

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК

Новый алгоритм параметризации модели роста годовых колец деревьев: VS-осциллограф и его применение в дендроэкологии

И.И. Тычков¹, А.С. Леонтьев¹, В.В. Шишов^{1*}

Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, Красноярск, Россия. E-mail:
Статья поступила 7.08.2012, принята 17.11.2012

В работе предложен новый алгоритм параметризации имитационной модели роста древесных колец Ваганова-Шашкина. В основу данного алгоритма положена идея использования физического осциллографа для моделирования сигналов любой сложности. Данный подход получил название «VS-осциллограф». Описаны алгоритм работы VS-осциллографа и программное обеспечение, реализующее данный алгоритм в среде программирования Lazarus. Работа VS-осциллографа апробирована на дендроклиматических данных, полученных для тест-полигона в районе п. Чокурдах (Якутия, РФ). Наряду с раннелетней температурой показано значимое влияние влажности почвы на прирост древесных растений.

Ключевые слова: VS-осциллоскоп, параметризация, древесно-кольцевая хронология.

New algorithm of tree-ring growth model parameterization – Vs-oscilloscope and its application in dendroecology

I.I. Tychkov¹, A.S. Leontyev¹, V.V. Shishov¹

¹Siberian Federal University, 79, Svobodny av., Krasnoyarsk, Russia. E-mail:
The article received 7.08.2012, accepted 17.11.2012

In the paper new parameterization approach of process-based tree-ring model (VS-model) is developed. The idea of oscilloscope using in signal simulation is a basis for that approach. This algorithm is named as VS- oscilloscope. VS-oscilloscope algorithm and corresponding software developing by Lazarus are described. VS- oscilloscope is testing on dendroclimatic data obtained for test-polygon located in Chokurdakh (Yakutiya, Russia). It is shown soil moisture along with June-July temperature is a principal factor influencing on tree-ring growth.

Keywords: VS-oscilloscope, parameterization, process-based model, tree-ring chronology, tree-ring response, climate change.

Введение. Современное состояние биосферы, глобальные биосферные изменения конца XX века являются результатом нелинейных взаимоотношений естественных и антропогенных причин. Эти изменения отражаются, например, в уникальном 30-летнем повышении глобальной приземной температуры в позднем голоцене Земли, современном увеличении концентрации различных парниковых газов, прежде всего CO₂, увеличении количества и интенсивности различных катастрофических событий в XX веке и т. п. [1, 2, 3, 4, 5]. Как подобного рода уникальные изменения могут повлиять на природные биосистемы и их развитие? Как количественно оценить степень этого влияния? Поиск ответов на эти вопросы является одной из важнейших задач современной экологии [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Выявить и проанализировать различные закономерности в приросте древесных растений в связи с изменениями ведущих климатических факторов (температуры и осадков) можно при помощи, например, имита-

ционной модели роста древесных колец Ваганова-Шашкина (VS-модели) [9]. Данная модель успешно использовалась для различных видов древесных растений хвойных пород в самых различных местообитаниях, от северной границы бореальных лесов в циркумполярной области северного полушария до Средиземноморья [9, 12, 13, 14].

Однако применение данной модели существенно осложняется настройкой самой модели, а именно подбором оптимальных параметров роста древесных растений для конкретного местообитания. Подбор 42 параметров VS-модели в базовой версии осуществляется вручную, что является достаточно трудоемким процессом [13, 15].

Целью работы является создание нового подхода для параметризации имитационной модели роста древесных колец Ваганова-Шашкина, позволяющей вести настройку модели в полуавтоматическом режиме.

Описание базового алгоритма VS-модели. Модель строится на основе базового алгоритма, представлен-

* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционных проектов СО РАН № 53, 69 и проекта РФФИ № 12-04-00542-а

ного в VS-модели. Эта модель состоит из трех важных блоков (рис. 1).

В качестве входных данных используются климатические данные суточного разрешения (суточные средние температуры, накопленные осадки и освещенность) (рис. 1). Функциональный блок можно разделить на две части: расчет интегральной скорости роста годичных колец и последующая оценка камбиальной активности, позволяющая определить количество клеток, образовавшихся за сезон роста, и их радиальный размер [9]. В 2000 и 2006 гг. Ваганов и др. подробно описали базовый алгоритм работы VS-модели [12]. Вкратце, для определения интегральной скорости роста $G(t)$ используется следующее соотношение:

$$G(t) = g_E(t) \cdot \min\{g_T(t), g_W(t)\},$$

где $g_E(t)$, $g_T(t)$, $g_W(t)$ являются частными значениями скорости роста, зависящими от приходящей иррадиации E , температуры T и содержания воды в почве W .

Модель оценивает ежедневный водный баланс на основе накопленных в почке осадков (с учетом или без учета таянья снега), испарения (зависящего от температуры) и стока [16]. Количество приходящего солнечного света определяется моделью, в зависимости от широты, на которой находятся метеорологическая станция или дендрохронологический тест-полигон [9, 12].

Далее на основе полученных данных по интегральной скорости роста вычисляются количество клеток, сформировавшихся за год, и их размеры.

В блоке, описывающем изменения в скорости роста камбиальной зоны, процесс дифференциации клеток моделируется для одного радиального файла с кинетической точки зрения.

Скорость образования новых клеток зависит от количества клеток в камбиальной зоне и скорости их деления. Каждая клетка в камбиальной зоне определяется двумя параметрами:

- положением в радиальном файле относительно начального значения j ;
- радиальным диаметром $D(j, t)$, в зависимости от положения j и момента времени t .

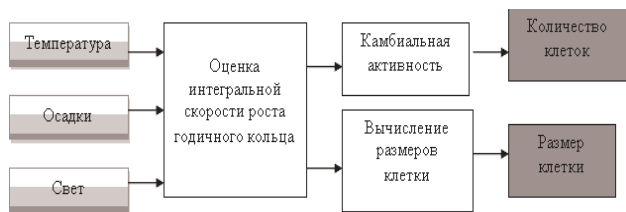


Рис. 1. Блок-схема модели.

Процесс деления в модели построен так, что диаметр клеток увеличивается постоянно, пока не достигнет критических размеров, что и приведет к делению. Обе дочерние клетки имеют равный радиальный диаметр после деления, который составляет половину от критического, и занимают соседние позиции: j , $j + 1$. Время между двумя последующими делениями зависит от скорости радиального роста клетки.

Алгоритм параметризации VS-модели. Данная версия VS-модели была создана на базе компьютерного языка Lazarus – свободной среды разработки программного обеспечения, разработанной для и при поддержке компилятора Free Pascal. Lazarus позволяет разработать кросс-платформенное приложение, таким образом, VS-модель можно использовать на компьютере независимо от установленной операционной системы (ОС), Windows или Linux; важна только версия. Так, для 32- или 64-битных ОС скомпилированы, соответственно, 32- и 64-битные версии VS-модели.

В качестве тестовой модели использовалась модель Шашкина (VS-model), написанная на языке Fortran 5 [12].

Для оптимальной работы модели в конкретных условиях местообитания древесных растений необходимо оценить следующие параметры: 25 параметров, отвечающих за интегральную скорость роста древесных колец, и 17 параметров – для определения камбиальной активности [9, 15, 17, 13, 14]. При этом часть из этих параметров являются наиболее информативными, т. е. небольшое изменение их значений приводило к существенным изменениям в моделируемой кривой прироста древесного растения. Попытка полной автоматической параметризации VS-модели была частично успешной [13].

Во-первых, авторы параметризации так и не решили проблему «скатывания» к локальным экстремумам для введенных ими многомерных целевых функций.

Во-вторых, блок модели, отвечающий за оценку влажности почвы, содержит дифференциальное уравнение первого порядка, которое при определенных начальных условиях имеет неустойчивое решение, что также отражалось на поведении целевых функций.

Для нового подхода к параметризации модели была реализована идея использования физического осциллографа. Напомним, осциллограф – прибор, предназначенный для исследования амплитудных и временных параметров электрических сигналов, подаваемых на дисплей. Обычно для моделирования электрического сигнала любой сложности эксперту в данной области достаточно несколько простых манипуляций. Было решено разработать виртуальный аналог данного физического прибора, предназначенного для моделирования древесно-кольцевых хронологий при помощи визуальной манипуляции значениями основных параметров VS-модели, позволяющей получать наилучшее приближение моделируемой кривой прироста.

Новый подход параметризации был назван VS-осциллографом. По аналогии с физическим прибором, VS-осциллограф состоит из двух основных блоков: блока управления и виртуального дисплея.

Блок управления содержит две вкладки, отвечающих за ввод исходных данных (рис. 2 а) и настройку параметров (рис. 2 б). Исходные данные, содержащие суточные значения температур и накопленных осадков, а также значения исходной древесно-кольцевой хронологии, вводятся по определенному формату, описанному в разделе «Help».

Виртуальный дисплей представляет собой новое Windows-окно с графиками: красный – построенный на начальных данных (исходная древесно-кольцевая хронология), загруженных из файла *.csv; синий – график, построенный на данных, смоделированных программой (рис. 3).

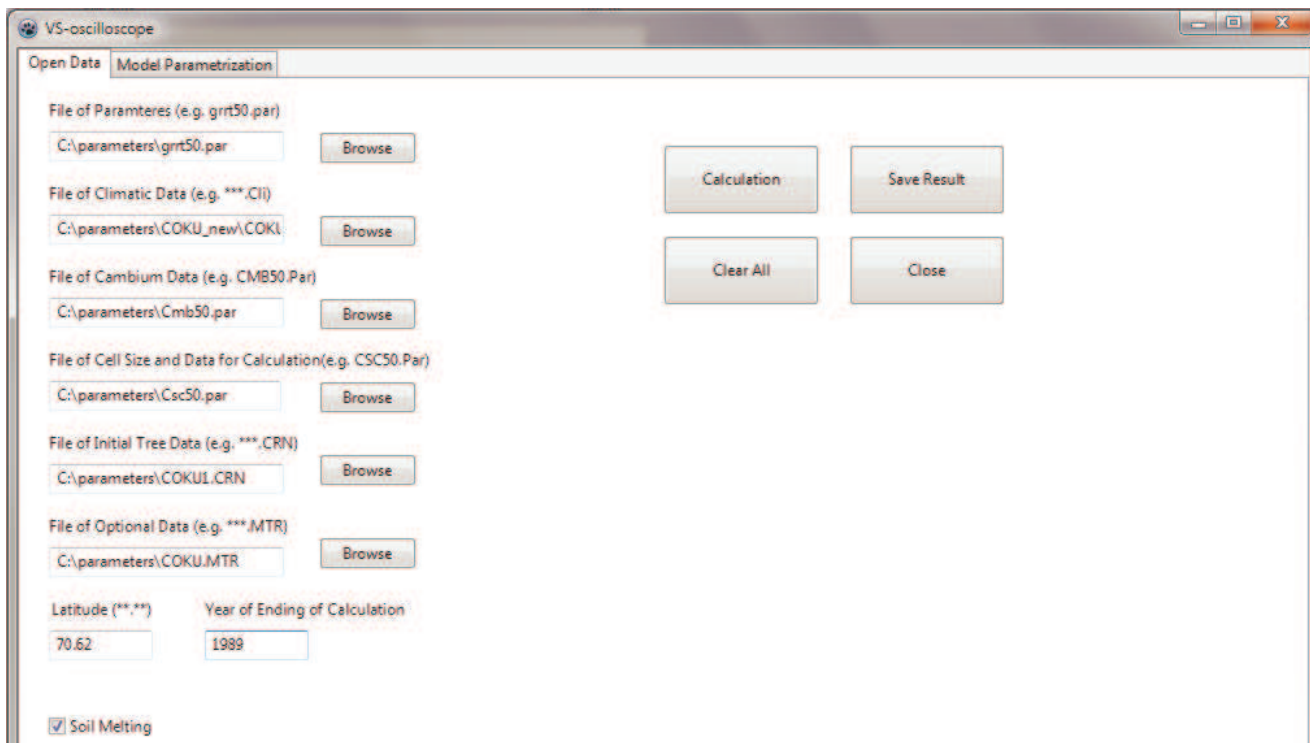


Рис. 2 а. Блок управления VS-осциллографа, вкладка «Данные».

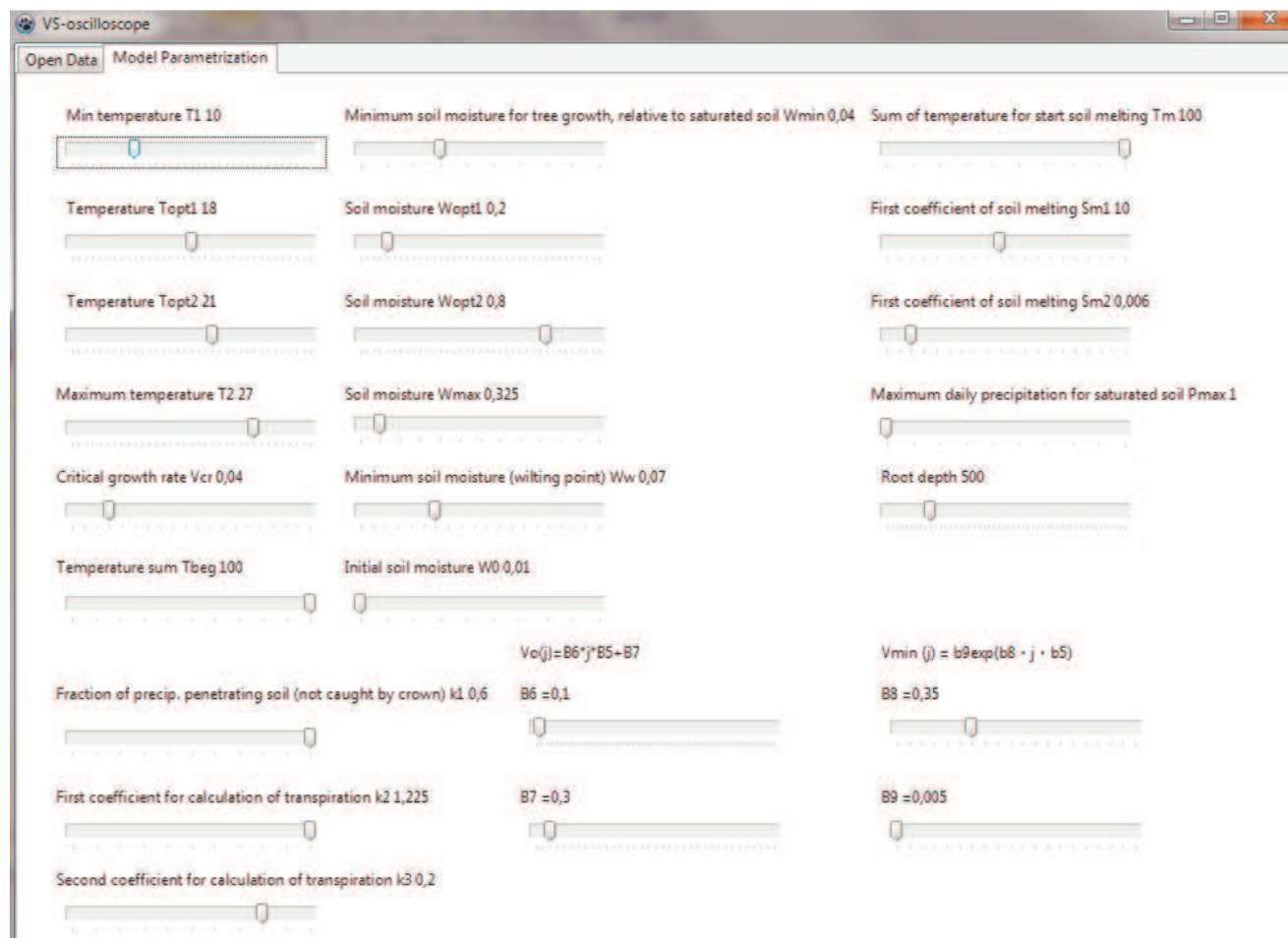


Рис. 2 б. Блок управления VS-осциллографа, вкладка «Настройка параметров».

После первого запуска программы индикатор значения (в дальнейшем «бегунок») шкалы для каждого параметра принимает значение, которое было у данного параметра в исходном файле параметров grt50.par. Так, например, если в данном файле параметр T1, отвечающий за минимальную температуру, при которой стартует рост годичного кольца, равен 5 °С, то соответствующий бегунок будет автоматически выставлен на шкале в значение 5. Простое изменение положения бегунка для анализируемого параметра приводит к пересчету моделируемой кривой роста с учетом нового значения параметра (рис. 2 б). При этом на виртуальном дисплее VS-осциллографа автоматически отображается новая моделируемая кривая роста, выделенная синим цветом, а предыдущая версия данной кривой отображается зеленым. Для новой оценки синхронности между исходной древесно-кольцевой хронологией и модельной кривой используется коэффициент корреляции Пирсона, который пересчитывается автоматически после изменения значений любого параметра (рис. 2 б). В случае, если параметры принимают недопустимые значения, например, если минимальная температура для роста оказывается больше, чем максимальная (т. е. не выполняется условие $T1 < T2 < T3 < T4$), то T2, T3, T4 присваиваются такие значения, чтобы выполнялось предыдущее неравенство; при этом бегунки занимают соответствующее место в блоке управления.

Для оптимизации (ускорения) пересчета модельных значений роста алгоритм VS-параметризации ожидает определенного электронного сигнала при выборе нового значения любого параметра модели для начала работы. Это делается левой клавишей манипулятора «Мышь». Если клавиша нажата, пользователь может выбрать любое значение интересующего параметра из диапазона (шкалы) допустимых значений. Пересчет не начнется, пока клавиша будет находиться в активном состоянии (т. е. не будет отжата). Такое тривиальное решение позволило увеличить скорость получения новых значений модельной кривой роста в 100 раз и дало возможность использовать программу VS-осциллограф на любом персональном компьютере 4-го поколения с операционными системами MS Windows или Linux.

Описание работы программы VS-осциллографа и ее апробация. На первом этапе пользователь загружает все необходимые данные: через кнопку Browse (Обзор) указываются путь и имя файла с основными 42 параметрами (grt50.par) в поле File of Parameters, в поле File of Cambium Data – путь и имя файла с данными, необходимыми для вычисления камбиальной активности (CAMB50.par), File of Cell Size and Data for Calculation – путь и имя файла с данными для вычисления размеров клетки (CSC50.PAR). В поле Latitude указывается широта выбранного дендроклиматологического участка в формате «градусы.минуты», например, 70° 62' с. ш. (широта для метеорологической станции вблизи Чокурдаха) будут заданы в модель как 72.60. First File of Climatic Data – вводятся путь и имя первого файла с климатическими данными за год «Name****.CLI" (****-год)», и именно с указанного года начинаются вычисления; Year of Ending of Calculation – год окончания расчетов. Например, если нужно произвести вычисления с 1975 по 1980 годы для

Чокурдаха, необходимо выбрать первым файлом СОКУ1975.CLI и в поле последнего года вычислений ввести 1980 (рис. 2 а).

После окончания работы модели полученные результаты сохраняются в новой папке Result, в поддиректории с основным файлом параметров.

За весь период расчетов формируется один файл (например, соку.dat), в котором в первой колонке указан год, во второй – смоделированный индекс прироста, в следующей приводится хронология для данного района (из файла *.CRN), далее индекс прироста, соответствующий данным измерений размеров трахеид (из файла *.mtr) (таблица 1).

Таблица 1

Интегральные результаты работы модели, сохраненные в файле соку.dat, на основе данных для п. Чокурдах, 1977 г.

Calculation from 1975 to 1980												
year	Indc	crn	Ntra	BG	EG	Bmt	Bsn	Nc1	Nc2	Nc3	Nc4	Nc5
1975	0.85	0.98	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1976	1.05	1.37	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1977	1.49	1.31	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1978	0.84	0.35	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1979	0.49	0.37	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1980	1.27	0.92	0.00	153	272	0	0	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 2

Результаты работы модели, сохраненные в файле СОКУ1977.dat, на основе данных для п. Чокурдах, 1977 г.

t	Tem	Prec	sm	Dep	snow	Gr	Grw	GrT	Tran
1	-31.19	14.00	0.09	500.00	7.90	0.00	0.33	0.00	0.00
2	-32.09	11.00	0.09	500.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00
3	-31.77	0.00	0.09	500.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00
167	8.33	41.00	0.25	500.00	0.00	0.53	1.00	0.53	0.27
168	9.29	0.00	0.31	500.00	0.00	0.63	1.00	0.63	0.38
169	10.89	37.00	0.31	500.00	0.00	0.79	1.00	0.79	0.64
170	12.48	0.00	0.35	500.00	0.00	0.95	1.00	0.95	1.01
218	5.84	0.00	0.35	500.00	0.00	0.23	1.00	0.28	0.08
219	6.47	0.00	0.35	500.00	0.00	0.27	1.00	0.35	0.10
220	6.46	1.00	0.35	500.00	0.00	0.27	1.00	0.35	0.10
221	6.53	52.00	0.35	500.00	0.00	0.27	1.00	0.35	0.10

Для каждого года формируются три файла с расширением *.dat, например, соку1977.dat, соку77c.dat и соку77s.dat. Первый файл содержит следующие результаты расчетов: первая колонка – время (t), следующие – температура T (°C), осадки P (мм), влажность почвы w (v/v, глубина оттаявшей почвы l (mm), величина снежного покрова (динамика не включена в данную версию программы), интегральная скорость роста Gr(t), скорость роста, в зависимости от температуры gT(t), скорость, в зависимости от влажности

почвы $gw(t)$, и величина суточной транспирации E (мм) (таблица 2).

Во втором файле приведена динамика камбиальной деятельности: в первом столбце – время t (дни), во втором и третьем – число клеток камбиальной зоны N_c и общее число клеток в годичном кольце N (таблица 3).

Таблица 3

*Результаты работы модели,
сохраненные в файле СОКУ1977с.dat*

T	N_c	N_r
1.00	2	0
153.00	2	0

Третий файл содержит информацию о размерах трахеид в годичном кольце: в первой колонке – номер клетки, во второй и третьей – радиальные размеры (мкм), измеренные и расчетные, соответственно (таблица 4).

Таблица 4

*Результаты работы модели,
сохраненные в файле СОКУ1977с.dat*

1	47.60	47.60
2	42.40	41.80

По завершению работы модель сохраняет все полученные результаты в отдельных файлах и выводит на экран коэффициент корреляции между средними размерами клеток, измеренных и вычисленных моделью (рис. 4), а также их графики (рис. 4).

Тестирование и апробация VS-осциллографа проводились для дендроклиматических данных, собранных в районе поселка Чокурдах (70° 37' с. ш., 147° 53' в. д.). Среднегодовое метеорологические условия данного местообитания характеризуются следующими данными: средняя годовая температура воздуха –14,3 °С, средняя температура самого теплого месяца (июля) составляет 9,5 °С, средняя температура самого холодного месяца (января) –34,6 °С. Среднее годовое количество осадков составляет 232 мм, из них большая часть (37 мм в июле) приходится на летний период.

Суточные метеорологические данные показывают тенденцию к зимнему потеплению. За период с 1965 по 1985 гг. средняя зимняя температура выросла с –36 до –33 °С.

Древесно-кольцевая хронология была получена осреднением 30 кросс-датированных образцов листовницы Гмелина. Способом стандартизации индивидуальных серий являлся 120-летний кубический сплайн интерполяции.

Весь период метеорологических наблюдений с 1960 по 1989 гг. был разбит на два независимых интервала. На периоде калибровки (1975-1989 гг.) при помощи VS-осциллографа были найдены оптимальные параметры имитационной модели Ваганова-Шашкина, обеспечивающие максимальную синхронность в динамике исходной древесно-кольцевой хронологии (ДКХ)

и кривой моделируемого прироста. Коэффициент корреляции между данными временными рядами является значимым ($p < 0.001$) и равен 0,77. Наиболее информативными параметрами модели для данного местообитания являлись: минимальная приземная температура воздуха для начала роста древесных растений $T1$ (9 °С); нижняя граница для оптимальной температуры роста $T2$ (14 °С); верхняя граница для оптимальной температуры роста $T3$ (15 °С); минимальная влажность почвы для начала роста древесных растений $W1$ (0,050 v/v); нижняя граница для оптимальной влажности почвы при росте древесных растений $W2$ (0,175 v/v); верхняя граница для оптимальной влажности почвы $W3$ (0,300 v/v).

Заключение. В литературе описаны преимущества VS-модели по сравнению со стандартными статистическими процедурами оценки отклика древесных растений на изменение ведущих климатических факторов [9, 12, 18, 14].

Во-первых, данная модель является реальной физиологической интерпретацией механизмов годичного прироста древесных растений, в зависимости от изменения климатических факторов окружающей среды. Каждый параметр данной модели имеет ясную физиологическую основу, обуславливающую определенный механизм взаимодействия внутренних и внешних компонент климатической системы и древесного организма. Моделируемая оценка динамики размеров клеток в течение сезона роста позволяет оценить динамику образования годичного кольца в различных условиях местообитания и тем самым лучше понять, как рост зависит от климата.

Во-вторых, способность VS-модели моделировать нелинейную реакцию роста деревьев на изменения климата. Даже частный пример п. Чокурдах, описанный в данной работе, показывает важную роль влажности почвы при формировании годичных колец деревьев. В сравнении с полученными модельными результатами, традиционный анализ функций отклика для того же местообитания выделяет только раннелетние температуры как ведущий климатический фактор, влияющий на прирост древесных растений.

В-третьих, VS-модель позволяет смоделировать прирост древесных растений в условиях различных природных катаклизмов, связанных, например, с резким повышением температуры, засухой или резким повышением количества осадков.

Несмотря на эти очевидные достоинства VS-модели, использование данной модели при анализе прироста древесных растений было существенно затруднено оценкой 42 параметров модели вручную. Эта проблема решена предложенным в данной работе новым алгоритмом визуальной параметризации, названной VS-осциллографом. Это реальный рабочий инструмент, позволяющий многократно сократить затраты рабочего времени, особенно при анализе приростов древесных растений на больших территориях. VS-осциллограф показал свою эффективность для условий, которые резко отличаются от северной границы распространения бореальных лесов, в частности, для горных областей Средиземноморья [14].

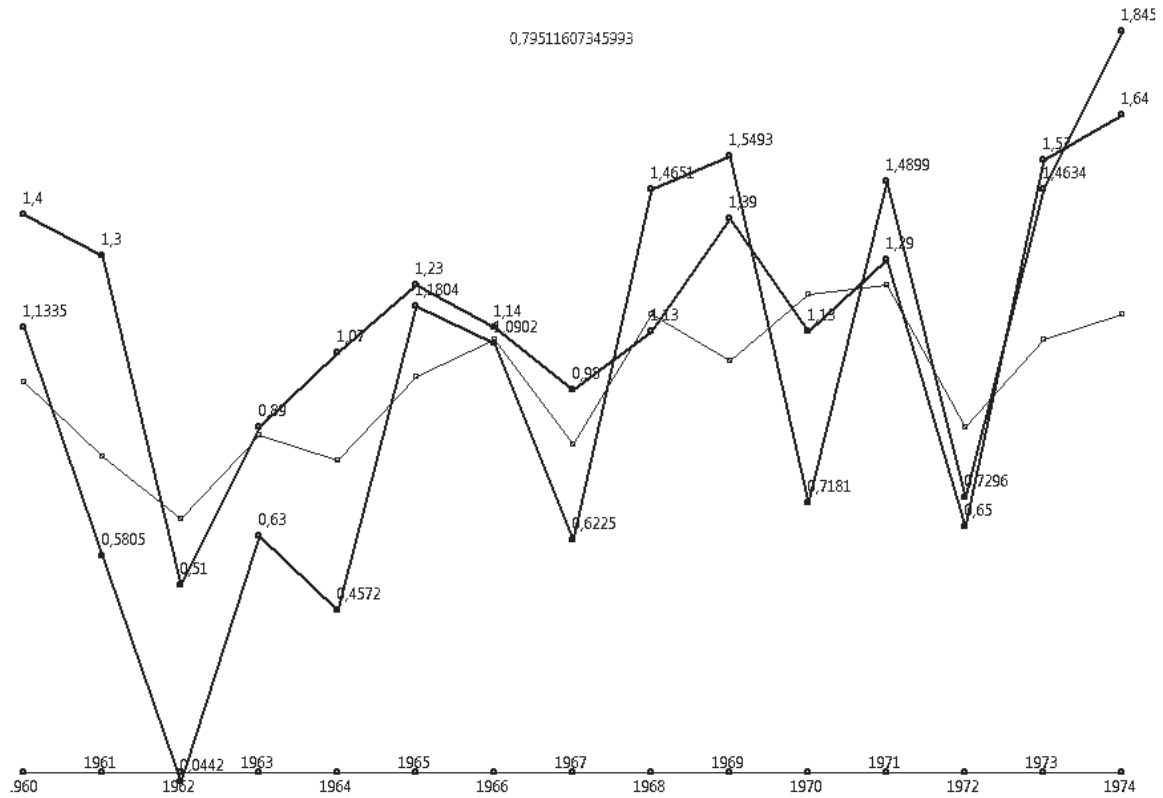


Рис. 3. Виртуальный дисплей VS-осциллографа с графиками исходной древесно-кольцевой хронологии и смоделированной кривой.

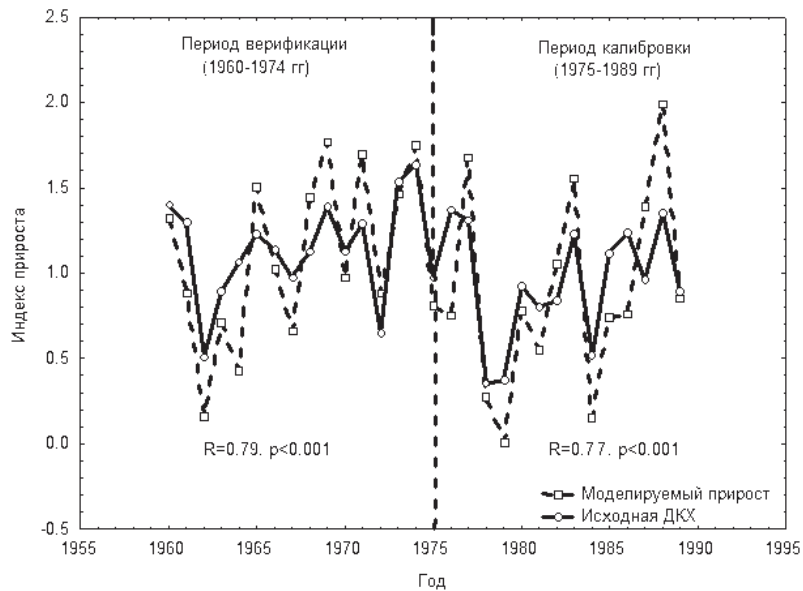


Рис. 4. Динамика исходной древесно-кольцевой хронологии (ДКХ) (сплошная линия) и моделируемого прироста (пунктирная линия) для двух периодов: 1) калибровки модели (1975-1989 гг.) (коэффициент корреляции между ДКХ и моделируемым приростом $R = 0,77$); 2) верификации (1960-1974 гг.) ($R = 0,79$).

Для улучшения работы VS-осциллографа необходимо провести многолетний эксперимент по наблюдениям за сезонным ростом годичных колец, позволяющий оценить естественную динамику формирования годичного кольца древесных растений в различных условиях местообитания. Данный эксперимент позволит лучше понять механизм формирования годичного

кольца (например, процесс дифференцирования клеток в течение сезона роста) в зависимости от значений климатических факторов, что позволит оптимизировать работу блоков VS-модели, отвечающих за камбиальную активность, и оценки размеров клетки, образовавшейся в течение определяемого сезона роста.

Литература

References

1. Hulme M., Jones P.D. Global climate change in the instrumental period // *Environmental Pollution*. 1994. Vol. 83. P. 23-36.
2. Jones P.D., Osborn T.J., Briffa K.R. The evolution of climate over the last // *Millennium*. Science. 2001. Vol. 292. P. 662-667.
3. Jones P.D. (2002) Greenhouse effect and climate data. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. London: Academic Press, 2002. Vol. 7. P. 87-106.
4. Thorne P.W. Probable causes of late twentieth century tropospheric temperature trends // *Climate Dyn.* 2003. Vol. 21. P. 573-591
5. Damon P.E., Peristykh A.N. Solar forcing of global temperature change since AD 1400 // *Climatic Change*. 2005. Vol. 68. P. 101-111
6. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Важность дендрохронологических и дендрогидрологических исследований в изучении глобальных и региональных проблем // *Сиб. экол. журн.* 1999. № 2. С. 68-74
7. Мазепа В.С. Погодичная реконструкция средней летней температуры воздуха на севере Западной Сибири с 1690 года на основе данных о радиальном приросте деревьев // *Там же*. № 2. С. 175-183
8. Хантемиров Р.М. Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет // *Там же*. С. 185-191
9. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовичных колец. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.
10. Мазепа В.С. Дендроклиматическая реконструкция летней температуры воздуха с 1690 года в Субарктических районах Сибири // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем: сб. науч. ст. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. Т. 17. С. 170-187.*
11. Шишов В.В., Наурызбаев М.М., Ваганов Е.А., Ивановский А.Б., Корец М.А. Анализ изменчивости радиального прироста древесных растений на территории севера Евразии в последние десятилетия // *Изв. РАН. 2007. Сер. Географическая 3. С. 49-59.*
12. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 343 p.
13. Ивановский А.Б., Шишов В.В. Алгоритм параметризации для модели Ваганова-Шашкина формирования годовичных колец древесных растений // *Вестн. СибГАУ*. 2010. Вып. 2(28). С. 83-88.
14. Touchan R. Process based model sheds light on climate sensitivity of Mediterranean tree-ring width // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9. P. 965-972.
15. Anchukaitis K. J., Evans M. N., Kaplan A., Vaganov E. A., Hughes M. K., Grissino-Mayer H. D., Cane M. A. Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent influence of summer drought // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, Issue # L04705, P. 1140-1144
16. Thornthwaite C.W., Mather J.R. The water balance. *Publications in climatology* // Drexel Institute of Technology. 1955. Vol. 1. P. 1-104
17. Evans M. N., Reichert K., Kaplan A., Anchukaitis K. J., Vaganov E. A., Hughes M. K., Cane M. A. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data // *Journal of geophysical research*. 2006. Vol. 111. P. 980-989.
18. Vaganov E.A., Anchukaitis K. J., Evans M. N. (2011) How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics. URL: <http://one.geol.umd.edu/www/preprints/vae06.pdf> (дата обращения: 12.09.2012).
1. Hulme M., Jones P.D. (1994) Global climate change in the instrumental period. *Environmental Pollution* 83: 23-36.
2. Jones P.D., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001) The evolution of climate over the last Millennium. *Science*, V. 292: 662-667.
3. Jones P.D. (2002) Greenhouse effect and climate data. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* V. 7. Academic Press, London, p. 87-106.
4. Thorne P.W. et al. (2003) Probable causes of late twentieth century tropospheric temperature trends. *Climate Dyn.* V. 21: 573-591
5. Damon P.E., Peristykh A.N. (2005) Solar forcing of global temperature change since AD 1400. *Climatic Change* 68: 101-111
6. Vaganov E.A. Shiyatov S.G. (1999) The importance of dendrohydrological and dendrochronological research in the study of global and regional issues. *Sib. Ecol. Journal*. 6. Number 2.
7. Mazepa V.S. (1999) Weather reconstruction of average summer temperatures in the north of Western Siberia in 1690, based on data of tree ring. *Sib. Ecol. journal* №3, p. 175-183
8. Hantemirov R.M. (1999) Tree-ring reconstruction of summer temperatures on north of West Siberia over last 3248 years. *Sib. Ecol. Journal*. 2: 185-191
9. Vaganov E.A., Shashkin A. V. (2000) Growth and structure of tree-rings. *Nauka, Novosibirsk*, 232 p.
10. Mazepa V.S. (2000) Dendroclimatic summer air temperature reconstruction from 1690 in the sub-Arctic regions of Siberia. *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*, V.17, *Gidrometeoizdat, StP*, P. 170-187
11. Shishov V.V. et al. (2007) Analysis of variability in radial increment of trees in northern Eurasia over the last decades. *Iaavestiya RAN. Seriya geographicheskaya* 3: P. 49-59
12. Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. (2005) *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 343 p
13. Ivanovskiy, Shishov (2010) Algorithm of parameterization for VS-Model of tree-rings. *Vestnik SibSAU*, vol. 2(28). *Izd. SibSAU, Krasnoyarsk*, P. 83-88.
14. R. Touchan et al. (2012) Process based model sheds light on climate sensitivity of Mediterranean tree-ring width, *Biogeosciences* 9: 965-972
15. Anchukaitis, K. J., Evans, M. N., Kaplan, A., Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Grissino-Mayer, H. D., and Cane, M. A. (2006) Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent influence of summer drought, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04705, doi:10.1029/2005GL025050.
16. Thornthwaite CW, Mather JR (1955) The water balance. *Publications in climatology*, vol. 1. Drexel Institute of Technology, Philadelphia, p 1-104
17. Evans M. N., Reichert K., Kaplan A., Anchukaitis K. J., Vaganov E. A., Hughes M. K., Cane M. A. (2006) A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. // *Journal of geophysical research*, V.111.
18. Vaganov E.A., Anchukaitis K. J., Evans M. N. (2011) How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics. - <http://one.geol.umd.edu/www/preprints/vae06.pdf>