

## Дендроклиматический мониторинг

С начала 1990-х годов в России формируется единая государственная система экологического мониторинга. В ней предусмотрен раздел дендрохронологического и дендроклиматического мониторинга — «информационная система слежения, оценки и прогноза изменений годичного прироста деревьев и определяющих этот прирост факторов».

Этот раздел постоянно пополняется, и к настоящему времени накоплены уникальные пространственно-распределенные дендроклиматические данные (около 500 древесно-кольцевых хронологий и данные с 350 метеорологических станций), характеризующие динамическое состояние лесных экосистем почти на всей территории Российской Федерации под воздействием факторов окружающей среды.

Основой всех исследований в этой области служат сбор, обработка и анализ первичного материала, а именно — древесных образцов различных пород деревьев для самых различных лесных экосистем планеты. В зависимости от целей и задач исследования выбирают то или иное место обитания и определенное количество модельных деревьев (обычно не меньше 15). При этом деревья практически не повреждаются, сбор материала (древесных кернов) производят самым щадящим для дерева способом при помощи шведских буров, диаметр которых варьируется от 5 до 10 мм. Именно этот материал затем обрабатывается, оцифровывается и превращается во временные ряды, которые называются древесно-кольцевыми хронологиями (ДКХ). Остается распорядиться с пользой для дела этими фактически данными, например, на их основе составить прогноз будущей экосистемы или решить обратную задачу: восстановить климатические условия произрастания древесных растений по их ДКХ.

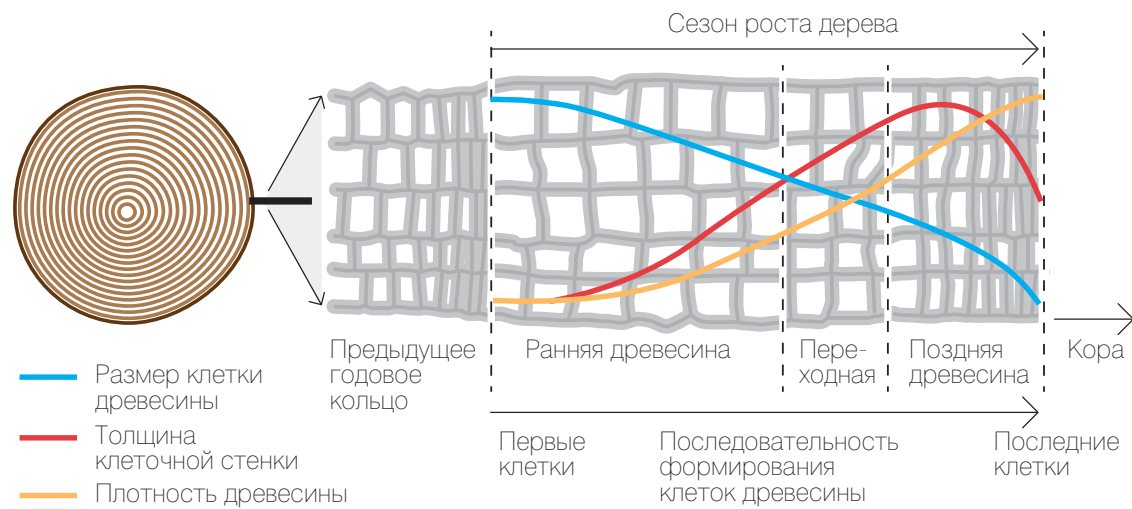
## От чисел Вольфа до глобальной экологии

То, что по кольцам на поперечном срезе дерева можно оценить, сколько ему лет, знали еще в древности. По ширине колец можно было догадаться, в какие годы дерево росло интенсивнее, а значит, и климатические условия в тот год были для него лучше. Но как точная наука дендрохронология начиналась именно с моделирования. В конце XIX века американский астроном Эндрю Дуглас обнаружил, что ширина годичных колец деревьев коррелирует с 11-летними циклами солнечной активности (числами Вольфа) и составил прогноз засух на юго-западе США, который с успехом был использован местными фермерами.

С тех пор область применения дендрохронологии существенно расширилась: от исследований в области физиологии растений до глобальной экологии. Изменились и подходы к дендроклиматическому моделированию. Существует множество специальных подходов, и один из них — так называемое имитационное моделирование. Такое моделирование больше подходит для имитации реальных процессов, но оно и сложнее. В мире на сегодняшний день существует около десяти имитационных моделей роста годичных колец деревьев.

## Просто и эффективно

В конце 1980-х годов красноярские ученые Е.А. Ваганов и А.В. Шашкин предложили имитационную модель применитель-



\_\_\_ Формирование годичного кольца хвойных деревьев (Источник: Cuny et al., 2014; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.12871/full#nph12871-fig-0001>)



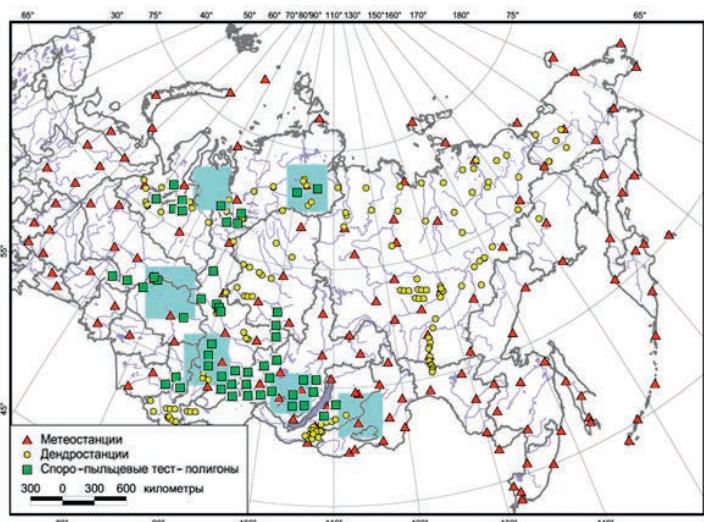
\_\_\_ Основатель науки дендрохронологии американский астроном Эндрю Дуглас



\_\_\_ На срезах долгоживущих деревьев, таких как секвойя, имеющих тысячи годичных колец, особенно заметны изменения размеров годовых колец на протяжении веков



\_\_\_ Сбор образцов (кернов) годичных колец деревьев малотравмирующим шведским буром. Центральная Якутия, 2015 год



\_\_\_ Пространственное распределение дендрохронологических тест-полигонов (дендростанций), метеорологических станций и споро-пыльцевых тест-полигонов на территории Сибири, включенных в систему дендроклиматического мониторинга РФ (рис. Владимира Шишова)

но к моделированию роста годичных колец деревьев на основе суточных климатических данных. Модель была настолько простой, что некоторые российские и зарубежные ученые сначала отнеслись к ней скептически.

Но модель Ваганова—Шашкина (VS-модель) доказала свою эффективность, адекватно моделируя рост древесных растений на основе климатической информации для самых различных местообитаний Северного полушария: юго-запада США, Северной Африки (Тунис), Пиренеев (Испания), Альп (Швейцария и Франция), Тибетского плато и Внутренней Монголии (Китай) и обширных территорий Сибири. Результаты, полученные на основе этой модели, были опубликованы в *Nature*, *Science*, *PNAS*, *Global Change Biology* и других высокоцитируемых журналах.

Сегодня модель переживает свое второе рождение. Дело в том, что основной блок модели содержит 27 параметров, которые тесно связаны как с функционированием самого древесного растения, так и с условиями его произрастания. Основная сложность всегда заключалась в адекватной оценке значений этих параметров, которые могут существенно варьироваться в зависимости от того, на какой территории мы находимся. Например, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) на Пиренеях растет совсем в других условиях, чем та же сосна в зоне вечной мерзлоты в центральной Якутии. Такие различия сказываются и на параметрах модели: их необходимо подобрать таким образом, чтобы они не противоречили физиологии роста древесных растений, а также тем прямым натурным наблюдениям, которые получены непосредственно в интересующих нас местообитаниях.

С формальной (математической) точки зрения, нахождение оптимума в 27-мерном пространстве — не самая тривиальная задача. С подобного рода задачами даже специальные алгоритмы и современные суперкомпьютеры справляются с трудом. Но для модели Ваганова—Шашкина решение было найдено. Нашей группой подбор таких параметров сейчас существенно упрощен, так как разработаны визуальные полуавтоматические процедуры параметризации (VS-осциллограф).

В 2015 году усовершенствованная VS-модель была успешно проверена на практике, когда по просьбе Китайской Академии наук мы помогли китайским коллегам оценить возможную реакцию древесных растений на территории Китая с учетом прогнозируемых климатических изменений.

На данный момент тестируется автоматическая параметризация модели, в основе которой лежат три параллельных процесса: прямая параметризация VS-модели (эволюционного алгоритма оптимизации), параметризация при помощи VS-метамодели (через многослойный перцептрон) и дообучение VS-метамодели с целью снижения нормы неувязки между моделируемыми кривыми роста, полученными для двух первых подходов параметризации.

Такая система, по сути, искусственного интеллекта позволит в автоматическом режиме проанализировать состояние лесных экосистем на огромной территории Евразии с учетом возможных климатических сценариев в средне- и долгосрочной перспективе.

**ВЛАДИМИР ШИШОВ**, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой математических методов и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск

Работа поддержана проектами РФ №14-14-00219 и №14-14-00219-П.