

УДК 551.583.4

Оценка смещений в RCS-хронологиях древесных колец

В.В. Мацковский*

*Институт географии Российской академии наук,
Россия 119017, Москва, Старомонетный переулок, 29¹*

Received 2.12.2011, received in revised form 9.12.2011, accepted 16.12.2011

Проводится сравнение RCS- и signal-free RCS- хронологий на нескольких примерах с реальными и модельными измерениями ширины годичных колец деревьев. Модельные измерения, содержащие известный климатический сигнал, строятся на основе реальных с сохранением структуры набора данных. Во всех экспериментах на модельных данных signal-free RCS превосходит обычный RCS. Но в то же время он менее устойчив к сокращению числа серий измерений. Предлагается метод оценки и корректировки возможных смещений в RCS-хронологиях древесных колец, связанных со структурой набора данных (длина и особенности индивидуальных серий, распределение данных во времени). Такая корректировка может проводиться перед построением реконструкций с применением стандартизации региональной кривой (RCS) и ее «очищенной от сигнала» модификации (signal-free RCS) для повышения точности этих реконструкций.

Ключевые слова: дендрохронология, дендроклиматология, годичные кольца деревьев, стандартизация, региональная кривая, signal-free подход, долгопериодные колебания, климат.

Введение

В дендроклиматологии потребность разделять внешнее климатическое влияние на прирост деревьев и естественную внутреннюю изменчивость, присутствующую в дендрохронологических измерениях, привела к созданию специфических методов, названных стандартизацией (Fritts, 1976). Оставляя без внимания такие приложения дендрохро-

ронологического метода, как исследование индивидуальных особенностей деревьев и экологических особенностей местообитания, в дальнейшем сосредоточим наше внимание на дендроклиматическом аспекте. Проблема стандартизации дендрохронологических данных является одной из ключевых и актуальных проблем в современной дендроклиматологии. Особенно интенсивно обсуждается

* Corresponding author E-mail address: matskovsky@igras.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

возможность использования дендрохронологических данных для восстановления долгопериодной климатической изменчивости (Esper et al., 2003; Bunn et al., 2004; Jansen et al., 2007; Jones et al., 2009).

Изменение подхода к стандартизации в дендроклиматологии можно проследить по изменению определения этого понятия в литературе. В 1990 г. Э. Кук и Л. Кайрюкштис дали такое определение: стандартизация – это процесс, посредством которого серии измерений годовых колец преобразуются в серии индексов хронологии, представляющие амплитуду годовых изменений «общих» факторов, влияющих на рост деревьев (Cook, Kairiukstis, 1990). Через 14 лет Т. Мелвин в своей диссертации определяет это понятие так: стандартизация – совокупность дендроклиматических методов, используемых как для удаления шума из серий измерений, так и для построения хронологий, отражающих общую изменчивость роста деревьев на максимально длительных периодах (Melvin, 2004). Интересно, что за это время возникло понимание ограничений «детерминистских» методов стандартизации по восстановлению долгопериодной изменчивости, поэтому вместо «годовых изменений» появляется «изменчивость на максимально длительных периодах».

Начиная со статьи К. Бриффы с соавторами (Briffa et al., 1992) и по настоящее время внимание дендроклиматологов все больше акцентируется на сохранении долгопериодного климатического сигнала в древесно-кольцевых хронологиях. Одним из толчков к этому стал повышенный интерес научного сообщества и общественности к проблеме современного потепления и его соотношения с климатическими изменениями в прошлом. Без сохранения долгопериодных колебаний в древесно-кольцевых хронологи-

ях невозможно, например, оценить, были ли температуры во время средневекового оптимума выше или ниже, чем сейчас.

Довольно давно возникло понимание того, что «детерминистские» или «классические» методы стандартизации (основанные на подборе индивидуальной кривой роста к каждой серии измерений) не позволяют сохранять в хронологиях низкочастотный климатический сигнал, а именно такие колебания, период которых больше длины индивидуальных серий дендрохронологических измерений (Cook et al., 1995). Альтернативой детерминистским методам стандартизации является стандартизация региональной кривой (Regional Curve Standardization (RCS); Becker, 1989; Briffa et al., 1992; Briffa et al., 1996; Esper et al., 2003; Briffa, Melvin, 2010). Этот подход призван сохранить долгопериодные климатические колебания, выраженные в изменении средней ширины колец во времени. Он основан на предположении о том, что деревья в одном регионе имеют некоторую стандартную кривую роста (единую для ныне живущих деревьев и деревьев, росших на той же территории в прошлом). Для определения этой кривой все серии измерений упорядочиваются по камбиальному возрасту и вычисляется средняя величина прироста для каждого возраста. Затем эта кривая аппроксимируется некоторой сглаживающей функцией (Briffa et al., 1992; Esper et al., 2003; Melvin et al. 2007) и используется для стандартизации всех серий измерений. Предполагается, что из-за распределения дат начала и конца роста деревьев во времени климатический сигнал не повлияет на итоговую среднюю кривую роста деревьев. В последние десятилетия множество дендроклиматических исследований использовали стандартизацию региональной кривой (RCS) для исследования долгопериодных климатических колебаний на основе длинных и су-

пердлинных древесно-кольцевых хронологий (Cook et al., 2000; Grudd et al., 2002; Helama et al., 2002; Naurzbaev et al., 2002; Büntgen et al., 2005; D'Arrigo et al., 2005; Linderholm, Gunnarson, 2005; Luckman, Wilson, 2005; Wilson et al., 2005).

На практике предположение о том, что климатический сигнал не влияет на итоговую возрастную кривую, может нарушаться. К. Бриффа и Т. Мелвин (Briffa, Melvin, 2010) обсуждают возможные отклонения итоговой хронологии, полученной методом RCS, из-за частных случаев нарушения этого предположения, таких как наличие постоянного тренда в климатическом сигнале или присутствие в выборке образцов только из живых деревьев. Например, если в выборке имеются только живые деревья, то невозможно разделить влияние двух факторов: уменьшения прироста с возрастом и увеличения его при улучшении условий обитания. Если же в выборке дополнительно присутствуют субфоссильные образцы, существовавшие при других условиях, то влияние этих условий нивелируется и можно будет выделить зависимость прироста от возраста растения. Особенно сильно эти отклонения могут проявляться на концах хронологии. Как частичное решение этой проблемы они предлагают «очищенный от сигнала» (signal-free) метод построения RCS-хронологии (далее sfRCS), объединяющий идею региональной кривой и ранее предложенную ими же идею «очищенной от сигнала» стандартизации (Melvin, Briffa, 2008). Идея метода состоит в постепенном очищении исходных измерений от общего (климатического) сигнала посредством деления их на полученную хронологию (за несколько итераций) и получении региональной кривой роста, не нарушенной климатом.

Помимо Т. Мелвина и К. Бриффы (Melvin, Briffa, 2008), описывающих идею «очищенной

от сигнала» стандартизации и исследующих этот метод на примере реальных и модельных данных, автору известны только две работы, использующие эту концепцию. В одной из них (Porter, Pisaric, 2011) для создания индексированных древесно-кольцевых хронологий используется бета-версия программы ARSTAN, включающая опцию «очищенной от сигнала» стандартизации. Во второй (Helama et al., 2010) делаются реконструкции температур на основе ширины годичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и годичного прироста раковины жемчужницы речной (*Margaritifera margaritifera* L.), причем сравниваются обычная и «очищенная от сигнала» стандартизация региональной кривой. Последняя статья, в сущности, является единственным известным нам примером применения и сравнительного исследования методики sfRCS.

Целью данной работы стало более полное исследование методики «очищенной от сигнала» стандартизации региональной кривой на примере нескольких наборов реальных и модельных данных.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использованы четыре набора измерений ширины годичных колец деревьев из различных регионов: Северной Швеции (Торнетреск), Полярного Урала, Вологодской области и Соловецких островов (табл. 1). Первые два набора, обработанные Швайнгрубером с соавторами (Schweingruber et al., 1988; Schweingruber, Briffa, 1996), были получены из Международного банка древесно-кольцевых данных (ITRDB), а два других созданы в лаборатории дендрохронологии Института географии РАН (Соломина и др., 2011). Разные наборы данных показывают различную наполненность образцами во времени, различную среднюю

Таблица 1. Характеристики использованных древесно-кольцевых хронологий

Регион	Автор	Координаты	Число серий	Период, годы	Средняя длина серии	Средняя чувствительность	Коэффициент межсерийной корреляции
Торнетреск	Ф. Швайнг-рубер	68°14'' с.ш. 19°40'' в.д.	65	441-1980	290	0,233	0,620
Соловки	О.Н. Соломина	65°07' с.ш. 35°41'' в.д.	102	1189-2008	245	0,224	0,557
Вологодская область	В.В. Мацковский	59°52'' с.ш. 38°23'' в.д.	164	1085-2009	134	0,210	0,497
Полярный Урал	Ф. Швайнг-рубер	66°52'' с.ш. 65°38'' в.д.	91	914-1990	163	0,390	0,701

чувствительность и межсерийный коэффициент корреляции (табл. 1), а также имеют разный климатический сигнал. Это позволяет исследовать метод sfRCS в условиях различных исходных данных.

Метод стандартизации региональной кривой роста RCS (Briffa et al., 1992) реализован с использованием деления для получения индексированной хронологии. В качестве функции для аппроксимации региональной кривой применяется кубический сплайн с 50 %-ным сокращением дисперсии сигнала на 66,7 % максимального возраста деревьев, использованных для построения региональной кривой (Cook, Peters, 1981). Для построения sfRCS-хронологии каждая серия исходных измерений ширины годичных колец делится на соответствующие индексы обычной RCS-хронологии для получения «очищенных от сигнала» (signal-free) измерений. Здесь и далее под «очищенными от сигнала» измерениями подразумеваются серии ширины годичных колец деревьев, из которых удален климатический сигнал. Эти преобразованные измерения используются для построения новой RCS-хронологии, после чего новые измерения опять делятся на нее. Этот процесс проходит несколько итераций (Melvin, Briffa, 2008), после чего итоговые «очищенные от сигнала»

измерения используются для построения региональной кривой роста, не затронутой климатическим (общим) сигналом. Технически дальнейший процесс соответствует обычному методу RCS, описанному выше. На рис. 1 показан пример изменения региональной кривой при последовательных итерациях метода sfRCS на данных по Соловкам. Видно, что первая региональная кривая довольно сильно отличается от итоговой, однако после 4-й итерации различия практически незаметны.

При выборе методики моделирования данных нам было необходимо решить две задачи. Во-первых, мы хотели получить модельные измерения с известным климатическим сигналом для сравнения индексированных хронологий, полученных разными методами, с этим сигналом. Во-вторых, нужно было сохранить структуру исходного набора данных для того, чтобы оценить влияние этой структуры на отклонения индексированных хронологий от модельного климатического сигнала. Здесь и далее под структурой набора данных подразумевается совокупность характеристик составляющих его индивидуальных серий измерений ширины годичных колец: длина этих серий, годы их начала и окончания, число серий для каждого года. Безусловно, структура набора данных влия-

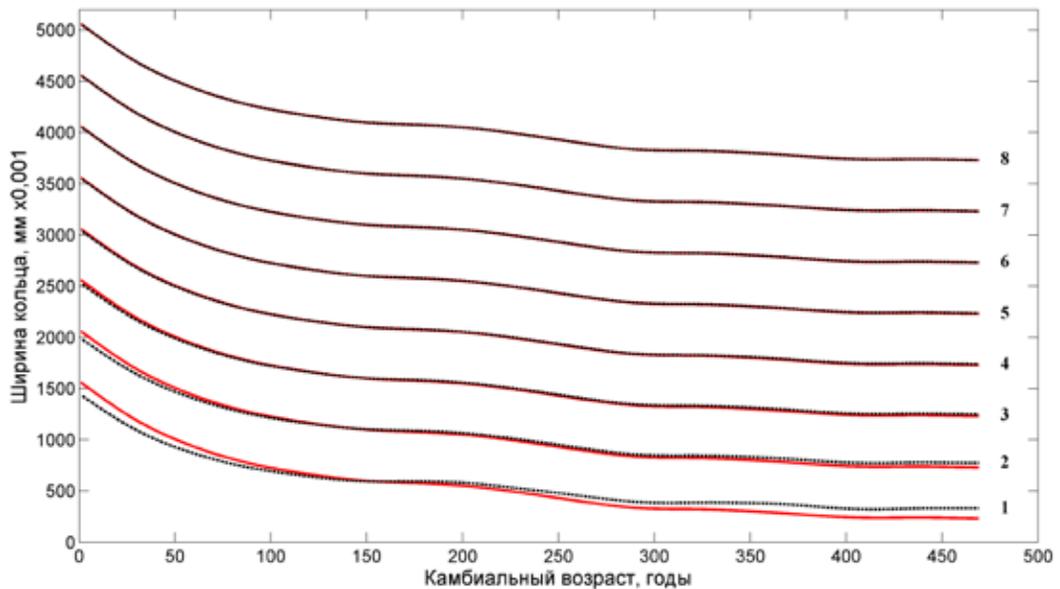


Рис. 1. Процесс схождения региональной кривой к итоговой во время итераций метода sfRCS на наборе данных по Соловкам. Черным пунктиром показана итоговая региональная кривая, красной сплошной линией – региональная кривая на каждой итерации. Справа указан номер итерации. Для наглядности значения для каждой следующей итерации увеличены на 0,5 мм

ет на итоговую хронологию. Выше уже было сказано, как может повлиять наличие образцов только из живых деревьев. Но важно не только присутствие субфоссильных образцов, но и соотношение их числа с числом образцов из живых деревьев, а также равномерность распределения годичных колец определенного камбиального возраста по различным климатическим эпохам. Понятно, что достичь абсолютно равномерного распределения в реальных условиях невозможно, не говоря уже о том, что климатические условия прошлого *a priori* не известны. Поэтому в каждом случае необходимо индивидуально оценивать, как структура набора данных может повлиять на итоговую хронологию.

Методика моделирования данных, описанная А. Бунном и соавторами (Bunn et al, 2004), не позволяет сохранять структуру исходного набора данных, так как там распределение образцов во времени генерируется случайным образом. При использовании же

исходной выборки для генерации модельных данных необходимо исключить влияние реального климатического сигнала на моделируемую выборку. Поэтому для моделирования данных с известным климатическим сигналом нами использовалась следующая методика. Вначале, как на первом этапе построения sfRCS-хронологии, исходные данные измерений преобразовывались в серии «очищенных от сигнала» измерений. Затем эти серии сглаживались кубическим сплайном с 50 %-ным сокращением дисперсии сигнала на 66,7 % возраста каждого дерева (Cook, Peters, 1981). Наконец, в каждую серию посредством перемножения значений, добавлялся «известный» климатический сигнал. Каждое значение сглаженной серии умножалось на «климатическое» значение в соответствующий календарный год. Таким образом, мы получали набор данных, содержащий заранее известный климатический сигнал, и при этом сохраняли структуру исходного набора данных (без вы-

сокочастотной составляющей). Использовали четыре типа модельного климатического сигнала. Первый (представленный на рис. 2–5 *в*) является прямой с положительным уклоном с минимальным значением 1 и с максимальным значением 2. Второй (рис. 2–5 *з*) – постоянный сигнал со значением 1, в последние 300 лет скачком меняющийся на значение 2. Третий (рис. 2–5 *д*) – постоянный сигнал со значением 1, в интервале 500–200 лет до настоящего времени имеющий значение 2. Последний тип модельного сигнала (рис. 2–5 *е*) соответствует sfRCS-хронологии, построенной по исходному набору древесно-кольцевых данных.

Второй нашей задачей была оценка устойчивости двух методов стандартизации к сокращению объема древесно-кольцевых данных. Для ее решения использовалась следующая методика. Из всего набора исходных данных случайным образом выбирали 50 % серий измерений, и по ним строили RCS- и sfRCS-хронологии. Эта процедура повторялась 1000 раз, затем подсчитывались средние RCS- и sfRCS-хронологии, а также 2,5 и 97,5 процентиля для оценки разброса. Этот разброс, а также среднее отклонение средней хронологии для 50 % набора данных от хронологии, построенной по всему набору данных, служили характеристиками для оценки устойчивости двух методов к сокращению выборки.

Результаты и обсуждение

На рис. 2–5, а также в табл. 2 и 3 представлены результаты экспериментов по сравнению двух методов стандартизации: RCS и sfRCS. Рис. 2–5*а* показывают RCS- и sfRCS-хронологии, построенные по исходным данным. На них можно оценить, насколько итоговая хронология изменяется в зависимости от метода стандартизации. На рис. 2–5 *в-е* показано, насколько хорошо хронологии, постро-

енные разными методами, восстанавливают модельный климатический сигнал (показан красным). На этих же рисунках видно, как изменяются отклонения от модельного сигнала в зависимости от самого сигнала. В табл. 3 данные рис. 2–5 *в-е* усреднены, что позволяет количественно сравнить средние отклонения хронологий от модельного сигнала и оценить преимущества одного метода над другим. На рис. 2–5 *ж* и *з* подытожены данные с рис. 2–5 *в-е*. На них приведены отклонения от модельного сигнала для всех четырех случаев для методов RCS *ж* и sfRCS *з*. На всех четырех рисунках видно, что изменчивость отклонений меньше для sfRCS-метода, т.е. при использовании метода sfRCS сам климатический сигнал меньше влияет на отклонения хронологии, чем при использовании метода RCS. Рис. 2–5 *и* показывают разницу между 2,5 и 97,5 процентилями 1000 хронологий, построенных по 50 % данных, для методов RCS и sfRCS. Это мера разброса, т.е. рисунки, показывают, насколько устойчивей один метод по сравнению с другим при уменьшении объема данных. Чем меньше разброс, тем устойчивей метод. На рис. 2–5 *к* показано, насколько отличается средняя хронология, построенная по 50 % данных, от хронологии, построенной для всех данных. Чем меньше разница (по абсолютной величине), тем устойчивей метод. В табл. 2 данные рис. 2–5 *и, к* усреднены, что позволяет количественно оценить преимущества одного метода над другим.

Известно, что методика стандартизации с помощью региональной кривой RCS достаточно чувствительна как к общему количеству индивидуальных серий измерений в наборе данных, так и к количеству годичных колец, покрывающих каждый год хронологии. Я. Эспер с соавторами (Esper et al., 2003) на примере хронологии с о. Готланд показали, что требуется не менее 40 индивидуаль-

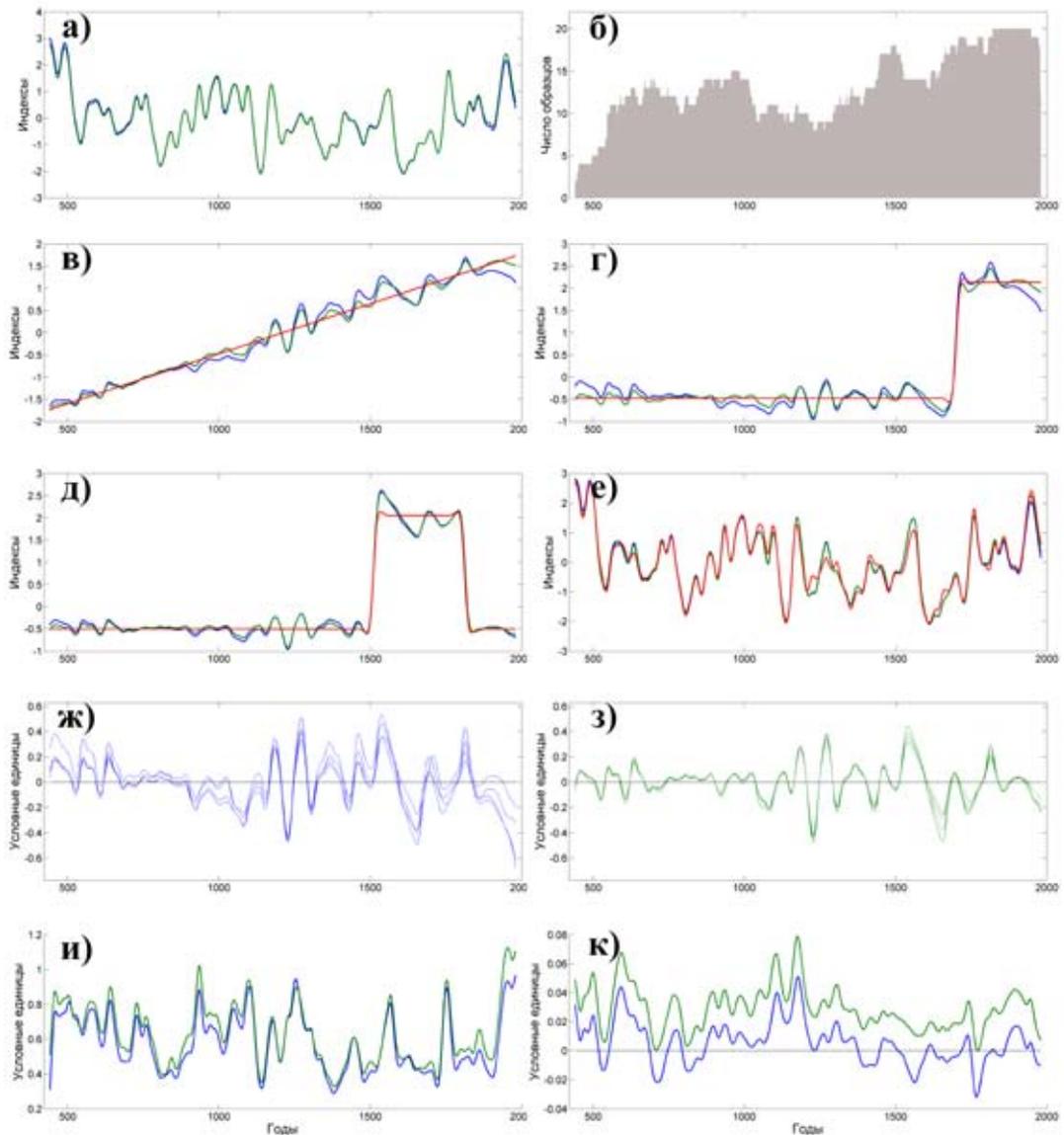


Рис. 2. Результаты сравнения двух методов стандартизации древесно-кольцевых хронологий (RCS и sfRCS) по данным хронологии Торнетреск. На всех панелях (кроме б) данные для наглядности сглажены 45-летним сплайном. На панелях а, в-е данные нормированы а – RCS-хронология (синий) и sfRCS-хронология (зеленый), построенные по исходным данным; б – распределение числа образцов во времени; в-е – RCS-хронология (синий) и sfRCS хронология (зеленый), построенные по модельным данным с известным климатическим сигналом (красный); ж – отклонения RCS-хронологий от модельного климатического сигнала, суммарный рисунок по экспериментам в)-е); з – отклонения sfRCS-хронологий от модельного климатического сигнала, суммарный рисунок по экспериментам в)-е); и – разница между 2,5 и 97,5 перцентилями 1000 хронологий, построенных по 50 % данных, для методов RCS (синий) и sfRCS (зеленый); к) – разница между хронологией, построенной по 100 % данных, и средней хронологией, построенной по 50 % данных, для методов RCS (синий) и sfRCS (зеленый)

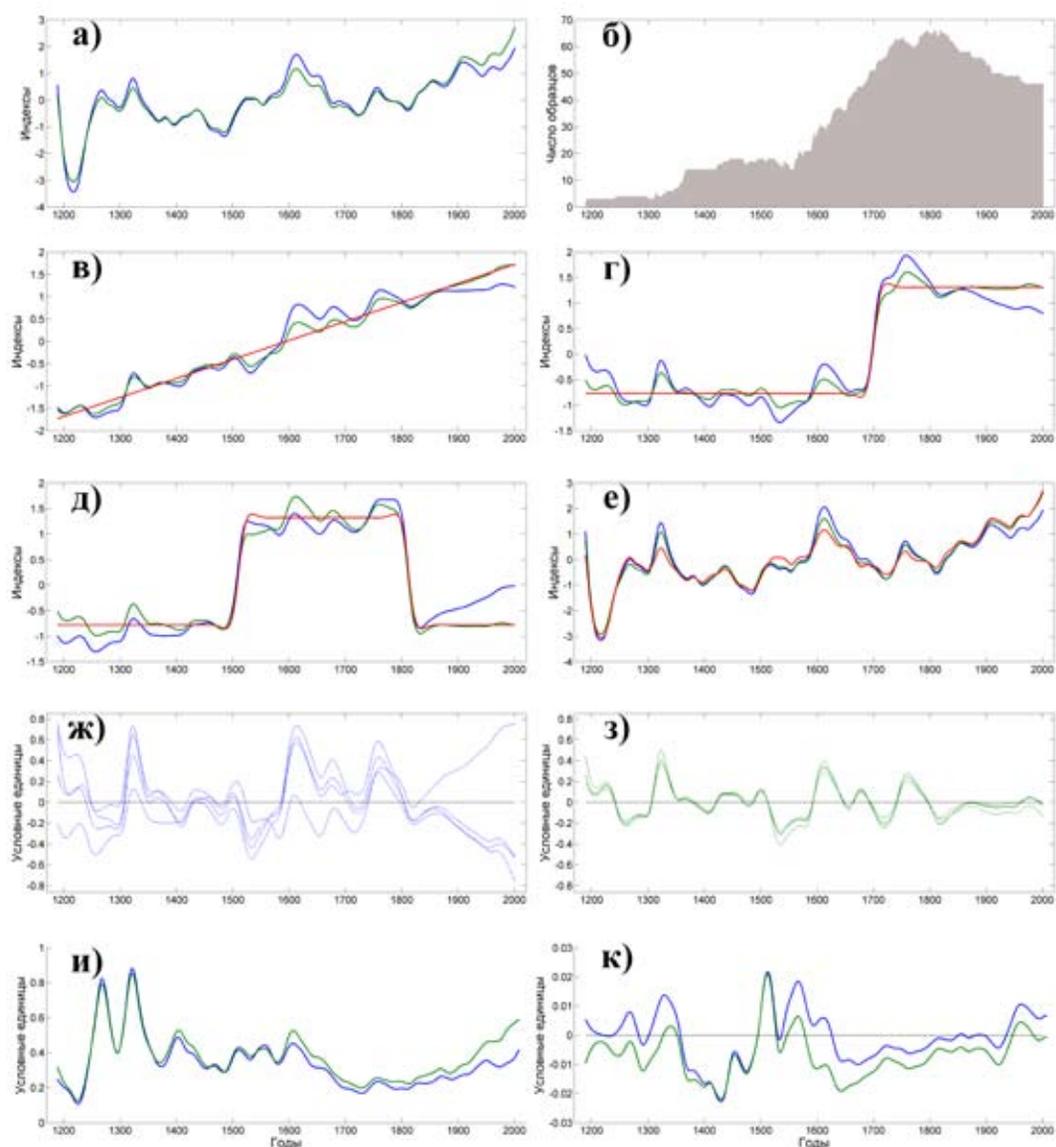


Рис. 3. Результаты сравнения двух методов стандартизации (RCS и sfRCS) по данным хронологии Соловки. Пункты *a-k* как на рис. 2

ных серий измерений для применения метода RCS и не менее 5 серий, покрывающих каждый период. Результаты, представленные на рис. 2–5 *и, к* и в табл. 2, показывают, что метод sfRCS менее устойчив к уменьшению количества древесно-кольцевых данных, чем обычный RCS. Из четырех наборов данных только на одном у sfRCS размах между 2,5 и 97,5 процентилями незначительно меньше,

чем у RCS. То же относится к средней разнице между средней хронологией, построенной по 50 % данных и хронологией на основе всего набора данных, только теперь лишь на одном наборе данных sfRCS показывает меньшее значение (лучший результат). Таким образом, мы приходим к выводу, что при ограниченном объеме древесно-кольцевых данных методом sfRCS нужно пользоваться

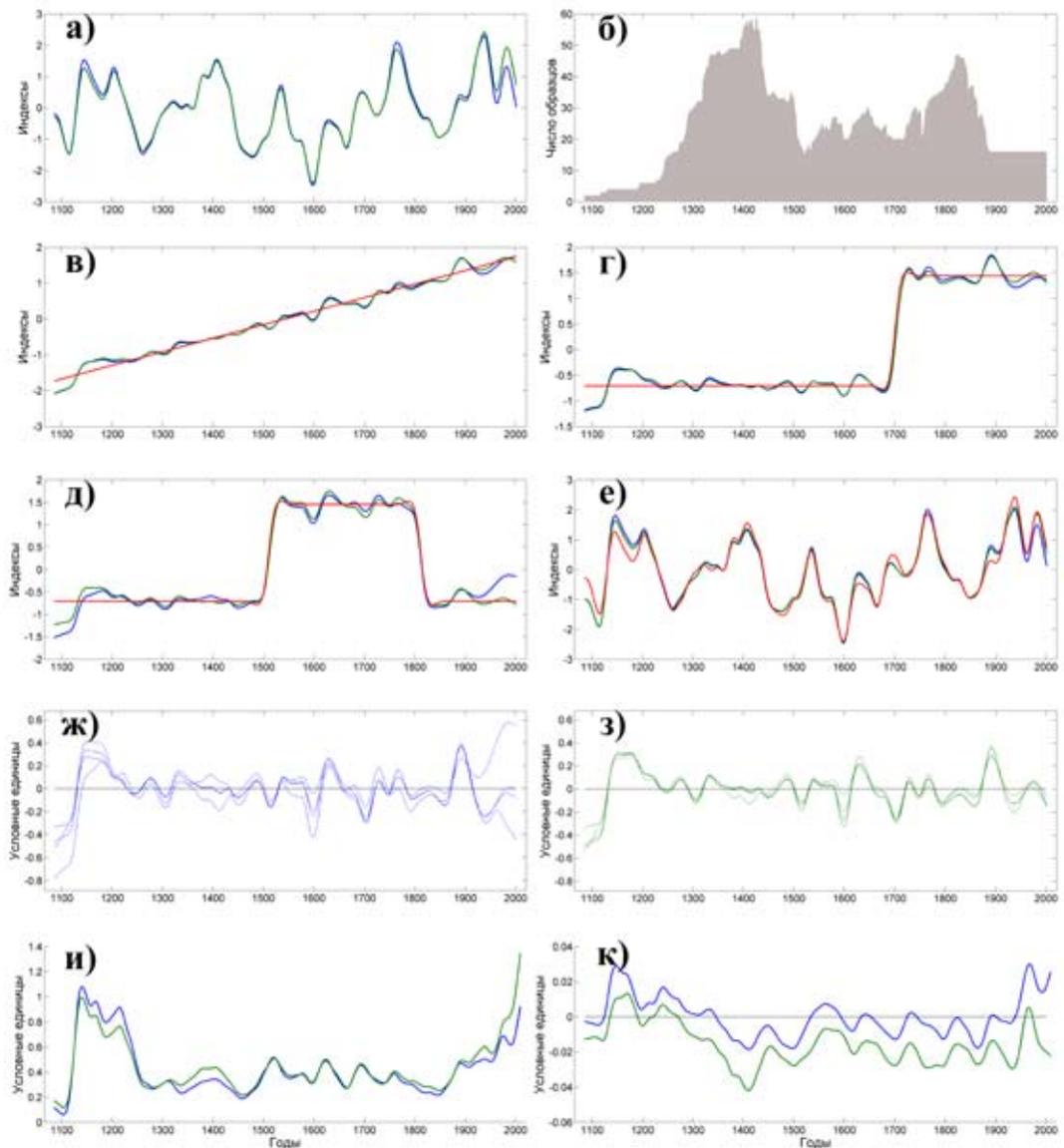


Рис. 4. Результаты сравнения двух методов стандартизации (RCS и sfRCS) по данным хронологии Вологда. Пункты а-к как на рис. 2

с еще большей осторожностью, чем обычным RCS.

Результаты С. Хеламы и соавторов по сравнению обычного RCS и sfRCS (Helama et al., 2010) показали, что sfRCS-хронологии превосходят обычные RCS-хронологии по таким параметрам, как: средний межсерийный коэффициент корреляции, корреляции между хронологиями, полученными

по двум различным косвенным источникам климатической информации (ширина колец сосны обыкновенной и годичный прирост раковины жемчужницы речной), корреляции хронологий со среднемесячными метеопараметрами. В результате авторы используют именно sfRCS-хронологии для обобщенной реконструкции температуры. Но эти результаты не могут считаться исчерпываю-

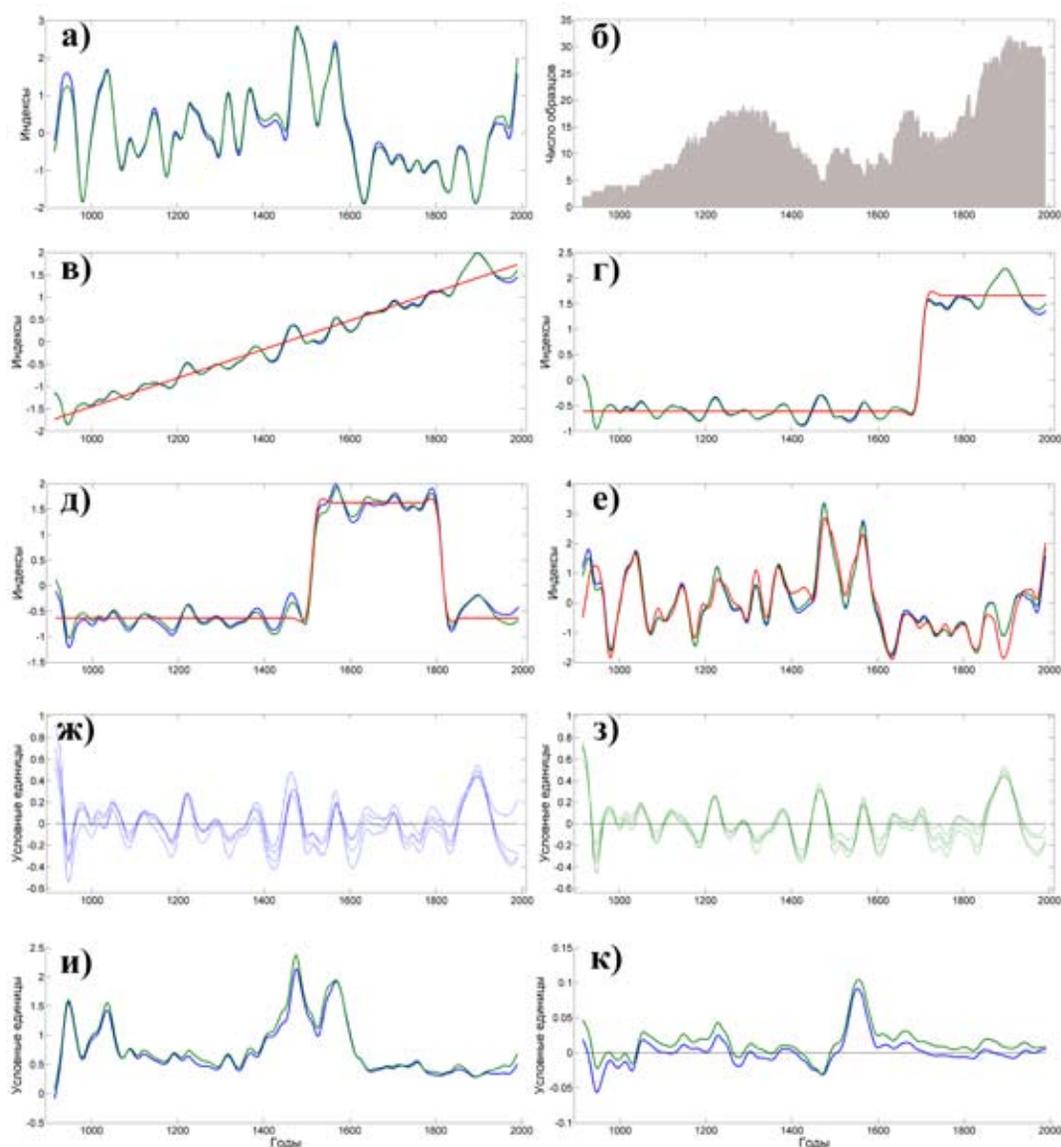


Рис. 5. Результаты сравнения двух методов стандартизации (RCS и sfRCS) по данным хронологии Полярный Урал. Пункты а-к как на рис. 2

щими по нескольким причинам. Во-первых, древесно-кольцевые данные, использованные в работе (Helama et al., 2010), получены только из живых деревьев. Такая структура набора данных может служить источником смещений в RCS-хронологиях (Melvin, 2004; Briffa, Melvin, 2010), поэтому, наряду с сериями из живых деревьев, рекомендуется использовать серии из деревьев с различными

датами смерти (Briffa et al., 1996). Во-вторых, в работе (Helama et al., 2010) используется только пять серий годичного прироста раковин жемчужницы речной (подробнее в Helama et al., 2009), хотя и полученных как из современных (умерших в год отбора), так и из субфоссильных организмов. Как уже упоминалось, для применения метода RCS (и, как показано, тем более sfRCS) желательно

Таблица 2. Сравнение методов RCS и sfRCS на устойчивость при уменьшении объема выборки. Жирным шрифтом отмечены лучшие результаты. Все значения в условных единицах

Регион	Средний размах между 2,5 и 97,5 перцентилями для хронологий по 50 % образцов		Средняя разница между средней хронологией для 50 % и 100 % образцов	
	RCS	sfRCS	RCS	sfRCS
Торнетреск	0,5846	0,6400	0,0069	0,0172
Соловки	0,3391	0,3737	0,0052	0,0049
Вологодская область	0,3409	0,3407	0,0045	0,0108
Полярный Урал	0,7277	0,788	0,0082	0,0274

Таблица 3. Среднее отклонение RCS- и sfRCS-хронологий от модельного климатического сигнала. Жирным шрифтом отмечены лучшие результаты. Все значения в условных единицах

Регион	Возрастающий линейный тренд (рис. 2–5в)		Константа с увеличением в течение 300 лет (конец) (рис. 2–5з)		Константа с увеличением в течение 300 лет (середина) (рис. 2–5д)		Климат соответствует sfRCS хронологии (рис. 2–5 е)	
	RCS	sfRCS	RCS	sfRCS	RCS	sfRCS	RCS	sfRCS
Торнетреск	0,1777	0,127	0,1641	0,0948	0,1287	0,1212	0,1306	0,1172
Соловки	0,2313	0,1412	0,2452	0,1067	0,2404	0,1293	0,2206	0,1433
Вологодская область	0,135	0,1285	0,1146	0,1076	0,1419	0,1221	0,15	0,126
Полярный Урал	0,1906	0,2002	0,1418	0,1375	0,2083	0,1845	0,2087	0,1987

иметь не менее 40 индивидуальных серий, иначе результирующая хронология может испытывать значительные смещения.

В нашем исследовании произведено сравнение двух методов на более подходящих для этого наборах данных. Результаты, представленные в табл. 3, показывают явное превосходство метода sfRCS над обычным RCS для всех исследованных наборов модельных данных. Во всех случаях отклонение sfRCS-хронологии от модельного климатического сигнала в среднем меньше, чем у RCS-хронологии. Это позволяет считать метод sfRCS более предпочтительным для построения хронологий на наборах данных с достаточным количеством образцов.

Проведенный анализ позволяет сделать и другие интересные выводы. Так результаты, представленные на рис. 2–5 в, г, д и е, показывают, что отклонение хронологии от модельного сигнала связано не только с самой структурой данных (длина и особенно индивидуальные серии, распределение данных во времени), но и с климатическим сигналом. По одним и тем же исходным данным, в которые затем добавлен различный климатический сигнал, получаются хронологии, имеющие разные по амплитуде и даже знаку отклонения от модельного климатического сигнала. Например, на рис. 3 з отклонения RCS-хронологии в 1900-е гг. отрицательные, а на рис. 3 д – положительные.

Для sfRCS-хронологий такие изменения заметны гораздо меньше, что демонстрируют рис. 2–5 ж и з. Особенно эти различия для двух методов заметны на рис. 3, где представлены результаты для соловецкой хронологии. Это, в частности, означает, что смещения в обычных RCS-хронологиях более чувствительны к климатическому сигналу как таковому (что описывается в работе (Briffa, Melvin, 2010) как «trend-in-signal bias»), чем в sfRCS-хронологиях. Интересно, что отклонения обеих хронологий от модельного климатического сигнала обнаруживаются даже в том случае, когда в качестве модельного сигнала выступает sfRCS-хронология, построенная по исходным (реальным) данным (рис. 2–5 е). Также наши результаты еще раз подтверждают, что хронологии, построенные с помощью обычной стандартизации региональной кривой (RCS), испытывают особенно сильные смещения на концах хронологии (рис. 2–5 ж) (Briffa, Melvin, 2010).

Меньшая зависимость искажения sfRCS-хронологий от моделируемого климатического сигнала позволяет оценить искажения, связанные только со структурой набора данных. Отклонения от модельного климатического сигнала могут быть вычтены из хронологии, построенной по реальным данным, для корректировки тех отклонений, которые вызваны исключительно структурой данных. Предлагаемая нами процедура такова. Вначале мы моделируем набор данных на основе исходных (см. «Материалы и методы»), добавляя в качестве климатического сигнала sfRCS-хронологию, полученную по исходным данным. Предполагается, что эта хронология наиболее близка к реальному климатическому сигналу, хотя и с неизбежными искажениями. Затем мы строим sfRCS-хронологию по модельным данным

и вычитаем из нее модельный климатический сигнал – т.е. sfRCS-хронологию по реальным данным. Разность является оценкой смещений, вызванных структурой данных, а именно длиной и особенностями индивидуальных серий, их индивидуальными отклонениями от региональной кривой роста, распределением данных во времени. Последним этапом является вычитание этих значений из sfRCS-хронологии, построенной по реальным данным, для ее корректировки. Все операции с хронологиями и сигналом нужно производить после нормировки, так как при восстановлении исходного сигнала масштаб нарушается. По нашему мнению, скорректированная таким образом хронология точнее отражает реальный климатический сигнал. Поэтому мы рекомендуем применять такую корректировку ко всем хронологиям, построенным на основе метода RCS или sfRCS. Пример такой корректировки, выполненной для данных по Соловкам, представлен на рис. 6. Проверить предложенную методику на конкретных реконструкциях довольно затруднительно, поскольку наши сведения о палеоклимате не обладают достаточной точностью. Мы считаем, что при текущем состоянии палеоклиматологии оценить смещения в RCS-хронологиях можно только на модельных данных. Отследить на реальных реконструкциях, какой из рассмотренных методов дает лучшие результаты пока, скорее всего, невозможно.

Заключение

В данной работе мы использовали signal-free подход для моделирования изменений ширины годичных колец деревьев с заранее заданным климатическим сигналом. Этот подход позволяет сохранить структуру набора данных (длина и особенности индивидуальных серий, распределение данных

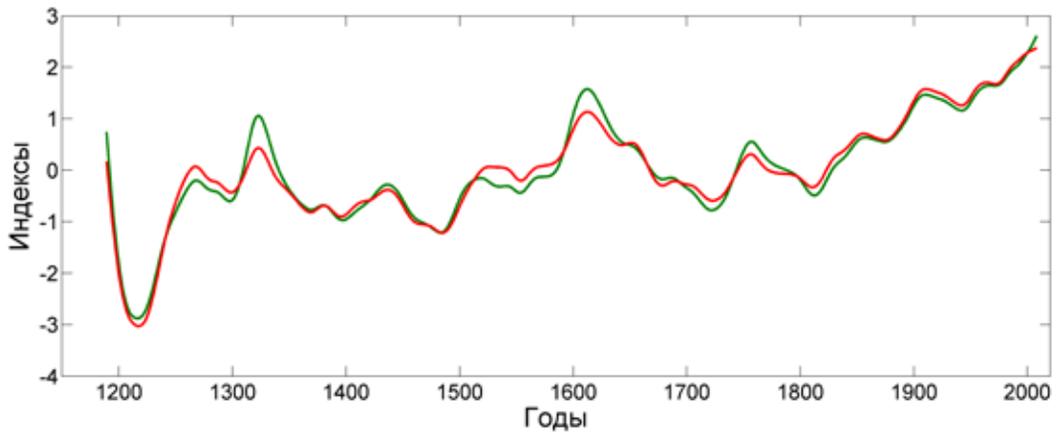


Рис. 6. Исходная (зеленый) и скорректированная (красный) sfRCS хронологии по Соловкам

во времени) и впоследствии оценить смещения RCS- и sfRCS-хронологий, вызванных именно структурой данных. Предложена методика такой оценки и последующей корректировки хронологии, ее рекомендуется применять на практике вместе с использованием стандартизации региональной кривой RCS и sfRCS.

Что касается предпочтения метода стандартизации, то из двух исследованных методов (обычного RCS или sfRCS) мы рекомендуем использовать последний. Эксперименты с моделированием различного климатического сигнала показали преимущества sfRCS над обычным RCS на всех четырех исследованных наборах данных.

Список литературы

Соломина О.Н., Мацковский В.В., Жуков П.С. (2011) Дендрохронологические “летописи” “Вологда” и “Соловки” как источник данных о климате последнего тысячелетия. Доклады Академии наук 439 (4): 539–544.

Becker M. (1989) The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1110–1117

Briffa K.R., Jones P.D., Bartholin T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M. (1992) Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long time scales. *Clim. Dynam.* 7: 111–119.

Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Karlén W., Shiyatov S.G. (1996) Tree-ring variables as proxy-climate indicators: problems with low-frequency signals. In: Jones P.D., Bradley R.S., Jouzel

В экспериментах по сокращению исходной выборки sfRCS-метод показал худшие либо сходные результаты на всех четырех исследованных наборах данных. Поэтому при использовании наборов данных, имеющих менее 40 индивидуальных серий либо менее 5 серий на каком-либо временном интервале, метод sfRCS нужно применять с осторожностью. В данном случае обычный RCS может быть предпочтительнее.

Благодарности

Автор благодарит двух анонимных рецензентов за замечания, которые помогли улучшить рукопись. Исследование поддержано грантами РФФИ 11-05-00304-а и 09-05-00982-а.

J. (eds.) *Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2,000 years*. Berlin: Springer-Verlag, p. 9–41.

Briffa K.R., Melvin T.M. (2010) A closer look at Regional Curve Standardization of tree-ring records: justification of the need, a warning of some pitfalls, and suggested improvements of its application. In: Hughes M.K., Diaz H.F., Swetnam T.W. (eds.) *Dendroclimatology: Progress and prospects*. Berlin: Springer-Verlag, p. 113–146.

Bunn A.G., Sharac T.J., Graumlich L.J. (2004) A simulation model to compare methods of tree-ring detrending and to investigate the detectability of low-frequency signals. *Tree-Ring Res.* 60(2): 77–90.

Büntgen U., Esper J., Frank D.C., Nicolussi K., Schmidhalter M. (2005) A 1,052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures. *Clim. Dynam.* 25: 141–153.

Cook E.R., Peters K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull.* 41: 45–53.

Cook E.R., Kairiukstis L.A. (1990) *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Dordrecht: Kluwer, 394 p.

Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G. (1995) The segment length curve in long tree-ring chronology development for paleoclimatic studies. *Holocene* 5: 229–237

Cook E.R., Buckley B.M., D'Arrigo R.D., Peterson M.J. (2000) Warm-season temperatures since 1600 BC reconstructed from Tasmanian tree rings and their relationship to large-scale sea surface temperature anomalies. *Clim. Dynam.* 16: 79–91.

D'Arrigo R., Mashig E., Frank D., Wilson R., Jacoby G. (2005) Temperature variability over the past millennium inferred from northwestern Alaska tree rings. *Clim. Dynam.* 24: 227–236.

Esper J., Cook E.R., Krusic P.J., Schweingruber F.H. (2003) Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Res.* 59: 81–98

Fritts H.C. (1976) *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 567 p.

Grudd H., Briffa K.R., Karlén W., Bartholin T.S., Jones P.D., Kromer B. (2002) A 7,400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *Holocene* 12: 657–665.

Helama S., Lindholm M., Timonen M., Meriläinen J., Eronen M. (2002) The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 2, interannual to centennial variability in summer temperatures for 7,500 years. *Holocene* 12: 681–687.

Helama S., Nielsen J.K., Macias Fauria M., Valovirta I. (2009) A fistful of shells: Amplifying sclerochronological and palaeoclimate signals from molluscan death assemblages. *Geol. Mag.* 146: 917–930.

Helama S., Laanelaid A., Tietavainen H., Macias Fauria M., Kukkonen I.T., Holopainen J., Nielsen J.K., Valovirta I. (2010) Late Holocene climatic variability reconstructed from incremental data from pines and pearl mussels – a multi-proxy comparison of air and subsurface temperatures. *Boreas* 39: 734–748.

Jansen E., Overpeck J., Briffa K.R., Duplessy J.-C., Joos F., Masson-Delmotte V., Olago D., Otto-Bliesner B., Peltier W.R., Rahmstorf S., Ramesh R., Raynaud D., Rind D., Solomina O., Villalba R., Zhang D. (2007) *Palaeoclimate*. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of*

Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, p. 433–498.

Jones P.D., Briffa K.R., Osborn T.J., Lough J.M., van Ommen T.D., Vinther B.M., Luterbacher J., Wahl E.R., Zwiars F.W., Mann M.E., Schmidt G.A., Ammann C.M., Buckley B.M., Cobb K.M., Esper J., Goosse H., Graham N., Jansen E., Kiefer T., Kull C., Küttel M., Mosley-Thompson E., Overpeck J.T., Riedwyl N., Schulz M., Tudhope A.W., Villalba R., Wanner H., Wolff E., Xoplaki E. (2009) High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *Holocene* 19 1: 3–49.

Linderholm H.W., Gunnarson B.E. (2005) Summer temperature variability in central Scandinavia during the last 3,600 years. *Geogr. Ann. A* 87A: 231–241.

Luckman B.H., Wilson R. (2005) Summer temperatures in the Canadian Rockies during the last millennium: a revised record. *Clim. Dynam.* 24: 131–144.

Melvin T.M. (2004) Historical growth rates and changing climatic sensitivity of boreal conifers. PhD Thesis, University of East Anglia (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/pubs/thesis/2004-melvin/>).

Melvin T.M., Briffa K.R., Nicolussi K., Grabner M. (2007) Time-varying response smoothing. *Dendrochronologia* 25: 65–69.

Melvin T.M., Briffa K.R. (2008) A "signal-free" approach to dendroclimatic standardisation. *Dendrochronologia* 26: 71–86.

Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Sidorova O.V., Schweingruber F.H. (2002) Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2,427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series. *Holocene* 12: 727–736.

Porter T.J., Pisaric M. (2011) Temperature-growth divergence in white spruce forests of Old Crow Flats, Yukon Territory, and adjacent regions of northwestern North America. *Global Change Biology* 17: 3418–3430.

Schweingruber F.H., Bartholin T., Schar E., Briffa K.R. (1988) Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas* 17: 559–566. Данные получены в Мировом центре палеоклиматических данных (World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, Colorado, USA).

Schweingruber F.H., Briffa K.R. (1996) Tree-ring density networks for climate reconstruction. In: Jones P.D., Bradley R.S., Jouzel J. (eds.) *Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2000 years*. NATO ASI Series 141. Berlin: Springer, p. 43–66.

Wilson R., Luckman B.H., Esper J. (2005) A 500-year dendroclimatic reconstruction of spring-summer precipitation from the lower Bavarian Forest region, Germany. *Int. J. Climatol.* 25: 611–630.

Estimation of Biases in RCS Chronologies of Tree Rings

Vladimir V. Matskovsky

*Institute of Geography of Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetny pereulok, Moscow, 119017 Russia*

We use several examples of modeled and real tree ring width measurements to compare RCS and signal-free RCS chronologies. Modeled data containing known climatic signal are designed to preserve the structure of dataset. All the experiments with modeled data showed the better ability of signal-free RCS to restore climatic signal. At the same time it is less (as compared to conventional RCS) robust to the reduction of sample depth. A method for evaluation and correction of biases connected with the structure of dataset (length and specifics of individual series, their distribution in time) is proposed. Such correction can be carried out before making climate reconstructions with conventional RCS and signal-free RCS chronologies.

Keywords: dendrochronology, dendroclimatology, tree rings, Regional Curve Standardization, RCS, signal-free approach, low-frequency, climate.
