Станислав Павлович АРЕФЬЕВ[1]
Владимир Романович ЦИБУЛЬСКИЙ[2]
Арсений Юрьевич АНТОНЮК[3]

УДК 574.42:51-76

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРИРОСТА КУСТАРНИКОВ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

[1] доктор биологических наук, профессор,
заведующий Сектором биоразнообразия
и устойчивости природных комплексов,
Институт проблем освоения Севера СО РАН (г. Тюмень);
Тюменский государственный университет
sp_arefyev@mail.ru

[2] доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт проблем освоения Севера СО РАН (г. Тюмень)
v-tsib@yandex.ru

[3] студент магистратуры,
кафедра социально-экономической географии
и природопользования, Институт наук о Земле,
Тюменский государственный университет
antarseni@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности временных рядов ширины колец распластанных и прямостоячих кустарников ямальской тундры на примере березы карликовой, ивы шерстистой и ольховника. Поскольку кустарники являются эдификаторами многих

Цитирование: Арефьев С. П. Особенности анализа временных рядов прироста кустарников субарктической тундры полуострова Ямал / С. П. Арефьев, В. Р. Цибульский, А. Ю. Антонюк // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2017. Том 3. № 2. С. 67-80.
DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-67-80

тундровых сообществ, их временные ряды рассматриваются в качестве креода — главной траектории динамики сообщества, в наибольшей степени характеризующей динамику его параметров, включая биоразнообразие. В частности, по устойчивости временных рядов кустарников судили об устойчивости параметров биоразнообразия детерминированных ими сообществ. Для оценки устойчивости и цикличности временных рядов прироста кустарников исследуемой территории проведена их аппроксимация, получены спектральные характеристики остаточных рядов методом MUSIC (Multiple Signal Classification) в варианте EV (собственный вектор). Проведена оценка устойчивости рядов по критерию нормального распределения значений ряда. Проведен сравнительный анализ динамических свойств временного ряда прироста по одному радиусу среза кустарника и при осреднении прироста с асимметричных радиусов одного среза.

Ключевые слова

Кустарниковые тундры, полуостров Ямал, древесно-кольцевые хронологии, устойчивость экосистемы, анализ временных рядов, частотные спектры.

DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-67-80

Введение

Биоразнообразие арктических территорий России, в частности полуострова Ямал, особенно чувствительно к изменениям климата и влиянию антропогенных факторов, связанных с освоением месторождений углеводородов. Если в таежной части ЯНАО динамику устойчивости биоразнообразия можно оценить при анализе хронологий ширины годичных колец деревьев-эдификаторов [2, 11, 12], то в тундрах источником подобной информации могут быть кустарники, возраст которых может достигать 100 и более лет. Особую ценность в этом плане имеют береза карликовая (*Betula nana*), ивы мохнатая и сизая (*Salix lanata, S. glauca*), произрастающие вплоть до зоны арктических тундр на сотни километров севернее предела распространения деревьев. Некоторые ивы (*S. lapponica* и др.) и ольховник (*Duschekia fruticosa*) проникают на север вплоть до зоны типичных тундр. Эти виды являются эдификаторами кустарниковых сообществ, которые в пределах тундровой зоны занимают большие площади и отличаются наиболее высокими показателями продуктивности и биоразнообразия. Древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) кустарников Ямала хорошо коррелируют с климатическими рядами, показывая реакцию растительности полуострова на потепление климата [1]. Кроме того, ДКХ тундровых кустарников являются хорошим индикатором высоты снежного покрова, глубины сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов, а также различных их подвижек (оползни, трещины и др.), связанных с криогенными, климатогенными и антропогенными процессами [5-8], влияющих на биоразнообразие [9]. Цель настоящей работы — изучение статистических характеристик ДКХ кустарников в качестве индикаторов динамики биоразнообразия в тундровой зоне.

Для иллюстрации рассматриваемых статистик в соответствии с рекомендациями Г. М. Розенберга [10] в тундровом биогеоценозе выберем площадку наблюдения S, в которой видовое разнообразие представлено K видами из N возможных, включая исследуемые кустарники. При этом примем, что, во-первых, фенотипическое разнообразие может быть довольно большим, что означает наличие достаточно широкого коридора их траекторий развития (т. е. гомеореза — уровня поддержания постоянства в развивающихся системах), и что, во-вторых, главную траекторию (креод) представляет кустарниковый вид [4].

В нашем рассмотрении основное внимание уделим влиянию на уровень гомеореза случайных изменений среды при незначительных генетических изменениях. Известно, что в силу стохастичности устойчивость развития не может быть вполне охарактеризована наблюдениями за одной особью — необходимо исследовать популяцию [3, 10]. Однако поскольку в качестве креода нами принят кустарниковый вид, наиболее простым и информативным является исследование временных рядов прироста кустарников — их ДКХ — по статистикам изменчивости, стационарности и т. п. [2, 11, 12]. Спектральный анализ ДКХ может дать информацию о наиболее значимых цикличностях, влияющих на динамику роста, и о возможных вариантах кривой роста. Идентификация последней поможет уточнить оценку стационарности временного ряда.

В такой постановке важно иметь аргументированный выбор вариантов ДКХ кустарников, включающих большую часть траектории развития. Для древесных растений выделяется основные фазы роста: проросток, фаза усиленного роста (ауксофаза), императивная и сенильная. Следовательно, ДКХ в норме характеризуются нулевой точкой прироста ΔR_0, максимумом ΔR_{max} и ниспадающей частью $\Delta R \rightarrow \min$.

В таблице 1 приведены сведения о месте и времени получения спилов тундровых кустарников Ямала, на рис. 1 — исходные временные ряды ширины их годичных колец (радиального прироста). По сравнению с кольцевыми хронологиями деревьев [1, 2, 5] они характеризуются меньшей продолжительностью, большими ежегодными колебаниями радиального прироста, а также слабой выраженностью или практическим отсутствием возрастной кривой роста. Для дальнейшего анализа рядов прироста кустарников проведем их полиномиальную аппроксимацию в соответствии с моделью авторегрессии скользящего среднего [2, 11, 12]. Исследования показали, что наилучший результат дают полиномы 3-й и 4-й степеней. В таблице 2 приведены параметры аппроксимации, на рис. 2 — кривые аппроксимации и остаточные ряды, полученные вычитанием последних из исходных рядов. В таблице 3 представлены основные статистические характеристики остаточных рядов, а на рис. 3 рассмотрены распределения их значений в сравнении с нормальным распределением.

Известно, что изменение фенотипического разнообразия может происходить из-за возрастания случайной изменчивости развития за счет «возрастания частоты различных случайных нарушений» [4].

Таблица 1

Характеристика использованных ДКХ кустарников

Table 1

Characteristics of used tree-ring chronologies of bushes

ДКХ	Вид кустарника	Природная зона	Район отбора	Дата отбора
Б-BN-1(2)	Береза карликовая — *Betula nana*	Северная граница типичных субарктических тундр	Близ пос. Бованенково: 70°21’ с. ш. 68°26’ в. д.	01.08.1995
МК-SL-9(1)	Ива шерстистая — *Salix lanata*	Южная граница типичных субарктических тундр	Близ пос. Мыс Каменный, 30 км выше устья р. Нурмаяха: 68°30’ с. ш. 73°30’ в. д.	01.08.2001
МК-DF-2(1)	Ольха кустарниковая — *Duschekia fruticosa*	та же	там же	31.07.2001
МК-DF-2(1-4)*	Ольха кустарниковая — *D. fruticosa*	та же	там же	та же

Примечание: * — временной ряд получен усреднением по четырем перпендикулярным радиусам спила

Note: * — time series obtained by averaging over four perpendicular radii of the saw cut

Для определения влияния основных климатических циклов на рост кустарников исследуемой территории получены спектральные характеристики остаточных рядов (рис. 2) методом MUSIC (Multiple Signal Classification) в варианте EV (собственный вектор) с порядком модели 16. Этот метод позволяет выделить основной спектр на фоне шумов, связанных в том числе с методической ошибкой и случайным влиянием [12]. На рис. 4 приведены спектры исследуемых образцов ДКХ.

Таблица 2

Параметры полиномиальной аппроксимации ДКХ кустарников

Table 2

Parameters of polynomial approximation of tree-ring chronologies of shrubs

ДКХ	Параметры аппроксимации*
Б-BN-1(2)	ΔR(t) = 0,115109t3-0,00240528t2+5,61602e-5t+7,7107e-8
МК-SL-9(1)	ΔR(t) = 0,206035t3+0,00197845t2+0,000198761t-3,0024e-6
МК-DF-2(1)	ΔR(t) = 0,162863t3-0,00288902t2+3,4221e-6t-1,34501e-8
МК-DF-2(1-4)	ΔR(t) = 0,175433t3-0,00167022t2+7,72508e-5t-4,40519e-7

Примечание: *ΔR(t) — ширина годового прироста кольца в год tt

Note: *ΔR(t) — the width of the annual ring grow per year

Таблица 3

Основные статистические характеристики остаточных рядов кустарников

Table 3

The main statistical characteristics of the remaining series of shrubs

Характеристика	Б-BN-1(2)	МК-SL-9(1)	МК-DF-2(1)	МК-DF-2 (1-4)
Максимум	0,173	0,474	0,693	0,618
Минимум	-0,128	-0,399	-0,326	-0,293
Стандартн отклонение	0,063	0,157	0,166	0,142
Среднеквадратическое отклонение	0,0035	0,024	0,027	0,020
Энтропия	-57,01	17,26	69,60	57,57
Закон распределения	нормальный	нормальный	нормальный	нормальный

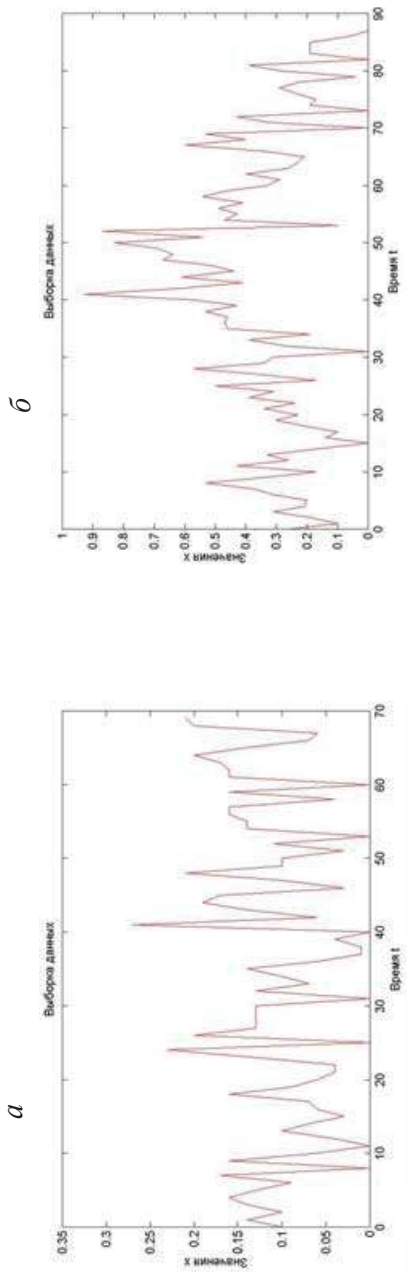

Рис. 1. Исходные временные ряды радиального прироста кустарников ΔR (Δtm): А — Б-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

Fig. 1. Initial time series of radial growth of shrubs ΔR (Δtm): А — B-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

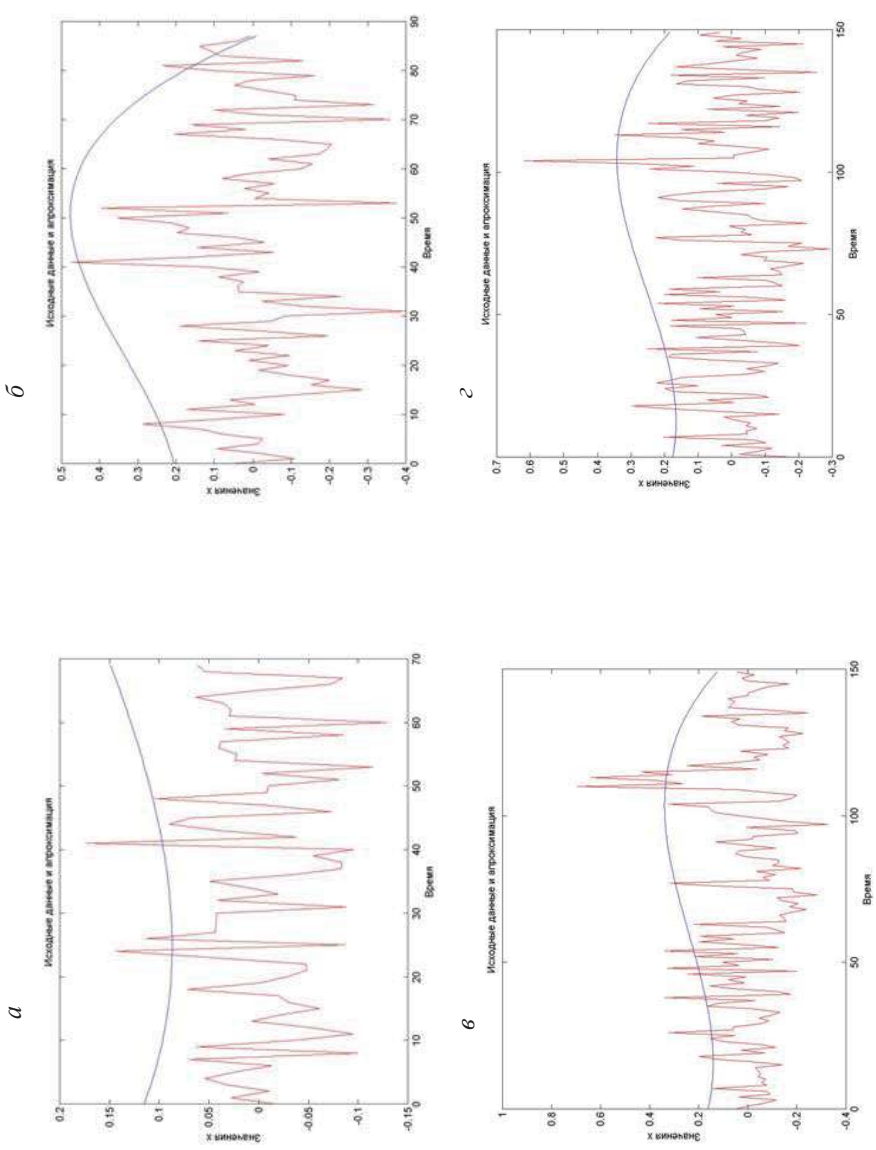

Рис. 2. Полиномиальная аппроксимация и остаточные ряды ДКХ кустарников: А — Б-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

Fig. 2. Polynomial approximation and residual series of the tree-ring chronologies of shrubs: А — Б-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

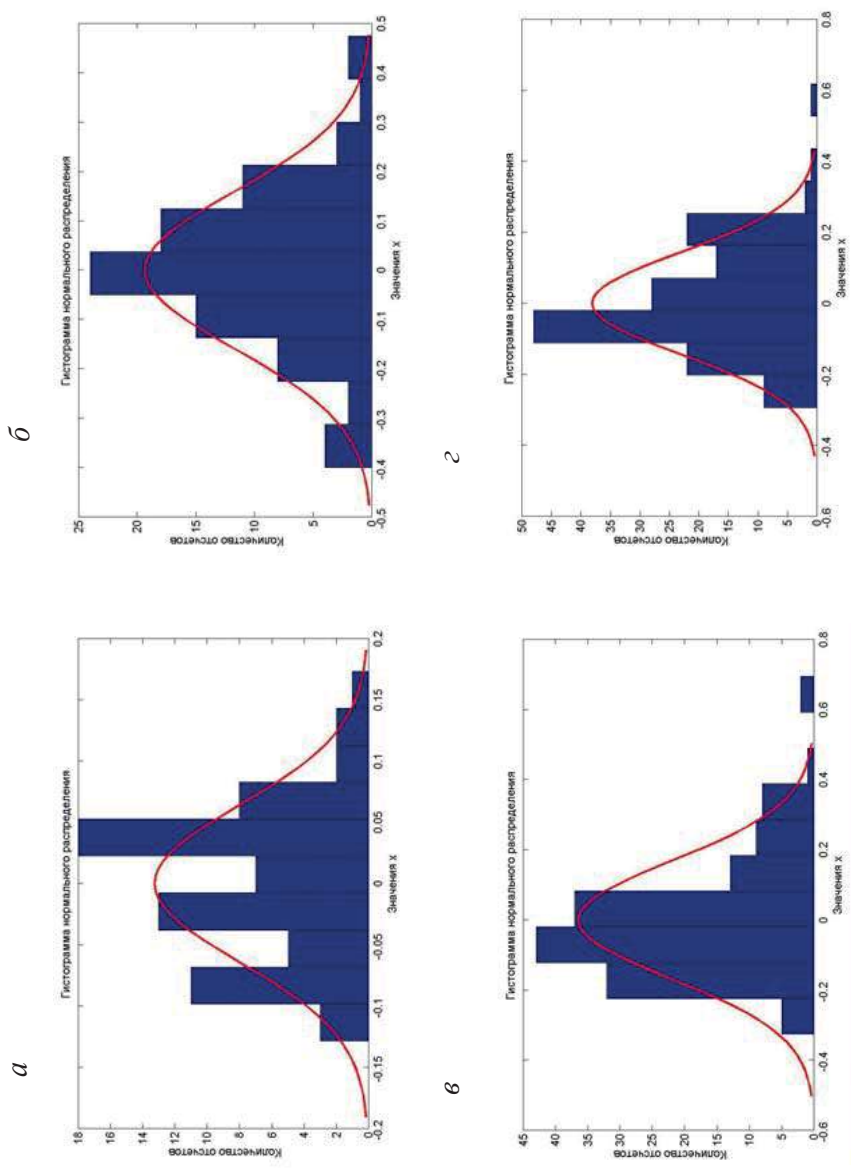

Рис. 3. Распределение значений остаточных рядов ДКХ кустарников: А — Б-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

Fig. 3. Distribution of the values of the residual rows of tree-ring chronologies of shrubs: А — Б-BN-1(2), Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

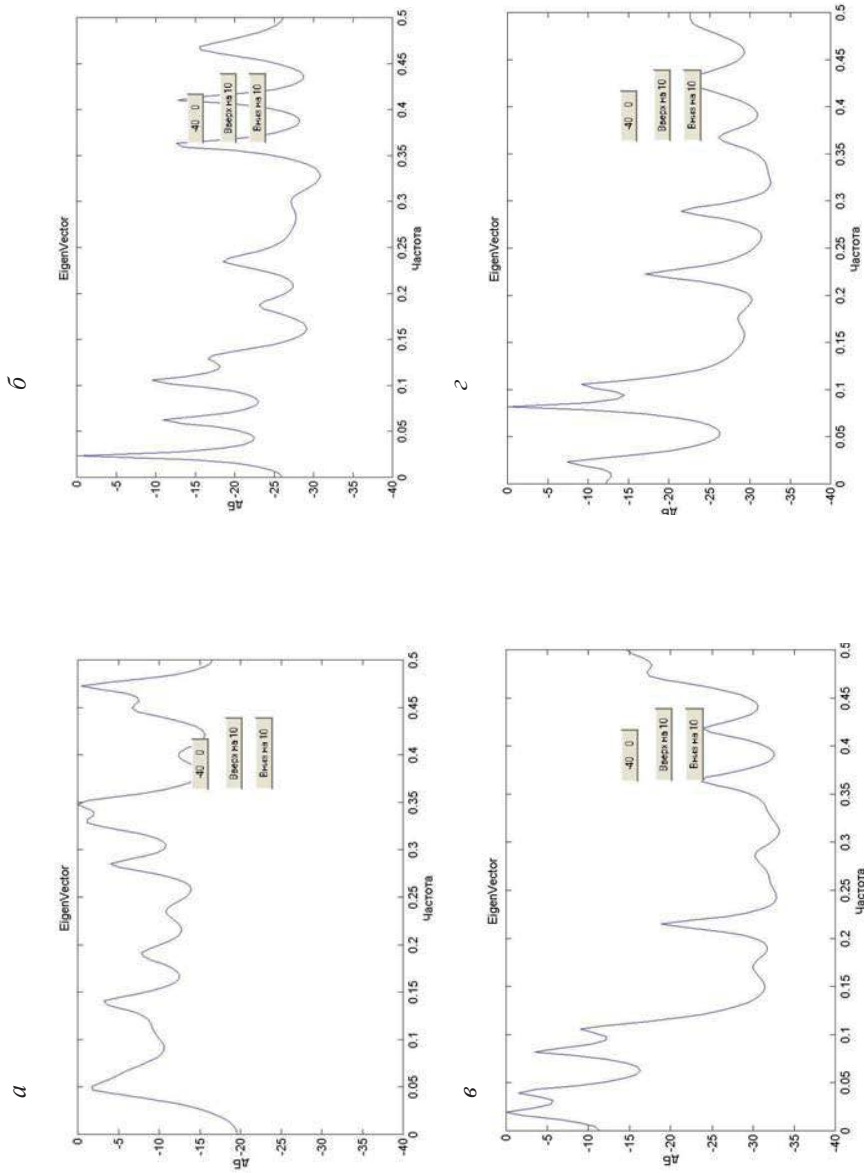

Рис. 4. Спектры остаточных рядов ДКХ кустарников:
А — Б-BN-1(2); Б — МК-SL-9(1);
В — МК-DF-2(1); Г — МК-DF-2(1-4)

Fig. 4. Spectra of residual rows of tree-ring chronologies of shrubs:
А — Б-BN-1(2); Б — МК-SL-9(1); В — МК-DF-2(1);
Г — МК-DF-2(1-4)

Из преобладающих гармоник — 40-50 лет, 18-22 года, 8-12 лет, 4-6 лет — практически все, кроме первой, повторяют спектр деревьев-эдификаторов (сосна, лиственница, кедр) севера лесной зоны ЯНАО [2, 11, 12].

Кроме получения спектров остаточные ряды были протестированы на стационарность при помощи критерия серий. Для доверительной вероятности 0, 95 все остаточные ряды стационарны.

Особенности роста кустарников в ямальской тундре (влияние переменной ветровой нагрузки, снежного покрова) [1] обусловливает сильную асимметрию кольцевого рисунка и необходимость вести анализ усредненных временных рядов по нескольким радиусам на каждом спиле. Для оценки влияния асимметрии были получены кривые роста, основные статистики остаточных временных рядов, их спектральные оценки ДКХ ольховника (рис. 4, таблицы 2, 3). Сравнительный анализ показывает, что при усреднении ДКХ по 4 радиусам произошло некоторое изменение их статистических параметры, не повлиявшее на оценку устойчивости временного ряда, кривые роста и спектры сохранили подобие таковым по 1 радиусу. Для более детального анализа факторов, влияющих на динамику биоразнообразия, следует анализировать изменчивость прироста кустарников на разных уровнях: между отдельными стволиками, между отдельными срезами стволика, между отдельными радиусами среза, а также в пределах одного радиуса среза, предпочтительно отличающегося от прочих наибольшей изменчивостью ширины годичных колец. В настоящей работе был рассмотрен преимущественно последний аспект анализа кустарниковых хронологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев С. П. Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарников на севере Ямала и Гыданского полуострова / С. П. Арефьев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2015. Том 8. № 4. С. 377-393.
2. Арефьев С. П. Спектральный анализ древесно-кольцевых хронологий уникальных деревьев на севере Западной Сибири / С. П. Арефьев, В. Р. Цибульский // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2016. Том 2. № 2. С. 33-44. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-2-33-44
3. Дэви Н. М. Морфология лиственницы сибирской в связи с современным изменением климата в высокогорьях Полярного Урала: автореф. дис. канд. биол. наук / Н. М. Дэви. Пермь: ПермГУ, 2008. 27 с.
4. Захаров В. М. Гомеорез: онтогенетический, популяционный и эволюционный анализ / В. М. Захаров // Термодинамика и регуляция биологических процессов. Теория информации, управление в живых системах, проблемы самоорганизации, эволюция и онтогенез. М.: Наука, 1984. С. 294-302.
5. Лейбман М. О. Этапы и проявления процесса криогенного оползания по данным исследований на Югорском полуострове и Ямале / М. О. Лейбман, И. В. Арчегова, Л. А. Горланова, А. И. Кизяков // Криосфера Земли. 2000. Том 4. № 4. С. 67-75.

6. Николаев А. Н. Влияние склоновых процессов на произрастание ивы на Ямале / А. Н. Николаев, В. В. Самсонова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2012. № 12. С. 195-203.
7. Николаев А. Н. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев в Центральной Якутии / А. Н. Николаев, Ю. Б. Скачков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2012. № 5. С. 43-51.
8. Николаев А. Н. Влияние снежного покрова на рост и развитие лесов в Центральной Якутии / А. Н. Николаев, Ю. Б. Скачков // Криосфера Земли. 2011. № 3. С. 71-80.
9. Природная среда Ямала. Том 3. Биоценозы Ямала в условиях промышленного освоения / С. П. Арефьев, С. Н. Гашев, В. Б. Степанова, Р. Г. Фаттахов, Т. А. Шарапова, С. И. Степанов; отв. ред. С. П. Арефьев. Тюмень: Изд-во Института проблем освоения Севера СО РАН, 2000. 136 с.
10. Розенберг Г. С. Теоретический анализ связи между площадью описания и числом встреченных видов / Г. С. Розенберг // Биологические науки. 1989. № 11. С. 76-82.
11. Цибульский В. Р. Математическая модель динамики древесно-кольцевых хронологий природных зон севера Западной Сибири / В. Р. Цибульский, С. П. Арефьев // Вестник кибернетики. № 2 (18). Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2015. С. 65-71.
12. Цибульский В. Р. Сравнительный анализ динамики древесно-кольцевых хронологий из разных пунктов на севере Западной Сибири / В. Р. Цибульский, С. П. Арефьев // Вестник кибернетики. № 1 (17). Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2015. С. 30-37.

Stanislav P. AREFYEV[1]
Vladimir R. TSYBULSKY[2]
Arsenyi Yu. ANTONYUK[3]

FEATURES OF THE ANALYSIS OF TEMPORARY RANKS OF THE GAIN SHRUBS OF THE SUBARCTIC TUNDRA OF THE YAMAL PENINSULA

[1] Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of the Biodiversity
and Natural Complexes' Sustainability Sector,
Institute of the Problems of Northern Development
of the Siberian Branch of the RAS (Tyumen);
Tyumen State University
sp_arefyev@mail.ru

[2] Dr. Sci. (Tech.) Professor, Lead Researcher,
Institute of the Problems of Northern Development
of the Siberian Branch of the RAS (Tyumen)
v-tsib@yandex.ru

[3] Master Student,
Department of Socio-Economical Geography
and Environmental Management,
Institute of Earth Sciences, Tyumen State University
antarseni@yandex.ru

Abstract

This article considers features of temporary ranks of width of rings of the spread and upright shrubs of the Yamal tundra on the example of *Betula nana*, *Salix lanata* and *Duschekia fruticosa*. As shrubs are edifikators of many tundra communities, their temporary ranks are considered as a kreod — the main trajectory of dynamics of community which is most characterizing dynamics of its parameters including a biodiversity. In particular, stability of temporary ranks of shrubs allow to judge the stability of biodiversity parameters of the

Citation: Arefyev S. P., Tsybulsky V. R., Antonyuk A. Yu. 2017. "Features of the Analysis of Temporary Ranks of the Gain Shrubs of the Subarctic Tundra of the Yamal Peninsula". Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, vol. 3, no 2, pp. 67-80. DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-67-80

communities determined by them. To assess the stability and recurrence of temporary ranks of shrubs gain in the studied territory, they are approximated, and spectral characteristics of residual ranks are received by the MUSIC method (Multiple Signal Classification) in EV option (its own vector). The assessment of stability of ranks by criterion of normal distribution of values of a row is carried out. The comparative analysis of dynamic properties of a temporary number of a gain is carried on one radius of a bush cut out and when averaging a gain from asymmetric radiuses of one cut.

Keywords

Shrub tundra, Yamal Peninsula, tree-ring chronology, ecosystem stability, time series analysis, frequency spectra.

DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-2-67-80

REFERENCES

1. Arefyev S. P. 2015. "Fiksatsiya potepleniya klimata v drevesno-kol'tsevykh khronologiyakh kustarnikov na severe Yamala i Gydanskogo poluostrova" [Fixing of Warming of Climate in Wood and Ring Hronologiya of Bushes in the North of Yamal and Gyda Peninsula]. Zhurnal Siberian Federal University. Seriya "Biologiya", vol. 8, no 4, pp. 377-393.
2. Arefyev S. P., Tsibulsky V. R. 2016. "Spektral'nyi analiz drevesno-kol'tsevykh khronologiy unikal'nykh derev'ev na severe Zapadnoy Sibiri" [The Spectral Analysis of Wood and Ring Hronologiya of Unique Trees in the North of Western Siberia]. Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, vol. 2, no 2, pp. 33-44. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-2-33-44
3. Davy N. M. 2008. "Morfologiya listvennitsy sibirskoy v svyazi s sovremennym izmeneniyem klimata v vysokogoryakh Polyarnogo Urala" [Morfology of a Larch Siberian in Connection with Modern Climate Change in Highlands of Polar Ural Mountains]. Cand. Sci. (Biol.) diss. abstract. Perm: Perm State University.
4. Zakharov V. M. 1984. "Gomeorez: ontogeneticheskiy, populyatsionnyy i evolyutsionnyy analiz" [Gomeorez: Ontological, Population and Evolutionary Analysis]. In: Termodinamika i regulyatsiya biologicheskikh protsessov. Teoriya informatsii, upravlenie v zhivykh sistemakh, problemy samoorganizatsii, evolyutsiya i ontogenez [Thermodynamics and Regulation of Biological Processes. The Theory of Information, Management in Live Systems, Self-Organization Problems, Evolution and Ontogenesis], pp. 294-302. Moscow: Science.
5. Leybman M. O., Archegova I. B., Gorlanova L. A., Kizyakov A. I. 2000. "Etapy i proyavleniya proysessa kriogennogo opolzaniya po dannym issledovaniy na Yugorskom poluostrove i Yamale" [Stages and Manifestations of Process of Cryogenic Sliding According to Researches on the Yugorsky Peninsula and Yamal]. Kriosfera Zemli, vol. 4, no 4, pp. 67-75.
6. Nikolaev A. N., Samsonova V. V. 2012. "Vliyaniye sklonovykh protsessov na proizrastaniye ivy na Yamale" [Influence of Slope Processes on Growth of a Willow on Yamal]. Tyumen State University Herald, no 12, pp. 195-203.

7. Nikolaev A. N., Yu. B. Skachkov. 2012. “Vliyaniye snezhnogo pokrova i temperaturnogo rezhima merzlotnykh pochv na radial’nyi prirost derev’ev v Tsentral’noy Yakutii” [Influence of Snow Cover and Temperature Condition of Cryomorphic Soils on a Radial Gain of Trees in the Central Yakutia]. Zhurnal Sibirskogo federal’nogo universiteta. Seriya “Biologiya”, no 5, pp. 43-51.
8. Nikolaev A. N., Skachkov Yu. B. 2011. “Vliyaniye snezhnogo pokrova na rost i razvitiye lesov v Tsentral’noy Yakutii” [Influence of Snow Cover on Growth and Development of the Woods in the Central Yakutia]. Kriosfera Zemli, no 3, pp. 71-80.
9. Arefyev S. P., Gashev S. N., Stepanova V. B., Fattakhov R. G., Sharapova T. A., Stepanov S. I. (eds). 2000. Prirodnaya sreda Yamala [Environment of Yamal]. Vol. 3. Biotsenozy Yamala v usloviyakh promyshlennogo osvoyeniya [Biocenoses of Yamal in the Conditions of Industrial Development]. Tyumen: Publishing house of Institute of Problems of Development of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science.
10. Rosenberg G. S. 1989. “Teoreticheskiy analiz svyazi mezhdu ploshchad’yu opisaniya i chislom vstrechennykh vidov” [Theoretical Analysis of Communication Between the Area of the Description and Number of the Found Species]. Biologicheskie nauki, no 11, p. 76-82.
11. Tsibulsky V. R., Arefyev S. P. 2015. “Matematicheskaya model’ dinamiki drevesno-kol’tsevykh khronologiy prirodnykh zon severa Zapadnoy Sibiri” [Mathematical Model of Dynamics of Wood and Ring Chronology of Natural Zones of the North of Western Siberia]. Vestnik kibernetiki, no 2 (18), pp. 65-71. Tyumen: Publishing house of IPOS of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science.
12. Tsibulsky V. R., Arefyev S. P. 2015. “Sravnitel’nyi analiz dinamiki drevesno-kol’tsevykh khronologiy iz raznykh punktov na sexere Zapadnoy Sibiri” [The Comparative Analysis of Dynamics of Wood and Ring Hronologiya from Different Points in the North of Western Siberia]. Vestnik kibernetiki, no 1 (17), pp. 30-37. Tyumen: Publishing house of IPOS of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science.