

Владимир Романович ЦИБУЛЬСКИЙ¹
Александр Александрович КОНОВАЛОВ²
Станислав Павлович АРЕФЬЕВ³

УДК 574.42:51-76

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОЗРАСТА И КРИВЫХ ПРИРОСТА В ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЯХ ХВОЙНЫХ ПОРОД СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

¹ доктор технических наук,
профессор сектора биоразнообразия
и динамики природных комплексов,
Институт проблем освоения Севера СО РАН
tsibulsky@ipdn.ru

² доктор технических наук, кандидат географических наук,
профессор сектора биоразнообразия и динамики природных комплексов,
Институт проблем освоения Севера СО РАН
Konov7@rambler.ru

³ доктор биологических наук, сектор биоразнообразия
и динамики природных комплексов,
Институт проблем освоения Севера СО РАН
sp_arefyev@mail.ru

Аннотация

Предлагается метод восстановления недостающих ранних фаз кривых прироста сосны сибирской, сосны обыкновенной и лиственницы в древесно-кольцевых хронологиях севера Западной Сибири, полученных из керновых или поврежденных гнилью образцов. В основу метода положены закономерности формирования колец древесины в разных фазах жизненного цикла деревьев (прежде всего, в ювенильной, иматурной, виргинальной) с учетом региональных особенностей. Проведенная реконструкция

Цитирование: Цибульский В. Р. Восстановление возраста и кривых прироста в древесно-кольцевых хронологиях хвойных пород севера Западной Сибири / В. Р. Цибульский, А. А. Коновалов, С. П. Арефьев // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2016. Том 2. № 3. С. 59-70.
DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70

проверена методом полиномиальной аппроксимации. Даны примерные величины поправок к возрасту деревьев при подсчете годичных колец для различных хвойных пород. Метод может быть использован для восстановления кривых прироста хвойных пород деревьев в смежных северных регионах.

Ключевые слова

Хвойные породы, древесно-кольцевые хронологии, кривые прироста, фазы роста, возраст деревьев.

DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70

Оценка устойчивости популяций хвойных деревьев — эдификаторов лесных биоценозов в значительной степени определяет устойчивость всего биоценоза и, в частности, параметров его биоразнообразия [9]. Кривые роста и прироста являются наиболее распространенными и давно исследуемыми функциями в дендрометрии [1, 11–16], дендрохронологии [3, 7, 17], в популяционном моделировании [5, 15, 18]. Они строятся как для отдельных деревьев, так и для насаждений. В последнее время оценка устойчивости популяций все чаще моделируется при помощи проекционных матриц [6]. При моделировании популяций древесных растений важна классификация фаз их роста, привязанная к районированным кривым прироста [7]. Из всех параметров прироста дерева при этом наиболее удобен радиальный — ширина годичных колец, последовательность которых образует древесно-кольцевую хронологию (ДКХ). Известно соотношение, связывающее прирост всех объемных показателей дерева (x) с ростом одного из них (y) [16]:

$$\frac{dy}{dt} \cdot \frac{1}{y} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{x} a,$$

где для нашего случая x — радиус дерева R , а dx/dt — радиальный прирост, т. е. ширина годичного кольца $\Delta R(t)$. Относительную величину прироста $\Delta R/R$ обозначим как $\overline{\Delta R}(t)$. Если y принять за объем ствола V , то левую часть обозначим $\overline{\Delta V}(t)$, отсюда уравнение принимает вид простой линейной зависимости:

$$\overline{\Delta V}(t) = a \overline{\Delta R}(t).$$

Такое соотношение в первом приближении позволяет перейти в моделировании популяций от модели Лесли, Лефковича к блочной модели — проекционной матрице [5, 6]. Для этого необходима проработка графа жизненного цикла с выделением всех или основных автотрофных фаз роста деревьев в популяции: j — ювенильной, im — имматурной, v — виргинальной, g — генеративной (с подфазами: $g1$ — ранней, $g2$ — спелости, $g3$ — поздней), ss — субсенильной и s — сенильной [2, 8, 10]. Первые две относятся к восходящей части кривой прироста, остальные — к ниспадающей (рис. 1). Для упрощения анализа

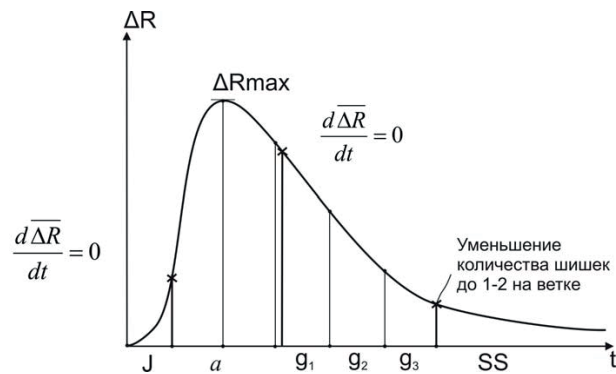


Рис. 1. Фазы роста дерева на кривой радиального прироста с точками перегиба

Fig. 1. The phases of tree growth depicted on the radial growth curve with inflection points

имматурная и виргинильная фазы могут быть объединены в ауксофазу (*a*), сенильная фаза может рассматриваться вместе с субсенильной.

Примем, что границы между *j*- и *a*-фазами определяет первая точка $\frac{d\Delta R}{dt} = 0$,

а между *a* и *g* фазами — вторая точка перегиба $\left(\frac{d\Delta R}{dt} = 0\right)$. Причем $\Delta R = \frac{\Delta R}{R_{max}}$,

т. е. отнесена к максимальному значению ΔR_{max} . Однако получение полной кривой нередко затруднено в *j*-, *im*- и частично в *v*-областях вследствие технических причин (кольца обычно берутся на высоте, превышающей уровень корневой шейки на 0,3-1,3 м, а при бурении центральные кольца выпадают из-за их эксцентрического положения в стволе) либо вследствие развития центральных гнилей ствола. У темнохвойных деревьев, в частности у сосны сибирской (кедра), эти фазы занимают до 30-100 лет [8], у светлохвойных этот период на порядок меньше [4], но при развитии гнилей потеря колец тоже может быть значительной.

С целью восстановления кривых прироста хвойных пород на территории Ямало-Ненецкого автономного округа были взяты керновые образцы древесины, отобранные на высоте ствола 0,5 м. В таблице 1 приведены основные характеристики исследованных ДКХ. Из рисунков 1 и 2 по несоблюдению условия $\Delta R(0) = 0$ при $t = 0$ видно, что в исходных ДКХ в той или иной мере отсутствуют кольца, составляющие начальные фазы восходящей части кривой прироста. Для соблюдения поставленного условия нужно: 1) определить, на какую фазу роста приходятся начальные значения ДКХ и оценить длительность недостающей части; 2) на основе сравнительного анализа полученных нами региональных кривых прироста и описанных в литературе полных кривых прироста соответствующих пород деревьев рассчитать усредненные значения прироста ΔR для недостающего начального промежутка.

Таблица 1

Характеристики отобранных
древесно-кольцевых хронологий

Наименование ДКХ	Местонахождение	Биогеоценоз	Бонитет древостоя	Полнота древостоя
Сосна сибирская ККs	Коренной берег р. Таз близ п. Красноселькуп, 65°42' 20" с. ш., 82°27' 36" в. д.	Торфяник крупно-бугристый сфагново-лишайниково-багульниковый	Va	0,2
Сосна сибирская КТl	Надпойменная терраса р. Таз близ п. Толька, 64°00'09" с. ш., 82°03'04" в. д.	Кедровник травяно-мшистый	IV	0,7
Сосна обыкновенная PNm	Южное побережье оз. Нумто, 63°30'48" с. ш., 71°21'25" в. д.	Сосняк лишайниково-бруснично-багульниковый	Va	0,4
Лиственница сибирская LNd	Надпойменная терраса р. Надым близ г. Надым, 65°32'00" с. ш., 72°31'00" в. д.	Лиственничник мшисто-лишайниково-багульниковый	V	0,4

Table 1

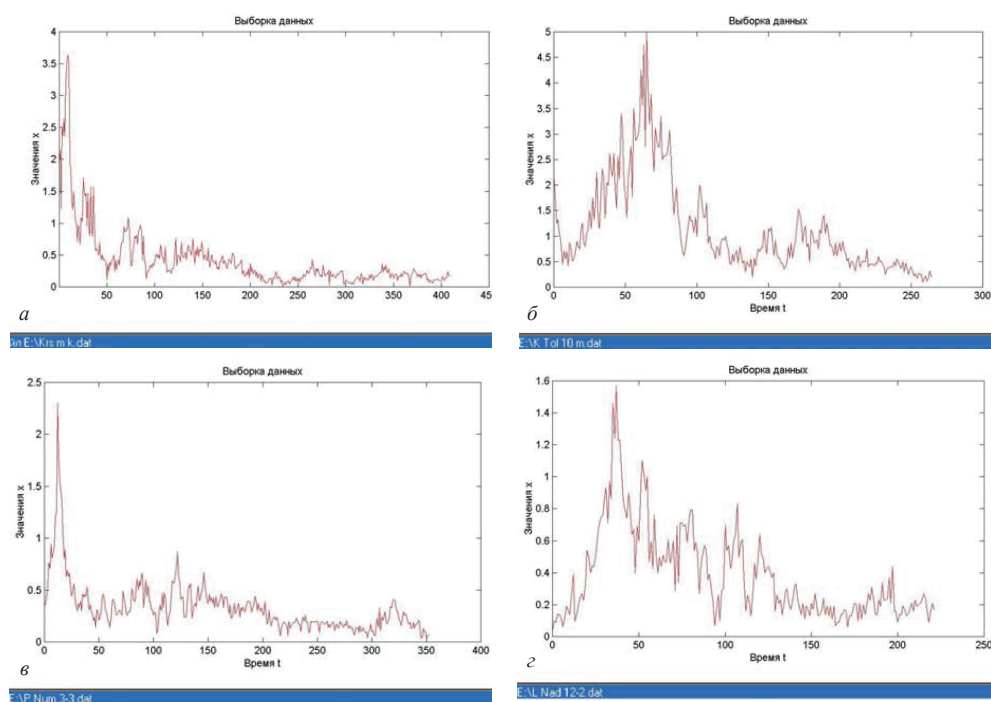
The characteristics of the selected
tree-ring chronologies

Рис. 2. Исходные индивидуальные ДКХ (мм): а) ККs, б) КТl, в) PNm, г) LNd

Fig. 2. The initial individual of tree-ring chronology (mm): а) ККs, б) КТl, в) PNm, г) LNd

Например, сопоставление ДКХ кедр ККs с известными полными кривыми прироста, характерными для кедр [8], позволяет полагать, что первые ее кольца шириной ΔR от 1,2 до 3,6 (в среднем 2,4) мм соответствуют началу виргинальной фазы, приходящейся на возраст около 40 лет, следовательно, в качестве недостающего надо добавить начальный отрезок протяженностью в 40 лет с шириной колец, увеличивающейся от 0 до 2,4 мм (рис. 3).

Аналогичное сопоставление ДКХ сосны обыкновенной PNm с полными кривыми прироста, известными для этой древесной породы [12], при ширине начальных колец ДКХ от 0,5 до 2,5 мм также позволяет отнести их к началу виргинальной фазы роста, приходящейся у сосны приблизительно на 20-летний возраст, а недостающую часть кривой прироста оценить в 22 года. По той же схеме дополнение для ДКХ лиственницы LNd оценено в 2 года.

В таблице 2 приведены аппроксимации кривых прироста, полученные авторегрессионным методом [13, 14]. Несмотря на высокий порядок полинома, начальная фаза j имеет заметные отличия от общепринятого вида [16]: ширина кольца в начальной точке несколько отличается от 0 (рис. 3 а, б, г), не нашли отражения фазы начального роста j , im (рис. 3 в).

Поскольку в данном случае наибольший интерес представляет именно начальная часть кривой прироста, целесообразно аппроксимировать только три первых фазы — с ювенильной по виргинильную, увеличив тем самым точность их аппроксимации (рис. 4, табл. 3).

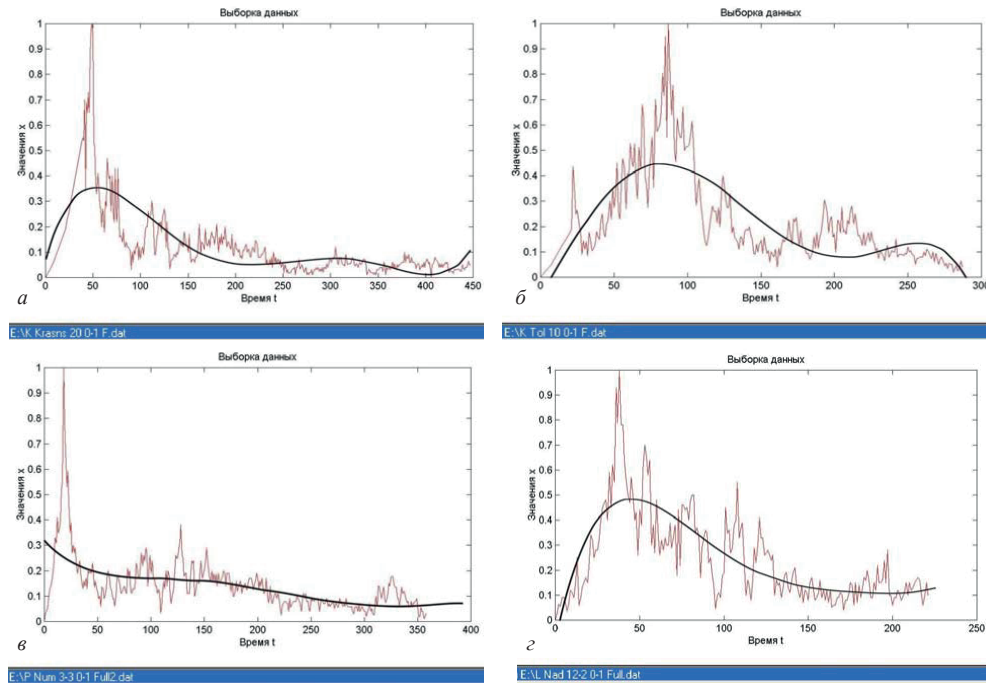


Рис. 3. Дополненные кривые прироста и их полиномиальная аппроксимация: а — ККs, б — КТl, в — PNm, г — LNd

Fig. 3. Amended growth curves and their polynomial approximation: а — ККs, б — КТl, в — PNm, г — LNd

Таблица 2

Параметры полиномиальной аппроксимации дополненных кривых прироста

ДКХ	Уравнение аппроксимации
KKs 0-1F	$\frac{dR}{dt} = 0,07t^5 + 0,013t^4 + 9,7e^{-0,07t^2} - 2,2e^{-0,09t} + 1,8e^{-0,12}$
KTI 0-F	$\frac{dR}{dt} = -0,042t^5 + 0,01t^4 + 3,1e^{-0,05t^3} - 1,5e^{-0,09t^2} + 8,4e^{-0,09t} - 1,37e^{-0,11}$
PNm 0-1 Full 2	$\frac{dR}{dt} = 0,33t^5 - 0,0015t^4 + 6,4e^{-0,05t^3} - 3,87e^{-0,07t^2} + 1,01e^{-0,09t} - 9,57e^{-0,13}$
LNd 0-1 Full	$\frac{dR}{dt} = -0,12t^5 + 0,035t^4 + 5,18e^{-0,06t^2} - 1,85e^{-0,08t} + 2,53e^{-0,11}$

Table 2

The parameters of polynomial approximation of the complementary growth curves

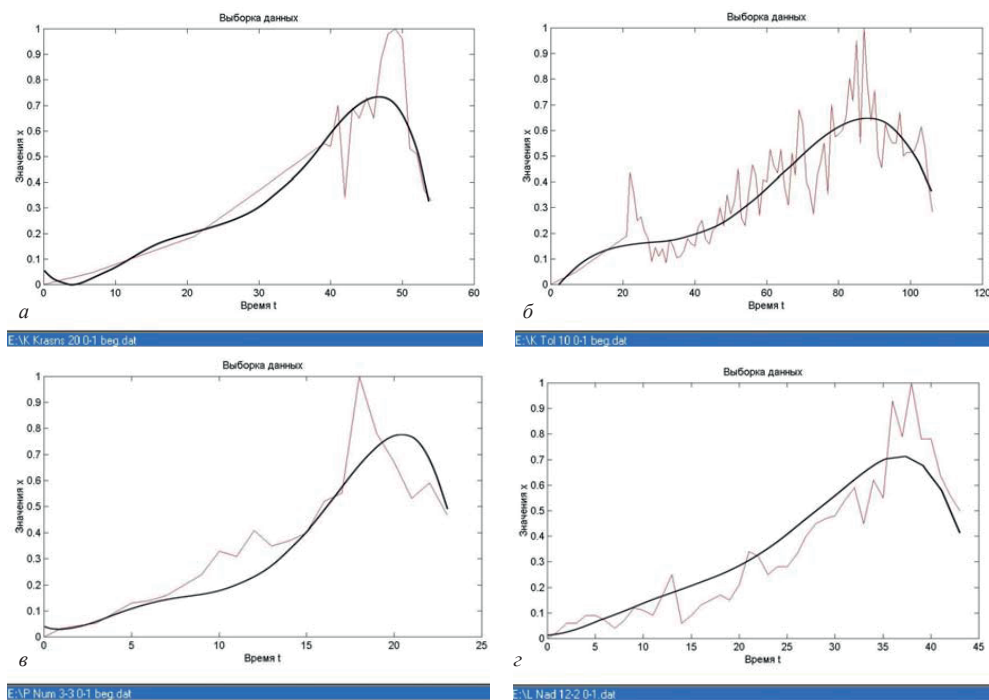


Рис. 4. Полиномиальная аппроксимации начальных фаз (j , im и v) кривых прироста: а) KKs, б) KTI, в) PNm, г) LNd

Fig. 4. The polynomial approximation of the initial phase (j , im and v) growth curves: а) KKs, б) KTI, в) PNm, г) LNd

Таблица 3

Параметры полиномиальной аппроксимации начальных фаз (j , im и ν) кривых прироста

Table 3

The parameters of the polynomial approximation of the initial phases (j , im and ν) of the growth curves

ДКХ	Уравнение аппроксимации
ККs	$\frac{dR}{dt} = 0,055t^5 - 0,036t^4 - 0,007t^3 + 9,35e^{-0,06t} - 7,88e^{-0,08}$
КТl	$\frac{dR}{dt} = -0,044t^5 + 0,024t^4 + 1,75e^{-0,05t^2} - 1e^{-0,07t} + 5,4e^{-0,11}$
PNm	$\frac{dR}{dt} = 0,006t^5 + 0,002t^4 + 0,01t^3 - 0,002t^2 - 2,37e^{-0,06}$
LNd	$\frac{dR}{dt} = 0,044t^5 - 0,015t^4 + 0,0055t^3 + 1,55e^{-0,05t} - 1,75e^{-0,07}$

Сравнивая аппроксимации дополненных рядов в целом (рис. 3) и их начальных участков (рис. 4), очевидно, что в точке перегиба максимальное значение ΔR_{max} для первых значительно ниже. При этом стыковка аппроксимирующих кривых, полученных для полной кривой прироста и для ее начального участка, дает закономерную картину последовательной смены фаз роста деревьев (рис. 5) и позволяет принять предложенную выше реконструкцию (табл. 5).

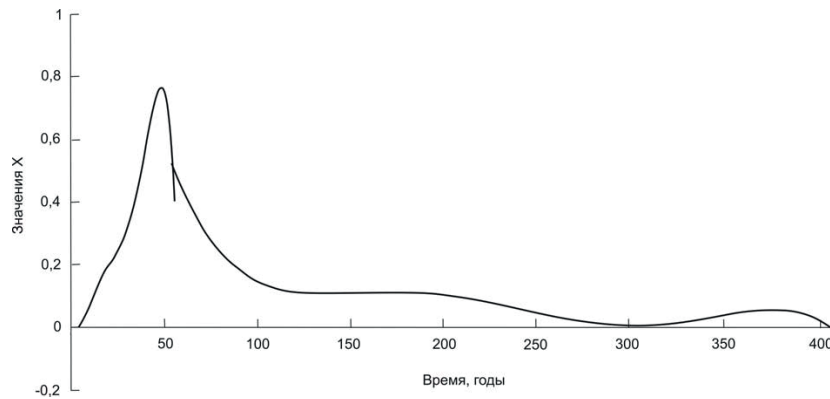


Рис. 5. Стыковка аппроксимации начальных фаз кривой прироста с полной аппроксимацией кривой прироста для ДКХ кедр ККs

Fig. 5. Approximation connection of the initial phase of growth curve with a full approximation of the growth curve for the tree-ring chronology of the KKs cedar

Таблица 5

Дополненные фазы возрастных кривых и поправка возраста исследованных деревьев

Table 5

Supplemented age curves phases and age correction of the studied trees

ДКХ	Добавленные фазы	Добавленный возраст, лет	Итоговый возраст, лет
ККs	j, im, v	40	448
КТl	j, im	22	288
PNm	j, im	15	359
LNd	j	2	223

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антанайтис В. В. Прирост леса / В. В. Антанайтис, В. В. Загребев. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 198 с.
2. Белостоков Г. П. Возрастные фазы в морфогенезе подроста древесных растений / Г. П. Белостоков // Ботан. журн. 1981. Т. 66. № 1. С. 86-98.
3. Ваганов Е. А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа. Новосибирск: Наука, СИФ РАН, 1996. 246 с.
4. Дылис Н. В. Лиственница / Н. В. Дылис. М.: Лесная промышленность, 1981. 96 с.
5. Логофет Д. О. Две парадигмы математической популяционной биологии. Попытка синтеза / Д. О. Логофет, Н. Г. Уланова, И. Н. Белова // Журнал общей биологии. 2001. Т. 72. № 5. С. 369-387.
6. Логофет Д. О. Свирежевский принцип замещения и матричные модели динамики популяций со сложной структурой / Д. О. Логофет // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 1. С. 30-40.
7. Мацковский В. В. Оценка смещений в RCS-хронологиях древесных колец / В. В. Мацковский // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2011. № 4. С. 389-404.
8. Николаева С. А. Онтогенез кедра сибирского в условиях Кеть-Чулымского междуречья / С. А. Николаева, С. М. Велисевич, Д. А. Савчук // Вестник ТомГУ. Биология. 2008. № 3(4). С. 24-34.
9. Носова Л. М. Воздействие деревьев-эдификаторов на биологическое разнообразие лесных экосистем / Л. М. Носова, Е. В. Тихонова, Н. Б. Леонова // Лесоведение. 2005. № 4. С. 40-48.
10. Полевой В. В. Физиология растений / В. В. Полевой. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.
11. Уранов А. А. Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов / А. А. Уранов // Биол. науки. 1975. № 2. С. 7-34.

12. Фадеева М. Б. Особенности популяционной организации древесных видов хвойно-широколиственных лесов / М. Б. Фадеева, Г. Р. Исламов // Вестник ТГГПУ. Экология. 2007. № 2-3(9-10). С. 1-10.
13. Цибульский В. Р. Математическая модель древесно-кольцевых хронологий природных зон севера Западной Сибири / В. Р. Цибульский, С. П. Арефьев // Вестник кибернетики. 2015. № 1. С. 30-37.
14. Цибульский В. Р. Сравнительный анализ динамики древесно-кольцевых хронологий из разных пунктов на севере Западной Сибири / В. Р. Цибульский, С. П. Арефьев // Вестник кибернетики. 2015. № 2. С. 65-71.
15. Caswell H. Matrix Population Models. Construction, Analysis and Interpretation / H. Caswell. Sunderland M. A.: Sinauer Associates. 1989. 328 p.
16. Lyr H. Gehölzphysiologie / H. Lyr, H. Polster, H.-J. Fiedler. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1967. 420 p.
17. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990, 364 p.
18. Miguel J. J. Matrix population model / J. J. Miguel // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2005. Т. 10. Вып. 2. С. 164-170.

Vladimir R. TSIBULSKY¹
Aleksandr A. KONOVALOV²
Stanislav P. AREFYEV³

**RESTORATION OF AGE AND GAIN CURVES
IN THE TREE-RING CHRONOLOGIES
OF CONIFEROUS PLANTS IN THE NORTH
OF THE WESTERN SIBERIA**

¹ Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Sector of Biodiversity and Ecosystem Dynamics,
Institute of the Problems of Northern Development, SB RAS
tsibulsky@ipdn.ru

² Dr. Sci. (Tech.), Cand. Sci. (Geogr.), Professor,
Sector of Biodiversity and Ecosystem Dynamics,
Institute of the Problems of Northern Development, SB RAS
Konov7@rambler.ru

³ Dr. Sci. (Biol.), Sector of Biodiversity
and Ecosystem Dynamics,
Institute of the Problems of Northern Development, SB RAS;
Tyumen State University
sp_arefyev@mail.ru

Abstract

The authors introduce the method of restoration of early missing phases of increment curves of Siberian pine, Scots pine and larche in the tree-ring chronologies of the North Western Siberia received from the core or damaged by decay samples. The method is based on the formation regularities of annual rings in different phases of tree life cycle (juvenile, immature, and virginal) taking into account the regional features. The carried-out reconstruction is checked by polynomial approximation method. When calculating the rings of various coniferous trees, approximate corrections to the age of trees are given.

Citation: Tsibulsky V. R., Kononov A. A., Arefyev S. P. 2016. "Restoration of Age and Gain Curves in the Tree-Ring Chronologies of Coniferous Plants in the North of the Western Siberia". Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, vol. 2, no 3, pp. 59-70. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70

The method can be used to restore the increment curves of coniferous trees in adjacent northern regions.

Keywords

Coniferous trees, tree-ring chronology, gain curves, growth phases, age of trees.

DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70

REFERENCES

1. Antanaytis V. V., Zagreev V. V. 1981. Prirost lesa [The Forests Growth]. Moscow: Lesnaya promyshlennost.
2. Belostokov G. P. 1981. "Vozrastnye fazy v morfogeneze podrosta drevesnykh rasteniy" [Phase Growth in the Wood Plants' Growth Morphogenesis]. *Botanicheskiy zhurnal*, vol. 66, no 1, pp. 86-98.
3. Caswell H. 1989. *Matrix Population Models. Construction, Analysis and Interpretation*. Sunderland M. A.: Sinauer Associates.
4. Cook E. R., Kairiukstis L. A. (eds). 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishing.
5. Dylis N. V. 1981. Listvennitsa [Larch]. Moscow: Lesnaya promyshlennost.
6. Fadeeva M. B., Islamov G. R. 2007. "Osobennosti populyatsionnoy organizatsii drevesnykh vidov khvoynno-shirokolistvennykh lesov" [The Features of Population Structure of Wood Species Coniferous-Deciduous Forests]. *Vestnik TGGPU. Ekologiya*, no 2-3(9-10), pp. 1-10.
7. Logofet D. O. 2010. "Svirezhevskiy printsip zameshcheniya i matrichnye modeli dinamiki populyatsiy so slozhnoy strukturoy" [Svirezhevsky Principle of Substitution and the Matrix Model of Population Dynamics of Complex Structure]. *Zhurnal Obshchei Biologii (Journal of General Biology)*, vol. 71, no 1, pp. 30-40.
8. Logofet D. O., Ulanova N. G., Belova I. N. 2001. "Dve paradigmy matematicheskoy populyatsionnoy biologii. Popytka sinteza" [Two Paradigms of Mathematical Population Biology. Synthetical Approach]. *Zhurnal obshchey biologii*, vol. 72, no 5, pp. 369-387.
9. Lyr H., Polster H., Fiedler H.-J. 1967. *Gehölzphysiologie*. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag.
10. Matskovskiy V. V. 2011. "Otsenka smeshcheniy v RCS-khronologiyakh drevesnykh kolets" [Evaluation of Changes in RCS-tree-Ring Chronologies]. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya Biologiya*, no 4, pp. 389-404.
11. Miguel J. J. 2005. "Matrix Population Model". *Tambov University reports, Series: Natural and Technical Sciences*, vol. 10, no 2, pp. 164-170.
12. Nikolaeva S. A., Velisevich S. M., Savchuk D. A. 2008. "Ontogenez kedra sibirskogo v usloviyakh Ket-Chulym'skogo mezhdurechya" [Ontogeny of the Siberian Cedar in a Ket-Chulym Interfluve]. *Tomsk State University Journal of Biology*, no 3(4), pp. 24-34.
13. Nosova L. M., Tikhonova Ye. V., Leonova N. B. 2005. "Vozdeystvie derevyev-edifikatorov na biologicheskoe raznoobrazie lesnykh ekosistem" [The Impact

- of the Edificators Trees on the Biological Diversity of Forest Ecosystems]. *Lesovedenie*, no 4, pp. 40-48.
14. Polevoy V. V. 1989. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. Moscow: Vysshaya shkola.
 15. Tsibulskiy V. R., Arefev S. P. 2015. "Matematicheskaya model drevesno-koltsevykh khronologiy prirodnykh zon severa Zapadnoy Sibiri" [A Mathematical Model of Tree-Ring Chronologies of the Natural Areas of the North of Western Siberia]. *Proceedings in Cybernetics*, no 1, pp. 30-37.
 16. Tsibulskiy V. R., Arefyev S. P. 2015. "Sravnitelnyy analiz dinamiki drevesno-koltsevykh khronologiy iz raznykh punktov na severe Zapadnoy Sibiri" [A Comparative Analysis of the Dynamics of Tree-Ring Chronologies from Different Points in the North of the Western Siberia]. *Proceedings in Cybernetics*, no 2, pp. 65-71.
 17. Uranov A. A. 1975. "Vozrastnoy spektr fitotsenopopulyatsiy kak funktsiya vremeni i energeticheskikh volnovykh protsessov" [The Age Range of Fitocenopopulations as the Time and Energy Wave Processes Function]. *Biologicheskie nauki*, no 2, pp. 7-34.
 18. Vaganov Ye. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. 1996. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoy Subarktike* [Dendroclimatic Studies in the Ural-Siberian Subarctic Region]. Novosibirsk: Nauka, SIF RAN.