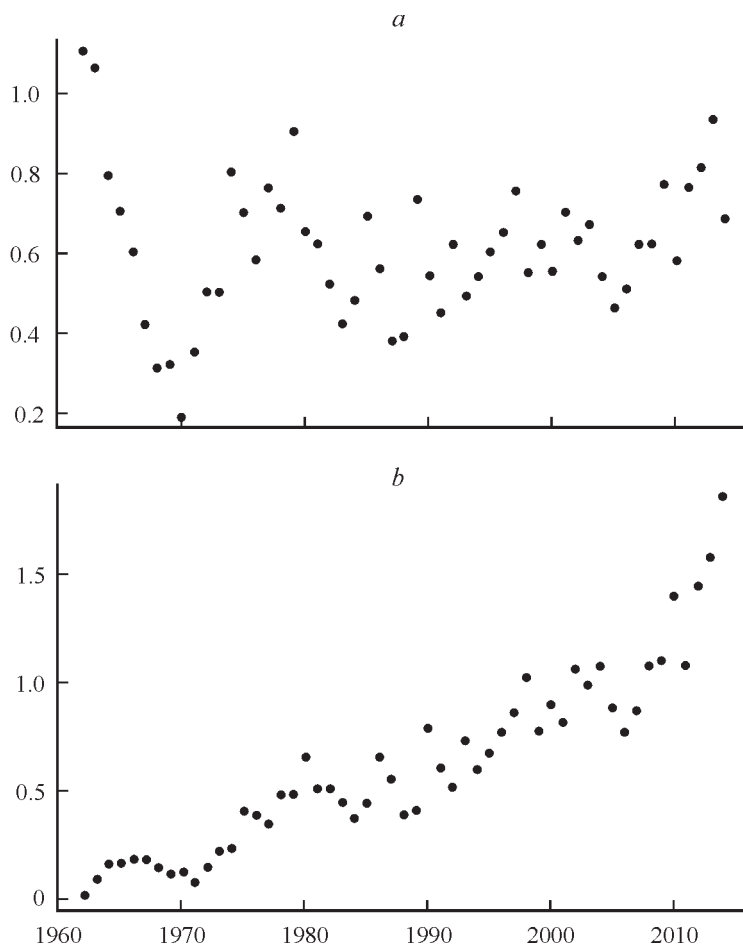


Рис. 5. Радиальный прирост (*a*) и площадь годовых приростов (*b*) древесины ствола 2-го модельного дерева сосны обыкновенной (импактная зона комбината «Североникель»).

Fig. 5. Radial increment (*a*) and area (*b*) of stem wood annual increment of the 2-nd model Scots pine tree (impacted zone of «Severonickel» smelter).

менимы при достаточно большой выборке. Так, например, если в выборке имеется всего 6—7 значений, то границы этого интервала совпадают с наименьшим и наибольшим значением в выборке. В такой ситуации можно использовать метод бутстрепа, предложенный Б. Эфроном [18].

Суть метода сводится к следующему. С помощью генератора случайных чисел из реальной выборки формируются псевдореальные выборки (бутстреп-выборки), содержащие те же значения и в таком же объеме, но в другой комбинации; при этом какие-то из полученных значений могут попасть в бутстреп-выборку несколько раз, а какие-то ни разу. Таких бутстреп-выборок можно создать несколько сотен или тысяч. В нашем случае оказалось вполне достаточно 100—200 повторений, результаты были такие же, как и для 5000 повторений; во всех случаях вычисления занимали доли секунды на одно дерево. Затем в каждой бутстреп-выборке находим медиану и образуем массив из нескольких сотен (тысяч) медиан. Медиана последнего массива пред-



Рис. 6. Профили (сглаженные) площадей годичных приростов всех модельных деревьев с одной ППП из фонового района на территории Кольского п-ова.

По горизонтали — год, по вертикали — площадь кольца, см².

Fig. 6. Profiles (smoothed) of annual increment areas of all model trees from one sample plot in the background area of the Kola peninsula.

X-axis — year; y-axis — annual ring area, cm².

ставляет собой искомый центр распределения, а 2.5- и 97.5%-ные квантили этого массива (отсортированного) дают 95%-ный доверительный интервал найденной медианы. В данной работе для реализации метода бутстрепа использовали модуль *bootstrap* из репозитория *R*. Ранее было показано, что применение бутстреп-метода позволяет извлечь дополнительную информацию при описании сложных кинетических ферментативных реакций в биохимических исследованиях [19].

В качестве примера на рис. 7 приведены 6 исходных значений площади прироста древесины за один год, медианы бутстреп-выборок и бутстреп-оценка медианы и ее 95%-го доверительного интервала. Медиана и доверительный интервал, найденные стандартным способом, составляют 1.6 и 0.9—3.4 см² соответственно. Оценки, найденные с помощью 200 бутстреп-выборок: медиана 1.6, доверительный интервал 0.9—1.9 см². Для сравнения: среднее арифметическое и доверительный интервал для этих данных равны соответственно 1.8 и 1.1—2.5 см². Из приведенного примера видно, что параметрические методы оценивания дают смещенную оценку центра распределения; расчет доверительного интервала с помощью бутстреп-метода позволяет уменьшить ширину доверительного интервала по сравнению со стандартным способом расчета доверительного интервала. Таким образом, применение бутстреп-метода позволяет скорректировать форму распределения данных и сделать более точными оценки его параметров.

Известно, что в разные периоды своей жизни деревья растут с разной скоростью, поэтому для исследования рекомендуется выбирать деревья по возможности одного возраста (или максимально близкие по возрасту). В качестве примера на рис. 8 представлены обобщенный профиль площади годичных приростов древесины 6 модельных деревьев с одной ППП и его 95 %-ный доверительный интервал. Как мы видим, до 5—10-летнего возраста дерева площадь годичных приростов древесины ствола нарастает, а затем выходит на

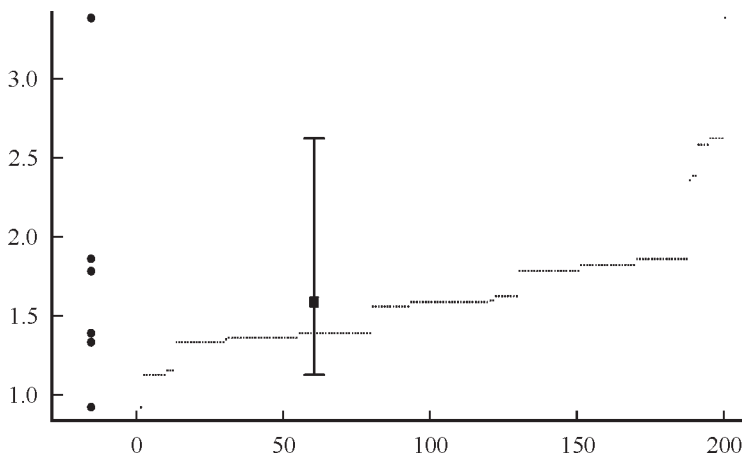


Рис. 7. Бутстреп-оценка медианы и ее 95%-ного доверительного интервала по 6 исходным значениям.

По горизонтали — номер бутстреп-выборки; *по вертикали* — площадь кольца, см². Черные большие точки — реальные значения площади прироста древесины за один год 6 деревьев с одной пробной площади. Маленькие точки — медианы бутстреп-выборок. «Ящик с усами» представляет собой медиану и доверительный интервал конкретного прироста.

Fig. 7. The bootstrap estimate of median and its 95 % confidence interval for 6 initial values.

X-axis — number of bootstrap sampling; *y-axis* — annual ring area, cm².

Large black dots — the real value of the annual wood increment area of 6 trees from one sample plot. The small dots are medians of the bootstrap samples. A box with whiskers represents the median and confidence interval of the specific increment.

плато, где средняя площадь годовых приростов составляет примерно 1.5 см² в интервале от 0.8 до 2.2 см². Из этого можно сделать вывод, что в первом периоде роста разброс значений определяется не только условиями местообитания, но и возрастом дерева, что затрудняет выбор главного фактора, влияющего на исследуемый параметр. В связи с этим целесообразно проводить оценку годовых приростов древесины ствола, начиная с 5—10-летнего возраста самого молодого дерева в исследуемой выборке. К аналогичному выводу пришли Ю. В. Волков и В. А. Тартаковский [11, 12] при анализе площади годовых приростов древесины ели.

ВЫВОДЫ

В заключение можно предложить следующий алгоритм для оценки площади годовых приростов древесины стволов деревьев и наглядного представления результатов.

1. В полевых условиях отобрать керны модельных деревьев примерно одного возраста в разных азимутальных направлениях.

2. Измерить радиальные приросты древесины ствола по кернам, отобраным в разных азимутальных направлениях, для каждого модельного дерева. Усреднить измеренные значения для каждого годового прироста отдельного модельного дерева.

3. Рассчитать максимальный радиус кольца для последнего года наблюдения суммированием всех годовых радиальных приростов. Последовательно,

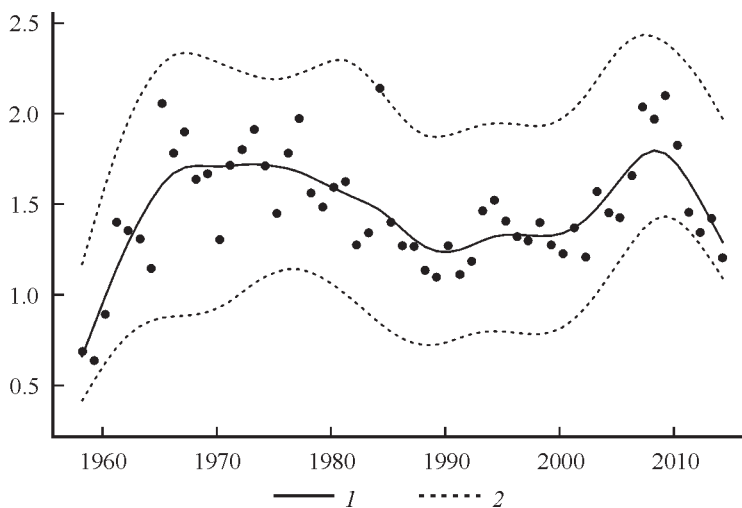


Рис. 8. Обобщенное представление профиля площади годичных приростов древесины модельных деревьев с одной ППП.

По горизонтали — год; по вертикали — площадь кольца, см².

Точки на графике — медианы площадей, 1 — сглаженный с помощью сплайна график медиан, 2 — сглаженные 95%-ные доверительные интервалы медианы.

Fig. 8. Generalized representation of the annual wood increment area profile of model trees from one sample plot.

X-axis — year; y-axis — annual ring area, cm².

Data points — area median, 1 — spline-smoothed median graph, 2 — smoothed 95 % confidence intervals of the median.

вычитая из максимального радиуса радиальный прирост, рассчитать радиусы всех остальных колец. Для каждого найденного радиуса по формуле $S_i = \pi R_i^2$ определить площадь соответствующих кругов. Последовательно вычитая из площади большего круга площадь меньшего, найти искомые значения площади годичных приростов для каждого модельного дерева.

4. Сформировать объединенную выборку значений площадей годичных приростов всех модельных деревьев с конкретной ППП. Применить к ней бутстреп-процедуру и найти медиану и ее 95%-ный доверительный интервал для каждого исследуемого года. По найденным значениям медиан и доверительных интервалов построить графическое изображение.

Для автоматизации вычислений и наглядного представления результатов можно написать скрипт (микропрограмму) на языке R (свободного статистического пакета) [17], но можно использовать и любой другой статистический пакет. Для реализации метода бутстреп в нашем случае использовали модуль *bootstrap* из репозитория R.

Новизна предлагаемого метода состоит в следующем: 1) использование приближенных, а не точно измеренных значений площадей годичных приростов древесины; 2) использование бутстреп-метода для оценки центра распределения и доверительного интервала площадей годичных приростов модельных деревьев; 3) автоматизация вычислений и графического представления результатов с помощью скрипта на языке R.

Таким образом, предлагаемый метод оценки площади годичных приростов стволов деревьев (на примере *Pinus sylvestris*) обладает вполне удовлетвори-

тельной точностью, не требует больших затрат времени и специальной подготовки. Использование бутстреп-метода позволяет получать несмещенные оценки центра распределения и уменьшает ширину доверительного интервала, что повышает корректность оценки средней величины и ее доверительного интервала, а также способствует более наглядному представлению результатов анализа площади годичных приростов стволов древесных растений как в пределах одного местообитания, так и в разных экологических условиях произрастания деревьев.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Программы президиума РАН «Биоразнообразие природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга», а также с привлечением ресурсов Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fritts H. C. 1976. Tree rings and climate. London. 567 p.
2. Ловелиус Н. В. 1979. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л. 232 с.
3. Шиятов С. Г. 1986. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М. 136 с.
4. Ваганов Е. А., Шашкин А. В. 2000. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск. 232 с.
5. Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. 2000. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск. 80 с.
6. Битвинская Т. Т. 1974. Дендроклиматические исследования. Л. 170 с.
7. Ловелиус Н. В., Ярмишко В. Т. 1990. Радиальный прирост сосны обыкновенной на Кольском полуострове. В кн.: Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л. С. 94—105.
8. Ярмишко В. Т. 1997. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб. 210 с.
9. Yarmishko V. T. 2015. Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in varied environment influenced by air pollution in the European North of Russia. — *Forestry ideas* (Bulgaria). 21(2(50)): 96—105.
10. Тартаковский В. А., Волков Ю. В. 2007. Математическая модель годичных колец деревьев на микро- и макроуровне. В кн.: Новые методы в дендрэкологии. Иркутск. С. 150—152.
11. Волков Ю. В., Тартаковский В. А. 2011. Алгоритм анализа площадей годичных слоев деревьев. — *Изв. Томского политехн. ун-та*. 319(5): 112—117.
12. Волков Ю. В., Тартаковский В. А. 2014. Способ оценки неоднородности прироста годичных слоев деревьев. — *Вестн. науки Сибири*. 1(11): 53—60.
13. Ботыгин И. А., Волков Ю. В., Попов В. Н., Тартаковский В. А. 2005. Вычислительные технологии в задачах обработки дендрэкологических данных. — *Изв. Томского политехн. ун-та*. 308(6): 170—174.

14. Волков Ю. В., Тартаковский В. А. 2009. Математическая модель микро-структуры годичных слоев деревьев. — Изв. Томского политехн. ун-та. 314(5): 117—120.
15. Волков Ю. В., Тартаковский В. А. 2012. Алгоритм восстановления площадей прироста, основанный на геометрических особенностях годичных слоев деревьев. — Изв. Томского политехн. ун-та. 321(5): 146—149.
16. Ultimate Tree-Ring Web Pages. Software used in Dendrochronology. <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>
17. The Comprehensive R Archive Network. <https://www.r-project.org>
18. Эфрон Б. 1988. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М. 262 с.
19. Лянгузов А. Ю. 1992. Построение и анализ модели двухсубстратной ферментативной реакции (на примере креатинкиназы): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб. 16 с.

Поступило 18 V 2017

Rastitelnye resursy. 2017, 53(4): 580—593

NEW METHOD OF ESTIMATION OF THE ANNUAL INCREMENT OF WOODY PLANT STEMS

© A. Yu. Lyanguzov,¹ V. T. Yarmishko,² I. V. Lyanguzova*.²

¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² Komarov Botanical Institute of Russian academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia

* E-mail: ILyanguzova@binran.ru

SUMMARY

The paper describes a proposed method for estimating area of the annual growth of woody plants by the example of *Pinus sylvestris* L. (Pinaceae), using approximate, rather than accurately measured, values of the areas of the annual wood increment, based on the assumption of tree stems growing in the form of concentric rings. For statistical analysis of the areas of annual increments of model trees, it is recommended to employ nonparametric methods and bootstrap sampling that allow obtaining unbiased estimates of the mean based on small quantity of samples, and provide a clear graphical representation of the results. Automation of calculations and graphical representation of the results is carried out using a script written in the open-source R statistical programming language [17]. Bootstrap sampling is calculated by the bootstrap module from R repository. The proposed method has satisfactory accuracy, does not require much time and special training. It makes it possible to do data analysis of the area of tree stems annual increment both within a single habitat and in several habitats with different environmental conditions.

Key words: radial increment, the area of stem wood annual increment, bootstrap method, *Pinus sylvestris*, Kola Peninsula.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is partly supported by the Program of Presidium of RAS «Biodiversity of natural systems. Biological resources of Russia: assessment of the state and fundamental bases of monitoring». The studies were executed using equipment of the Resource Centre «Environmental safety observatory» of the Research park of St. Petersburg State University.

REFERENCES

1. Fritts H. C. 1976. Tree rings and climate. London. 567 p.
2. Lovelius N. V. 1979. *Izmenchivost prirosta derevyev. Dendroindikatsiya prirodnykh protsessov i antropogennykh vozdeystviy* [Variation of annual ring parameters. Dendrological indication of natural processes and anthropogenic influences]. Leningrad. 232 p. (In Russian)
3. Shiyatov S. G. 1986. *Dendrokronologiya verkhney granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the upper forest border in the Urals]. Moscow. 136 p. (In Russian)
4. Vaganov E. A., Shashkin A. V. 2000. *Rost i struktura godichnykh kolets khvoynykh* [Growth and structure of conifer tree-rings]. Novosibirsk. 232 p. (In Russian)
5. Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirdeyanov A. V., Kruglov V. B., Maze-pa V. S., Naurzbaev M. M., Khantemirov R. M. 2000. *Methody dendrokronologii. Ch. 1. Osnovy dendrokronologii. Sbor i polucheniye drevesno-koltsevoy informatsii* [Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of dendrochronology. Collecting and obtaining tree-ring data]. Krasnoyarsk. 80 p. (In Russian)
6. Bitvinskis T. T. 1974. *Dendroklimaticheskiye issledovaniya* [Dendroclimatic studies]. Leningrad. 170 p. (In Russian)
7. Lovelius N. V., Yarmishko V. T. 1990. *Radialnyy prirost sosny obyknovennoy na Kolskom Poluostrove* [Radial growth of Scots pine on the Kola Peninsula]. In: *Lesnyye ekosistemy i atmosfernoye zagryazneniye*. Leningrad. P. 94—105. (In Russian)
8. Yarmishko V. T. 1997. *Sosna obyknovennaya i atmosfernoye zagryazneniye na Yevropeyskom Severe* [Scots pine and atmospheric pollution in the European North]. St. Petersburg. 210 p. (In Russian)
9. Yarmishko V. T. 2015. *Radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in varied environment influenced by air pollution in the European North of Russia. — Forestry ideas (Bulgaria)*. 21(2(50)): 96—105.
10. Tartakovskiy V. A., Volkov Yu. V. 2007. *Matematicheskaya model godichnykh kolets derevyev na mikro- i makrourovne* [Mathematical model of annual tree-rings on micro- and macrolevels]. In: *Novyye metody v dendroekologii*. Irkutsk. P. 150—152. (In Russian)
11. Volkov Yu. V., Tartakovskiy V. A. 2011. *Algoritm analiza ploschadey godichnykh sloyev derevyev* [Algorithm for the analysis of the areas of annual tree layers]. — *Izvestiya Tomskogo polytehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 319(5): 112—117. (In Russian)
12. Volkov Yu. V., Tartakovskiy V. A. 2014. *Sposob otsenki neodnorodnosti prirosta godichnykh sloyev derevyev* [A method for estimating the heterogeneity of the growth of annual tree layers]. — *Vestnik nauki Sibiri*. 1(11): 53—60. (In Russian)
13. Botygin I. A., Volkov Yu. V., Popov V. N., Tartakovskiy V. A. 2005. *Vychislitelnyye tekhnologii v zadachakh obrabotki dendroecologicheskikh dannykh* [Computational technologies in dendroecological data processing tasks]. — *Izvestiya Tomskogo polytehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 308(6): 170—174. (In Russian)

14. Volkov Yu. V., Tartakovskiy V. A. 2009. Matematicheskaya model mikrostruktury godichnykh sloev derev [Mathematical model of annual tree-layers microstructure]. — Izvestiya Tomskogo polytehnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 314(5): 117—120. (In Russian)
 15. Volkov Yu. V., Tartakovskiy V. A. 2012. Algoritm vosstanovleniya ploshchadey prirosta, osnovanny na geometricheskikh osobennostyakh godichnykh sloev derev [The algorithm of the growth areas recovering, based on the geometrical features of annual tree layers]. — Izvestiya Tomskogo polytehnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 321(5): 146—149. (In Russian)
 16. Ultimate Tree-Ring Web Pages. Software used in Dendrochronology. <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>
 17. The Comprehensive R Archive Network. <https://www.r-project.org>
 18. Efron B. 1988. Netraditsionnyye metody mnogomernogo statisticheskogo analiza [Alternative methods of multivariate statistical analysis]. Moscow. 262 p. (In Russian)
 19. Lyanguzov A. Yu. 1992. Postroeniye i analiz modeli dvukhsidratnoy fermentativnoy reaktsii (na primere kreatinkinazy): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Formulation and analysis of a two-substrate enzymatic reaction model (by the example of creatine kinase): Abstr. ... Dis. Cand. (Biology) Sci.]. St. Petersburg. 16 p. (In Russian)
-