
ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ И МИКРООРГАНИЗМОВ

© С.П. АРЕФЬЕВ

sp_arefyev@mail.ru

УДК 630*561.24:58.056

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЯХ ГОРОДА ТЮМЕНИ

АННОТАЦИЯ. С целью выявления особенностей климатической детерминации древесного прироста в условиях юга лесной зоны изучены обобщенные древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) сосны обыкновенной с участков экологического мониторинга г. Тюмени и его окрестностей (продолжительность с 1900-1936 по 2012 гг.). В программе STATISTICA рассчитана множественная регрессия стандартизованных индексов ширины кольца по параметрам температуры воздуха, грунта и количеству осадков в год образования кольца и в предыдущий год (годовым и месячным, включая зимние). В разных вариантах использовано от 26 до 40 параметров. Выявлен высокий, для ряда ДКХ близкий к функциональному ($R \rightarrow 1,0$), уровень множественной корреляции и детерминации ширины кольца двухлетним комплексом месячных параметров температуры и осадков, системно характеризующий атмосферную циркуляцию. Отмечен высокий уровень связи ширины кольца с рядом частных климатических параметров. Для решения обратной задачи рассчитана факторная регрессия климатических параметров по совокупности отдельных ДКХ из разных почвенно-гидрологических условий. Уровень связи зависит от числа использованных ДКХ: уже 7 хронологий индексированной ширины кольца обеспечивают функциональную связь ($R=1,0$) со среднегодовой температурой воздуха в год образования кольца и в предыдущий год в качестве зависимых переменных регрессии. Полученные результаты опровергают мнение об ограниченной пригодности ДКХ подтаежной зоны в дендроклиматических реконструкциях и прогнозе.

SUMMARY. To find out the climatic determination of annual wood gain in the conditions of the southern forest zone, generalized tree-ring chronology (TRC) of *Pinus silvestris* from sites of environmental monitoring of Tyumen and its vicinity (from 1900 (1936) to 2012) is studied. In STATISTICA program multiple regression of indexes of width of rings by parameters of air and ground temperatures, and precipitation in the year of formation of the ring and the previous year (annual and monthly, including winter) is calculated. In different cases 26 to 40 parameters are applied. The level of multiple correlation and determination of width of a ring by a two-year complex of monthly parameters of temperature and precipitation, systemically characterizing

atmospheric circulation is revealed high (close to functional for some TRC ($R \rightarrow 1.0$)). High level of correlation of width of rings with a number of particular climatic parameters is revealed. To solve the inverse problem, factorial regression of climatic parameters of a set of separate TRC from different soil and hydrological conditions is calculated. The level of correlation depends on the number of applied TRC: 7 chronologies of indexed width of a ring are enough to provide functional relation ($R=1.0$) with average annual air temperature in the year of formation of a ring and the previous year as dependent variable. The results disprove the limited suitability of TRC of the subtaiga area in dendroclimatological reconstruction and prognosis.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Древесные кольца, климат, экологический мониторинг, Западная Сибирь.

KEY WORDS. Tree rings, climate, environmental monitoring, West Siberia.

Анализ древесно-кольцевых хронологий (ДХР) широко используется в оценках состояния компонентов окружающей среды, в долгосрочном мониторинге ее антропогенных изменений и современных климатических тенденций. В дендроклиматологии чаще рассматриваются ДХР из районов, где годичный прирост деревьев и кустарников жестко лимитирован климатическими факторами — обычно температурой и осадками [1]. На территории Западно-Сибирской равнины масштабные дендроклиматические исследования были проведены в гипоарктической зоне [2], в импактных зонах стока ряда рек, а также в лесостепных борах [3]. Наиболее достоверные и однозначные связи древесного прироста с климатическими и гидрологическими показателями отмечены для северной части региона (коэффициент корреляции до 0,7-0,8), для южной его части они менее надежны. Потепление климата, наблюдающееся в течение XX столетия, максимально проявляется в ДХР северотаежной зоны Западной Сибири [4]. Потепление климата в регионе сопровождается смещением границы распространения древесных растений на север [5], фенологическими сдвигами [6], увеличением изменчивости урожаев сельскохозяйственных культур в южных регионах [7].

Цель настоящей работы — выявить особенности климатической детерминации древесного прироста в условиях юга лесной зоны и оценить пригодность ДКХ г. Тюмени для дендроклиматических реконструкций и прогноза.

Материалы и методика. В 2001 г. в насаждениях г. Тюмени и его зеленой зоны было заложено 4 реперных участка экологического мониторинга (1 га) с описанием компонентов биогеоценоза [8]: в естественных (биостанция ТюмГУ «Кучак» — МК, контроль) и испытывающих антропогенную трансформацию (лесопарк им. Ю.А. Гагарина — МГ, лесопарк д. Плеханова — МП) сосново-березовых насаждениях, а также в насаждении Текутьевского кладбища в центре города — МТ. При повторном обследовании участков в 2012 г. были отобраны репрезентативные дендрохронологические образцы сосны и березы:

ДКХ	МК	МГ	МП	МТ
Сосна: продолжительность	1931-2012	1926-2012	1936-2012	1900-2000
средняя ширина кольца, мм	2,0	2,5	1,8	3,3
Береза: продолжительность	1908-2012	1949-2012	1947-2012	1900-2000
средняя ширина кольца, мм	1,5	2,0	2,0	2,1

Абсолютная ширина годичного кольца (*мм*) как индикатор продуктивности и климата имеет ограниченное применение, поскольку зависит от возраста дерева и ряда других причин. Индексирование ДКХ, устраняющее их влияние, проведено методом отрицательного экспоненциального сглаживания [9], признанного лучшим для оценки долговременных климатических трендов [1], [4]. Рассчитаны также коэффициенты чувствительности [10] (центрированные), абсолютные значения которых интерпретируются как индексы стресса (неустойчивости) насаждений [11]. Проведен анализ множественной регрессии хронологий индексов ширины кольца (индексов прироста) и индексов стресса по среднемесячным температурам воздуха и месячным суммам осадков в Тюмени в текущем (год образования кольца) и предыдущем годах за период с 1966 по 2008 г. (вариант А, всего 40 параметров), и по среднемесячным температурам грунта на глубине 0,4 м и годовой сумме осадков в текущем и предыдущем годах за период с 1937 по 1990 г. (вариант Б, всего 26 параметров). Используются программы EXCEL и STATISTICA.

Результаты. Лучшие результаты получены по ДКХ сосны. Отмечен очень высокий уровень множественной корреляции хронологий индексов ширины кольца с месячными параметрами температуры и осадков за два года (вариант А), практически полностью объясняющий изменчивость индексов прироста (R составляет от 0,96 для УГ до 0,9(9) для УК) (рис. 1). Аналогичный уровень множественной связи выявлен и для индексов стресса, отражающих воздействие климатозависимых патологических факторов: биотических (вредители и болезни) и гидрологических (подтопление грунтовыми водами на МП в 2004 г.) (рис. 2). Полученный результат опровергает мнение об непригодности слабо лимитированных климатическими факторами ДКХ подтаежной зоны для надежной дендроклиматологической оценки.

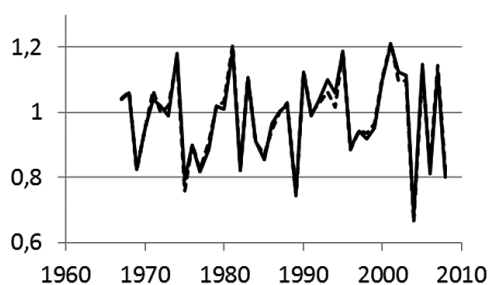


Рис. 1. Индекс ширины кольца. Факт и реконструкция (курсив)

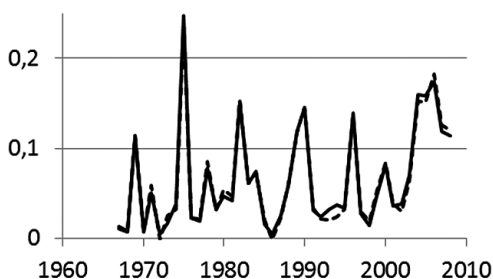


Рис. 2. Индекс стресса. Факт и реконструкция (курсив)

При расчете множественной регрессии индексов ширины кольца отмечается высокий уровень частной связи (β) с температурой почвы (рис. 3) и количеством осадков (рис. 4) в отдельные месяцы предыдущего и текущего года. Причем, такая связь установлена не только с климатическими параметрами вегетационного периода, но и с температурой и осадками зимних месяцев, когда деревья не растут. Это может объясняться как опосредованным влиянием климата на прирост деревьев (гибель энтомофитов в холодные и малоснежные зимы), так системностью формирования климатических факторов, проявляющейся за взятый двухлетний период и характеризующей определенный тип атмосферной циркуляции.

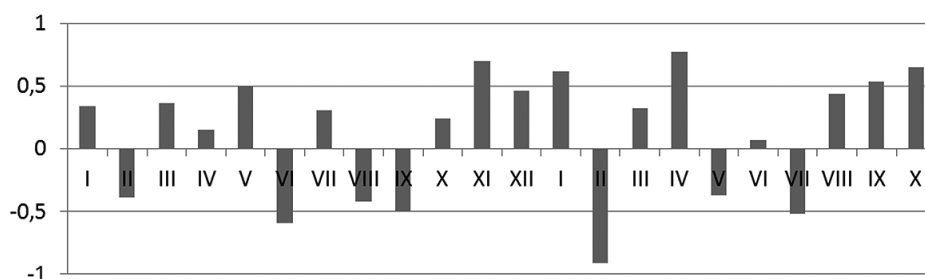


Рис. 3. Связь (β) индексов ширины кольца со среднемесячными температурами грунта (0,4 м) в текущем и предыдущем годах

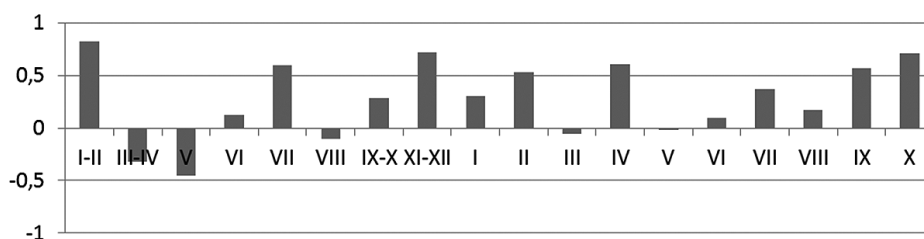


Рис. 3. Связь (β) индексов ширины кольца с суммами осадков в текущем и предыдущем годах

В отличие от характера связи ширины кольца с температурой (зачастую отрицательной, в частности для июля текущего года), связь с количеством осадков, как правило, положительна, что показывает дефицит влажности в условиях Тюмени (рис. 3, 4).

Высокий уровень множественной корреляции хронологий индексов прироста и стресса с климатическими параметрами выявлен и в упрощенном варианте Б, в котором для контрольного участка МК он составляет 0,85, а для остальных — 0,76-0,78. При этом главные компоненты регрессии на разных участках различны: на МК — температура июня текущего года (с отрицательным знаком), на МГ — температура мая предыдущего года (+), на МП — температура января предыдущего года (-), на МТ — температура декабря (-).

Частная корреляция индексов ширины кольца в ДКХ с отдельных участков с годовыми климатическими параметрами характеризуется низким уровнем.

Для количества осадков в году, предшествующем образованию кольца, она достигает 0,48, для количества солнечной радиации в текущем году — 0,35, для температурных параметров — не превышает 0,2.

Принципиальное значение имеет возможность обратной оценки климатических параметров по ширине годовых колец деревьев. Рассмотрена возможность расчета этих параметров по совокупности отдельных ДКХ из разных почвенно-гидрологических условий. Для этого кроме ДКХ из названных выше травяно-зеленомошных участков использованы ДКХ из сосняков мохово-лишайниковых (близ д. Криводанова), сфагново-багульниковых (близ п. Караганда), травяно-болотных (побережье оз. Б. Тарманское) — всего 7 ДКХ.

Программа STATISTICA предлагает различные варианты регрессионных моделей в рамках такого подхода: в частности, множественную, полиномиальную, факторную модели. Даже при использовании обычной модели множественной регрессии, не предполагающей взаимодействия предикторов, выявленный уровень корреляции годовых климатических параметров с индексированной шириной годового кольца по совокупности ДКХ оказался значительно более высоким, нежели по отдельным ДКХ или по одной генерализованной ДКХ, усредняющей значения ДКХ с разных участков. Для года образования кольца по среднегодовой температуре воздуха он составил 0,44, по годовой сумме осадков — 0,53, по среднегодовой температуре грунта на глубине 0,4 м — 0,53. Еще выше уровень такой связи со средней температурой грунта в некоторые месяцы, например, с ноябрьской в год образования кольца — 0,56 (хотя образование кольца заканчивается уже в сентябре!). Главные компоненты множественной регрессии показывают, что для большинства месяцев текущего года (кроме мая, июля и августа) с уменьшением индексов ширины кольца среднемесячные температуры грунта в Тюмени увеличиваются (и наоборот).

Хотя большинство построенных ДКХ при использовании обычных методов недостаточно продолжительны для анализа долговременных климатических трендов, описанный выше метод дендроклиматической реконструкции показывает тенденцию увеличения среднегодовых температур грунта (на глубине 0,4 м) в Тюмени во второй половине XX в., соответствующую данным метеонаблюдений (рис. 5).

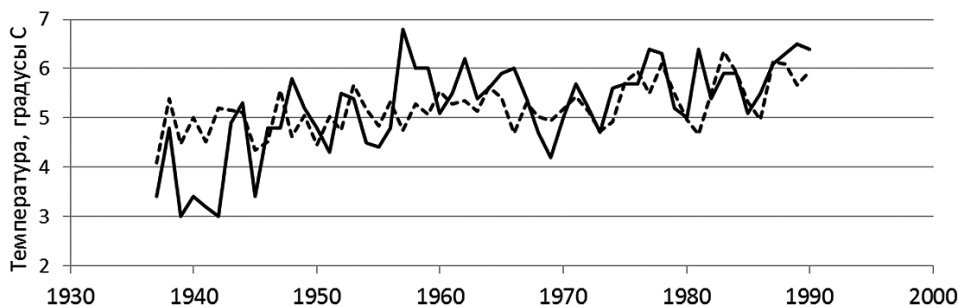


Рис. 5. Температура грунта на глубине 0,4 м. Факт и реконструкция методом обычной множественной регрессии (пунктир)

При использовании модели полиномиальной регрессии коэффициент множественной корреляции климатических параметров с индексами ширины кольца для семи названных ДКХ становится еще выше: по средней температуре воздуха в год образования кольца он составил 0,61, в предыдущий год — 0,49.

Наконец, при использовании модели факторной регрессии, предполагающей наиболее полный анализ эффектов взаимодействий нескольких зависимых и независимых переменных, для семи названных ДКХ множественная корреляция ширины кольца со средними температурами воздуха в год образования кольца и предыдущий год достигает функционального уровня ($R=1,0$), что предполагает весьма точные значения дендроклиматической реконструкции и прогноза в г. Тюмени. При уменьшении числа используемых ДКХ (менее семи) уровень такой множественной корреляции постепенно снижается. Например, для разных сочетаний шести ДКХ он был в пределах 0,95-0,99 для средней температуры воздуха в год образования кольца и 0,85-0,95 — для средней температуры воздуха в предыдущий год.

Заключение. Таким образом, несмотря на отсутствие жесткого климатического лимитирования роста деревьев в городе Тюмени, древесно-кольцевые хронологии сосны обыкновенной обнаруживают чрезвычайно высокий уровень обусловленности климатическими параметрами, прежде всего, температурой и осадками. Это выявляется при множественной регрессии параметров древесного прироста среднемесячными температурами (воздуха и грунта) и месячными суммами осадков за двухлетний период (в год образования годичного кольца и в предыдущий год, не исключая зимнего периода). В таком непрерывном продолжительном массиве метеоданных проявляется системный характер формирования климатических параметров, определяемых типом атмосферной циркуляции и их системное влияние на радиальный прирост деревьев.

Ширина годичных колец (индекс) более тесно связана с температурой грунта, нежели с температурой воздуха, поскольку первая является более комплексным биоклиматическим показателем, формирующимся под существенным влиянием атмосферных осадков.

В плане реконструкции климатических параметров, в частности, средних годовых температур, наилучшие результаты дает использование модели факторной регрессии по совокупности отдельных ДКХ из разных почвенно-гидрологических условия. Функциональный уровень множественной корреляции между зависимыми переменными (среднегодовые температуры воздуха) и предикторами (ДКХ индексов ширины кольца) был достигнут при использовании семи ДКХ, в значительной мере охватывающих почвенно-гидрологический диапазон сосновых насаждений г. Тюмени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 364 p.
2. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
3. Агафонов Л.И. Древесно-кольцевая индикация гидролого-климатических условий в Западной Сибири: Дисс. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2011. 231 с.

4. Shishov V.V., Vaganov E.A. Dendroclimatological evidence of climate changes across Siberia // *Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research*. Vol. 40 (Heiko Balzter, ed.). Springer, 2010. Pp. 101-114.

5. Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Приполярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. 216 с.

6. Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П. Современная динамика климата и фенологическая изменчивость северных территорий // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11 (часть 5). С. 1063-1077.

7. Павлова В.Н. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агроценозов России: методология, модели, результаты расчетов // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2009. № 1(7). Т. 11. С. 1543-1548.

8. Гашев С.Н., Алешина О.А., Арефьев С.П. и др. Начальный этап мониторинга экосистем г. Тюмени и его пригородной зоны // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. Вып. 3. Тюмень: Изд-во Института проблем освоения севера Сибирского отделения РАН, 2002. С. 80-93.

9. Gardner, S.E. Exponential Smoothing: The state of the Art // *Journal of Forecasting*. 1985. V.4. Pp. 1-28.

10. Fritts, H. C. Tree-ring analysis: a tool for water resources research // *Transactions of the American Geophysical Union*. 1969. Vol. 50 (1). Pp. 22-29.

11. Арефьев С.П. Оценка устойчивости кедровых лесов Западно-Сибирской равнины // *Экология*. 1997. № 3. С. 149-157.

REFERENCES

1. *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences* / Eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 364 p.

2. Vaganov, E.A., Shijatov, S.G., Mazepa, V.S. *Dendroklimateicheskie issledovanija v Uralo-Sibirskoj Subarktike* [Dendroclimatological researches in Uralo-Siberian subarctic zone]. Novosibirsk: Nauka, 1996. 246 p. (in Russian).

3. Agafonov, L.I. *Drevesno-kol'cevaja indikacija gidrologo-klimaticeskikh uslovij v Zapadnoj Sibiri* (diss. dokt.) [Tree-ring indication of hydroclimatic environment in West Siberia (Dokt. Diss.)]. Ekaterinburg, 2011. 231 p. (in Russian).

4. Shishov V.V., Vaganov E.A. Dendroclimatological evidence of climate changes across Siberia // *Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research*. Vol. 40 (Heiko Balzter, ed.). Springer, 2010. Pp. 101-114.

5. Shijatov, S.G. *Dinamika drevesnoj i kustarnikovej rastitel'nosti v gorah Pripoljarnogo Urala pod vlijaniem sovremennyh izmenenij klimata* [Dynamics of tree and shrub vegetation in the mountains of the Subpolar Ural under the influence of modern climate changes]. Ekaterinburg, 2009. 216 p. (in Russian).

6. Grebenjuk, G.N., Kuznecova, V.P. Modern dynamics of climate and phonological changeability of northern territories. *Fundamental'nye issledovanija — Fundamental research*. 2012. № 11 (part 5). Pp. 1063-1077. (in Russian).

7. Pavlova, V.N. The problem of evaluation of the impact of climate changes on the productivity of agricultural sphere in Russia: methodology, models, calculation results // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN — Bulletin of Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences*. Vol. 11. № 1 (7). 2009. Pp. 1543-1548. (in Russian).

8. Gashev, S.N., Aleshina, O.A., Aref'ev, S.P. et al. The initial stage of monitoring of ecosystems of Tyumen and its suburban zone. *Vestnik ekologhii, lesovedeniya i landshaftovedeniya — Bulletin of Ecology, Forestry and Landscape Science*. 2002. Issue 3. Tyumen. Pp. 80-93. (in Russian).

9. Gardner, S.E. Exponential Smoothing: The state of the Art // Journal of Forecasting. 1985. V. 4. Pp. 1-28.
10. Fritts, H.C. Tree-ring analysis: a tool for water resources research // Transactions of the American Geophysical Union. 1969. Vol. 50 (1). Pp. 22-29.
11. Aref'ev, S.P. Evaluation of cedar forest tolerance in West Siberia. *Jekologija — Ecology*. 1997. №. 3. Pp. 149-157. (in Russian).