

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФУРЬЕ**

*ст. преп. Е.В. ДЕГТЯРЕВА, канд. техн. наук,
доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ, канд. с.-х. наук, доц. А.А. БОЛБОТУНОВ
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)*

Природные системы, как правило, чрезвычайно сложны в силу большого количества взаимосвязей, сила и постоянство которых непрерывно меняются. Одни и те же внешние воздействия нередко приводят к различным, а иногда и к противоположным результатам. Это зависит от состояния, в котором находилась система в момент воздействия. Предвидеть ответные реакции системы на действие тех или иных факторов можно только через сложный анализ существующих в ней количественных взаимоотношений и закономерностей. Поэтому широкое распространение в экологии при изучении и прогнозировании природных процессов получило моделирование, как метод исследования сложных объектов, явлений и процессов путем их упрощенного имитирования. Основывается моделирование на теории подобия (сходства) с объектом-аналогом. Суть математического моделирования заключается в том, что с помощью математических символов строится абстрактное упрощенное подобие изучаемой системы. Далее, меняя значение отдельных параметров, исследуют, как поведет себя данная искусственная система, т. е. как изменится конечный результат. Математическая модель, как средство обобщения разнородных данных об объекте, позволяет осуществлять как интерполяцию (восстановление недостающей информации о прошлом), так и экстраполяцию (прогнозирование будущего поведения объекта).

Ширина годичного кольца дерева – величина, формирующаяся под влиянием многочисленных природных факторов, влияющих на дерево как непосредственно в период формирования кольца, так и складывающаяся из совокупного влияния факторов предыдущих лет. Периодичность радиального прироста, уже давно замеченная исследователями, и длительность дендрохронологических шкал образуют прекрасный материал для математического моделирования. Цикличность процесса предполагает задачу поиска периодичности в данных, которая обычно производится с использованием методов анализа временных рядов.

К основным, наиболее часто используемым на практике, методам анализа временных рядов обычно относят анализ Фурье, спектральный анализ, фрактальный и некоторые другие. В последние годы проявился большой интерес к разработке альтернативных вариантов, таких как декомпозиция временного ряда на несколько составляющих (вейвлет-анализ, спектральное сингулярное разложение и др.). Тем не менее эти методы и другие близкие к ним задачи требуют, чтобы сигнал был параметризован. Но во многих случаях это нелегко сделать особенно нематематическим специалистам, таким как биологи, экологи.

В этой статье мы представляем результаты моделирования, основанного на классическом анализе Фурье, базовая математика которого легко понятна и не требует глубокого знания теории. Кроме того, такая функция способна идентифицировать все значимые циклические компоненты и линейный тренд (если имеется) во временном ряду и, при желании, делать прогнозы за пределами наблюдаемых значений.

Для решения поставленной задачи в работе мы избавляемся от гиперболического тренда (период большого роста у дерева) и переходим к относительным единицам, относя исходный ряд к скользящему среднему с окном в 20 лет. Если период известен, коэффициенты синусоидальной функции (параметры модели) могут быть получены на основе многомерной регрессии. Однако в нашем случае периоды изменения радиального прироста или периоды факторов его определяющих не известны.

Для практических расчетов мы воспользовались функцией-процедурой в среде MATLAB, предложенной для открытого пользования в [1] Предлагаемая процедура находит период для каждой гармоники, которая наилучшим образом соответствует ряду, выявляя её последовательным тестированием каждого значения в заданном наборе периодов (от трех до половины длины ряда) и оценку параметров модели. Критерием выбора оптимального периода является минимум суммы квадратов отклонений модели от исходных данных.

Как только первое приближение к модели было найдено, оно вычитается из реальных данных, образуя остаточный ряд. Затем периодическая регрессия применяется к остаточному ряду для получения второй оптимальной гармоники и т.д.

Чтобы определить, является ли добавление новой гармонической составляющей статистически значимым (продолжая поиск периодов), мы используем тест отношения правдоподобия, т.е. вычисляем сумму квадратов отклонений. Как только найдена последняя значимая гармоника, окончательная модель, включающая все гармоники и коэффициенты, устанавливается путем множественной регрессии.

Похожие алгоритмы на основе Фурье-анализа с различными модификациями использовались в Институте экологии растений и животных в Свердловске, в Литовском Институте Леса и с последующей модернизацией применялся в Полоцком государственном университете [2,3,4]. Прогноз таксационных характеристик на основе полиномиальной модели выполнялся в НП «Браславские озера» совместно с МГУЛ, г. Москва [5].

В качестве примера моделирования на рисунке 1 показана дендрошкала сосны, произрастающей в Браславском районе. Итоговая модель складывается из 12 гармоник. Коэффициент корреляции между исходным рядом и моделью $r = 0.87$.



Рисунок 1. – Динамика ширины годичного кольца сосны на пробной площади № 90 в Национальном парке «Браславские озера» ур. Дубки, сосняк кисличный

Следующая задача – поиск факторов, лимитирующих ширину годичного кольца, – выполняется с помощью корреляционно-регрессионного, минимаксного анализа и другими методами [5,6]

Верификация прогноза достаточно успешна для дальнейшего практического использования, так как обычно подтверждает в целом правильное направление тенденции динамики радиального прироста древесины. Вместе с тем, иногда в прогнозе чуть сдвигаются годы минимального и максимального прироста, что говорит о том, что модель и методы поиска лимитирующих факторов требуют дальнейших исследований с учетом структуры годичного кольца.

Литература

1. Gonzalez-Rodriguez, E. Computational Method for Extracting and Modeling Periodicities in Time Series / E. Gonzalez-Rodriguez, H. Villalobos, V.M. Gomez-Munoz, A. Ramos-Rodriguez // Open Journal of Statistics. – 2015. – № 5. – P. 604–617.
2. Берри, Б.Л. Периодические колебания индексов прироста лиственницы сибирской в Тазовской лесотундре и их прогноз / Б.Л. Берри, А.А. Либерман, С.Г. Шиятов // Экол. – 1979. – № 6. – С. 22–26.
3. Stravinskiene, V. Application of dendrocronological methods for dendroindication in European forest monitoring programme / Stravinskiene V. // Мониторинг леса: методология и перспектива : сб. ст. – Каунас : Гирионис, 1997. – С. 50–52.
4. Болботунов, А.А. Оценка состояния окружающей среды на основе комплексного мониторинга радиального прироста хвойных пород ООПТ/ А.А. Болботунов, Е.В. Дегтярёва // Современные технологии в деятельности особо охраняемых природных территорий: геоинформационные системы, дистанционное зондирование земли: сборник научных статей. – М. : А.Н. Вараксин, 2015. – С. 9–13.
5. Архипенко, И.П. Опыт и перспективы использования модели динамики лесных массивов FORRUS-S в Национальном парке «Браславские озера» для выбора стратегии ведения хозяйства / И.П. Архипенко, С.И. Чумаченко // Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование : материалы конференции. – М. : БГТУ, 2010. – Кн. 1. – С. 47–52.
6. Оськин, А.Ф. Программный комплекс для анализа и прогнозирования годичного радиального прироста деревьев / А.Ф. Оськин, А.А. Болботунов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2015. – № 12. – С. 28–38.