

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 91:630 (581.5)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИРОСТА СОСНЫ
НА СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВАХ

© 2019 г. Е. А. Долгова*, О. Н. Соломина**, В. В. Мацковский***,
А. С. Добрянский****, Н. А. Семеняк*****, С. С. Шпунт*****

Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: dolgova@igras.ru

**e-mail: solomina@igras.ru

***e-mail: matskovsky@igras.ru

****e-mail: alex@igras.ru

*****e-mail: semenyak@igras.ru

*****e-mail: sergey.s.shpunt@gmail.com

Поступила в редакцию 08.05.2018 г.; после доработки 19.10.2018 г.; принята в печать 30.11.2018 г.

В работе представлены результаты анализа пространственной изменчивости прироста сосны на территории Соловецких островов. В результате проведенных экспедиционных работ было заложено 14 дендрохронологических площадок сосны в различных местообитаниях. Для каждой из площадок получена локальная хронология по ширине годовых колец сосны продолжительностью от 271 до 472 лет, которая отражает особенности прироста в каждом местообитании. Сравнение, проведенное между хронологиями, выявило синхронность прироста сосен из различных местообитаний в конце XVII, в первой половине XVIII и в начале XIX вв. Применение кластерного анализа позволило выделить несколько групп хронологий со сходными признаками. Так, в отдельные кластеры выделяются деревья, растущие на болотах, на песчаном субстрате и в сосняке-зеленомошнике или в смешанном лесу. Такое разделение также подтверждается результатами дендроклиматического анализа локальных хронологий. Оказалось, что прирост сосен, растущих в смешанном лесу и в сосняке-зеленомошнике, зависит от температуры воздуха июля. Внутри выделенной группы образцы из сосняков-зеленомошников имеют общий признак – положительную связь прироста с осадками сентября. Единственная площадка, расположенная на песках, показала отличный от остальных хронологий климатический сигнал, а именно зависимость от температуры августа.

Ключевые слова: дендрохронология, климатический отклик, ширина годовых колец, синхронность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>

ВВЕДЕНИЕ

Создание дендрохронологических шкал по ширине годовых колец, которые охватывали бы последние тысячелетия, является одной из актуальных проблем современной дендроклиматологии [5]. Длинные и надежные дендрохронологические ряды не только служат источником палеоклиматической информации, но также могут быть использованы для датирования экстремальных природных событий (засухи, наводнения, извержение вулкана, сход лавины и т.д.), археологических объектов. Получить такие шкалы возможно в районах, где, с одной стороны, произрастают старые деревья, а, с другой, есть возможность продлить ряды за счет включения

археологической или архитектурной древесины. Кроме того, для успешной реконструкции необходимо чтобы деревья оказались пригодными для климатической реконструкции, т.е. были чувствительными к изменчивости какого-либо климатического параметра. Зачастую, при создании дендрохронологических реконструкций все серии ширины годовых колец объединяются в сводную хронологию. Включение большого числа серий увеличивает репликацию хронологии и, как следствие, повышает статистические характеристики самой реконструкции. Строго говоря, для объединения серий ширины годовых колец деревьев из разных местообитаний в сводную хронологию, необходимы отдельные

исследования. С одной стороны, прирост деревьев, растущих в сходных климатических условиях, как правило, зависит от одного общего климатического фактора, а значит, большинство локальных хронологий покажет единый рисунок угнетений ширины колец. С другой стороны, нередко отбор дендрохронологического материала в полевых условиях продиктован поиском наиболее старых экземпляров и в результате дендрохронологические площадки расположены в различных ландшафтных условиях. Такие особенности местообитаний как высота над уровнем моря, характер и литологический состав почвенного покрова, заболоченность могут оказывать существенное влияние на прирост.

Дендроклиматические работы в регионах Арктики и Субарктики играют особую роль в подобных исследованиях. Согласно последним достижениям в области моделирования климата, на фоне глобального увеличения приземной температуры воздуха, именно в Арктическом секторе будут происходить самые драматические климатические изменения, величина и скорость которых будут существенно превосходить средние глобальные значения [7]. Работы по изучению особенностей прироста деревьев из разных местообитаний позволят сделать прогноз об изменении функционирования древостоев при дальнейшем изменении климата. Соловецкие острова, находясь на границе между тундрой, лесотундрой и тайгой [1], могут стать уникальным тест-полигоном по наблюдению за откликом растительности при изменениях климата. В данной работе мы представляем результаты пространственного анализа особенностей прироста сосны на Соловецких островах из разных местообитаний.

РАЙОН РАБОТ

Соловецкий архипелаг (65°10' N, 35°53' E) расположен в сравнительно мелководной западной части Белого моря. Кристаллический фундамент Соловецких островов покрыт мощным слоем отложений, сформированных при дегляциации валдайского и днепровского оледенений. Для Соловецкого архипелага характерен разнообразный рельеф: расчлененный рельеф с моренными холмами и грядами, вытянутыми меридионально; заболоченные зандровые поверхности; рельеф морских террас. Самые высокие точки рельефа – гора Поднебесная (80.7 м) и Секирная (71.0 м) на Большом Соловецком острове, а также горы Вербокольская (88.2 м) и Голгофа (63.8 м) на Анзере, в то время как высота остальной части на островах не превышает 40 м [2]. Климат Соловецкого архипелага определяется его островным положением в ползамкнутом водоеме со сложной ледовой об-

становкой. В связи с этим тут сформировался климат не совсем характерный для данной географической широты [1]. Климат Соловецких островов мягкий, умеренно теплый морской. Средняя температура воздуха лета согласно данным метеостанции Кемь (64.98° с.ш., 34.80° з.д., 8.0 м.н.у., 1862–2016), расположенной на континенте, составляет +12.9°C, зима – –8.5°C. Самый холодный месяц – февраль, самый теплый – июль. Годовое количество выпавших осадков достигает 480 мм, а средняя продолжительность вегетационного периода составляет 128 дней. На Соловках по данным наблюдений годовое количество осадков выше и составляет 547 мм. Для ветрового режима Соловецкого архипелага характерна сезонная смена направлений. В холодное время преобладают ветры южных направлений, которые формируются под влиянием исландского минимума, а в теплое – северных. За холодный период выпадает 186 мм осадков, что составляет 34% от годовых значений. За теплый период выпадает 361 мм осадков, что составляет 66% годового количества. Летом над западной частью Баренцева моря располагается область повышенного давления, которая обуславливает поступление арктического воздуха на более прогретую Европейскую континентальную часть России [2].

Соловецкие острова относятся к районам, для которых характерна низкая вероятность возникновения заморозков. Однако для растений губительны не столько заморозки, сколько оттепели в зимний период и ранней весной. Такие оттепели в среднем наблюдаются в декабре в течение 2 дней, в январе – 1, в марте – 3, в апреле – 13 [1]. Губительное действие теплого воздуха в холодный период заключается в том, что благодаря ему активизируются жизненные процессы в хвое, почках и побегах. В таких условиях увеличивается расход влаги на транспирацию, которая не может компенсироваться поступлением воды из мерзлой почвы, что становится причиной возникновения зимнего иссушения растения. Негативное влияние ветра на растительность наблюдается не только зимой, но и летом. Это связано с тем, что даже при невысоких скоростях ветра транспирация возрастает, способствуя нарушениям водного баланса. Сильные ветры, наблюдаемые на Соловецких островах, способствуют замедлению роста ствола в высоту, из-за чего на Соловках даже в перестойном лесе высоких деревьев не наблюдается [1].

Таким образом, уникальность Соловецких островов в климатическом отношении заключается в следующем: по сравнению с континентом зима здесь мягче, лето без большой жары, влажность выше, скорость ветра выше.

Согласно лесорастительному районированию Соловецкие острова относят к северной подзоне тайги и именно здесь проходит граница двух физико-географических областей – леса и тундры. Растительность здесь находится под огромным влиянием моря и ветров. Сильные ветровые нагрузки повлияли на внешний вид древесной растительности. Здесь наблюдаются такие признаки приспособления деревьев как сильный наклон стволов, небольшая высота стволов и др. [1].

Зональные природные комплексы Соловецкого архипелага представлены крайне северными лесами, притундровыми редколесьями и криволесьями. Крайне северные хвойные

леса занимают центральную часть Большого Соловецкого острова и западную часть острова Анзер. Выделяют два подтипа данных комплексов. Первый развивается на среднеподзолистых иллювиально-железистых почвах с песчаными верхними горизонтами, его основу составляют типичные северотаежные ельники с высоким бонитетом. Второй подтип формируется на болотно-подзолистых и торфяно-перегнойных почвах, где преобладают ельники-долгомошники с угнетенным древостоем. Притундровые комплексы развиты на побережьях, а также в центре островов Анзер и Большая Муксалма. Для них характерны маломощные слабоподзолистые

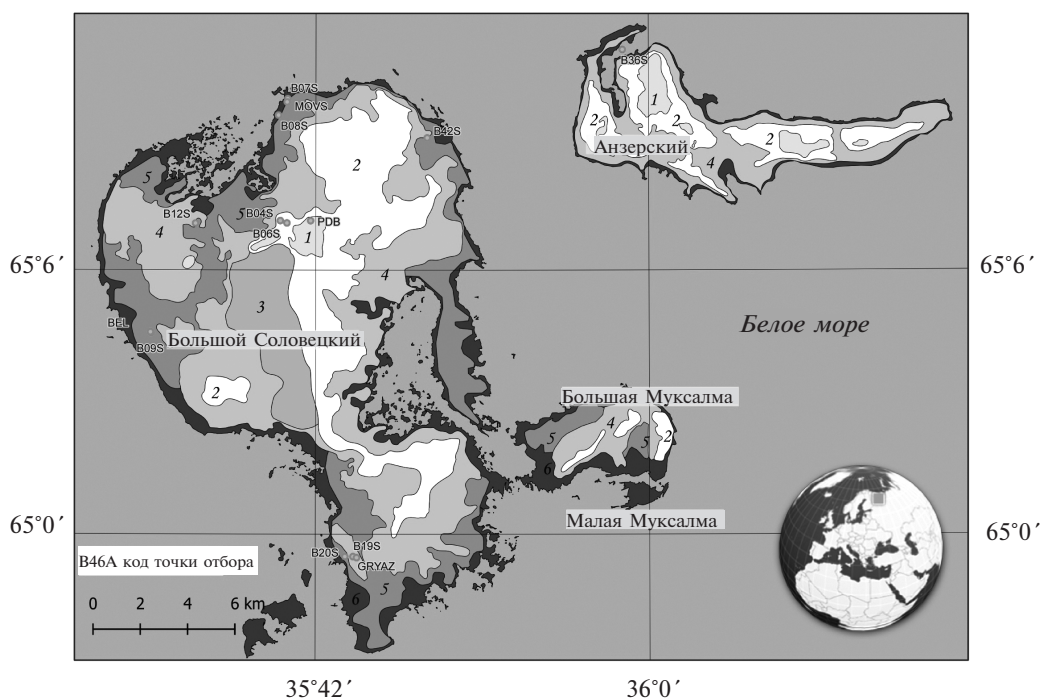


Рис. 1. Ландшафтная карта Соловецких островов и расположение дендрохронологических площадок сосны. Ландшафтная карта взята из дипломной работы А. Глухой (географический факультет, МГУ) и генерализирована А. Добрянским (ИГ РАН).

Условные обозначения: 1 – группа урочищ возвышенных, холмистых, холмисто-возвышенных равнин с камовыми образованиями, сложенных валунными супесями с подзолистыми и болотно-подзолистыми почвами под еловыми кустарничково-зеленомошными лесами с незначительной примесью сосны и березы; 2 – группа урочищ полого-холмистой поверхности моренной равнины от 25–50 м, сложенных валунными супесями и супесчаной мореной с подзолами и болотно-подзолистыми почвами под еловыми и сосново-еловыми лесами с примесью березы, кустарничково-зеленомошными лесами; 3 – группа урочищ водно-ледниковых равнин, сложенных супесчаной мореной с болотно-подзолистыми почвами под сосново-еловыми и елово-сосновыми лесами с примесью березы, кустарничково-сфагновыми лесами; 4 – группа урочищ возвышенных морских террас с многочисленными озерными западинами и моренными грядами (h от 14 до 24 м), сложенные слоистыми илесто-песчаными отложениями, перекрытыми торфом с болотно-торфяными почвами под растительностью сфагновых болот и заболоченных кустарничково-сфагновых сосняков; 5 – группа урочищ 2-й и 3-й морской террасы (h от 7 до 13 м) уклонная с уступами, сложенная илесто-песчаными отложениями в значительной мере перекрытыми торфом переходных, реже верховых болот с болотными почвами под осоково-сфагновой болотной растительностью и заболоченными сосновыми и еловыми лесами; 6 – группа урочищ марши современного берега (h от 3 до 5 м), сложенные галечно-валунными отложениями на размытой морене с фрагментарным растительным покровом, представленным в литоральной части водорослями и галофитами, в супралиторальной части – литофильным солевывосливым разнотравьем на примитивных сильно каменистых дерновых.

каменисто-песчаные почвы на слабодренированных пологих склонах гряд и болотно-подзолистые или торфяно-глеевые почвы в межрядовых впадинах. Растительность здесь представлена в виде редколесий с доминированием сосны [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ОТБОР ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Летом 2009, 2012 и 2016 гг. отрядом Института географии РАН были проведены дендрохронологические исследования на Соловецких островах (рис. 1), целью которых являлось создание обширной дендроклиматической сети. Керны из живых деревьев отбирались ручным приростным буром Пресслера на высоте 1–1.5 м от поверхности земли, по одному-двум кернам из каждого дерева. Дальнейшая обработка образцов проводилась в дендрохронологической лаборатории Института географии РАН в соответствии с общепринятыми методическими требованиями древесно-кольцевого анализа [4, 9]. Керны были вклеены в деревянные подложки и отшлифованы для увеличения контрастности колец. Затем годовые кольца были посчитаны и размечены по десять, пятьдесят и сто лет [13]. Измерения ширины годовых колец произведены на полуавтоматической установке LINTAB с точностью до 0.01 мм. С помощью специализированных дендрохронологических программ COFESHA [11] и TSAP [12] проводился контроль качества измерений и поиск выпадающих и ложных колец. Образцы, успешно прошедшие таким образом процедуру перекрестной датировки, объединялись для создания локальной хронологии.

Абсолютные значения ширины годовых колец зависят не только от климата, но и от ряда факторов не климатической природы. На годовой прирост может оказывать влияние возраст самого дерева, конкурентные взаимоотношения в древостое, катастрофические явления и др. Для усиления климатического сигнала в рядах ширины годовых колец необходимо минимизировать влияния других факторов на прирост. Для этого абсолютные значения ширины переводятся в относительные путем процедуры стандартизации. В нашем случае индексы получены путем деления ширины на соответствующее значение аппроксимирующей кривой (отрицательная экспонента или прямая с нулевым или отрицательным уклоном). Обобщенные хронологии получались путем усреднения отдельных серий методом робастного двухвесового среднего (Biweight Robust Mean) [9]. Кроме того, в рядах по ширине годовых колец содержится автокорреляция, т.е. величина прироста в текущем году зависит от

условий произрастания в предыдущие годы. Автокорреляцию можно успешно удалить с помощью модели авторегрессии и в этом случае полученные хронологии называются “остаточные” (Residual), а в случае наличия автокорреляции в рядах получается “стандартная” хронология (Standard). В работе использованы стандартные хронологии по ширине годовых колец сосны. Вся перечисленная обработка древесно-кольцевых серий была проведена в дендрохронологическом пакете программ DplR [6] в среде R [17].

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ ОТКЛИКА

Теснота связи между приростом сосны и метеорологическими параметрами (среднемесячные температура и осадки) оценена с помощью климатической функции отклика. В этом случае, индексы хронологий рассчитываются методом множественной регрессии на главные компоненты месячных климатических данных. Затем полученные коэффициенты регрессии умножаются на главные компоненты климатических рядов [16]. В некоторых случаях для оценки связей были использованы коэффициенты корреляции Пирсона. Статистическая значимость коэффициентов регрессии оценена бутстреп методом. Период, за который получена климатическая функция отклика, ограничен продолжительностью инструментальных наблюдений (1901–2016 гг.). Хронологии по ширине годовых колец сравнивались с климатическими данными за 15 месяцев (с июня предыдущего года по сентябрь текущего года). Кроме того, был проведен анализ устойчивости сигнала во времени для каждого месяца. Для этого климатическая функция отклика рассчитывалась в плавающем 30-летнем окне с заданным перекрытием (5 лет). Такой анализ позволяет выделить периоды, когда связь становится слабее (сильнее) или вообще меняет знак на противоположный [16]. В данной работе дендроклиматический анализ был проведен в дендрохронологическом пакете TreeClim [16], реализованный в среде R. В работе были использованы ряды инструментальных наблюдений среднемесячной температуры и осадков точного архива CRU TS 4.01 [9] из ближайшего узла точки (64.75° с.ш., 35.75° з.д.).

ОЦЕНКА СИНХРОННОСТИ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ

Для оценки особенностей прироста локальных хронологий, полученных из разных местобитаний, был применен кластерный анализ, который позволяет классифицировать ряды данных на основе сходства признаков. Кластерный анализ реализован в пакете pvclust в среде R [14].

Таблица 1. Описание дендрохронологических площадок по живым деревьям сосны на Соловецких островах

Код пробной площадки	Место отбора (тип ландшафта согласно карте)	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Число кернов	Число деревьев	Дата отбора	Первый год	Последний год
PDB	о. Б. Соловецкий, район горы Поднебесная, смешанный лес: ель–сосна–лиственные на автоморфных позициях (1)	65.118717	35.695050	23	11	20.06.2009	1541	2008
MOV5	о. Б. Соловецкий, мыс Овсянникова, смешанный лес: ель–сосна–лиственные на песке (6)	65.1637	35.673717	12	6	18.06.2009	1775	2008
BEL	о. Б. Соловецкий, мыс Белужий, сосняк чернично-зеленомошный (5)	65.076517	35.551183	10	5	06.06.2009	1548	2008
GRYAZ	о. Б. Соловецкий, дорога на мыс Печак, в р-не оз.Грязного, сосняк зеленомошный (4)	64.99115	35.736733	23	12	04.06.2009	1655	2008
B04S	о. Б. Соловецкий, у оз. Портовое (2)	65.11875	35.66775	6	3	10.06.2012	1711	2011
B06S	о. Б. Соловецкий, у оз. Штаны, осиново-сосново-еловый лес чернично-зеленомошный (2)	65.11786	35.67371	12	6	10.06.2012	1709	2011
B07S	о. Б. Соловецкий, мыс Овсянникова, заболоченное место (6)	65.16492	35.67428	12	6	11.06.2012	1679	2011
B08S	о. Б. Соловецкий, мыс Овсянникова, на болоте (6)	65.1587	35.66598	24	10	11.06.2012	1697	2011
B09S	о. Б. Соловецкий, болото к югу от гряды с точкой BEL 2009 г. (5)	65.07627	35.55177	22	10	12.06.2012	1543	2011
B12S	о. Б. Соловецкий, дорога к оз. Криводорожное	65.11772	35.59142	26	13	14.06.2012	1594	2011
B19S	о. Б. Соловецкий, дорога к мысу Печак (4)	64.99155	35.7335	39	20	19.06.2012	1678	2011
B20S	Соловки, дорога к мысу Печак, дальше к 3 от B19S, на болоте (5)	64.99155	35.7335	8	4	19.06.2012	1690	2011
B36S	о. Анзер, смешанный лес по дороге на Троицкий скит	65.18352	35.97603	34	17	15.06.2012	1592	2011
B42S	о. Б. Соловецкий, сосновый лес около мыса Реболда и оз. Б. Банное	65.15011	35.8	23	12	24.06.2012	1540	2011

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего нами было получено более 200 древесно-кольцевых серий по ширине годичных колец сосны (табл. 1). Все серии, успешно прошедшие процедуру перекрестного датирования, были объединены в локальные хронологии. В результате нами получены 14 стандартных хронологий по сосне (рис. 2) продолжительностью от 271 до 472 лет. Самые старые живые сосны обнаружены на площадке В42S (472 года при наличии более 2 серий), расположенной в сосновом лесу у мыса Реболда на северо-востоке Большого Соловецкого острова. Эта находка указывает на принципиальную возможность обнаружения старовозрастных сосен, которые, скорее всего, сохранились из-за своего удаленного расположения от основных поселков.

Судя по сглаженным 20-летним сплайном локальным хронологиям сосны, самая высокая синхронность наблюдается в конце XVII, в первой половине XVIII и в начале XIX вв. Выделенные временные интервалы совпадают с периодами минимумов солнечной активности, когда, судя по реконструкциям Северного полушария, наблюдалось значительное похолодание [5]. Начиная с 1900-х годов у рядов наблюдается асинхронность, хотя многие из них показывают увеличение прироста в 1920-е годы. Самое сильное увеличение прироста в последние десятилетия наблюдается у уже упомянутой выше самой продолжительной хронологии В42S.

Все 14 локальных хронологий показывают высокую взаимную корреляцию, подтверждая тем самым принципиальную возможность

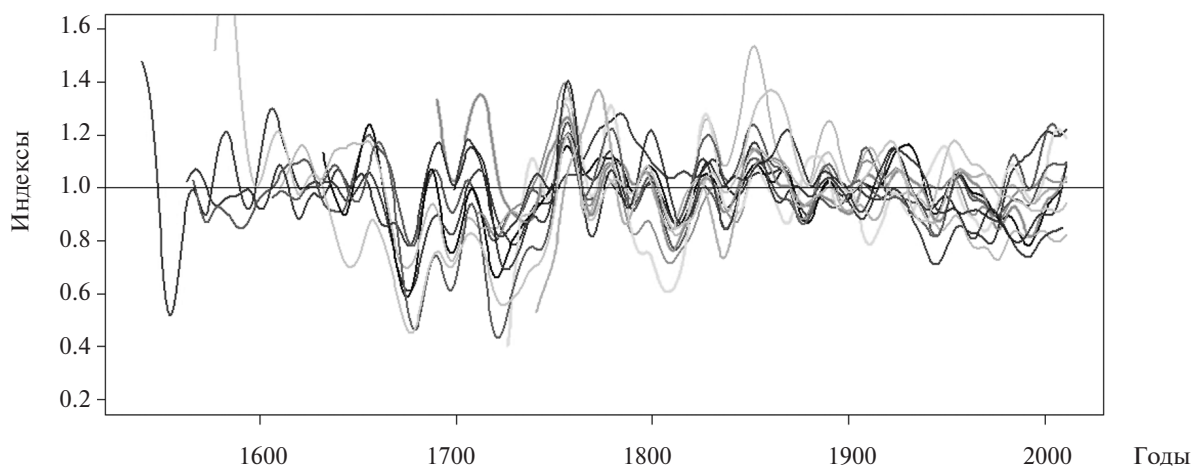


Рис. 2. Сглаженные 20-летним сплайном стандартные хронологии ширины годичных колец сосны (при наличии более 2 серий).

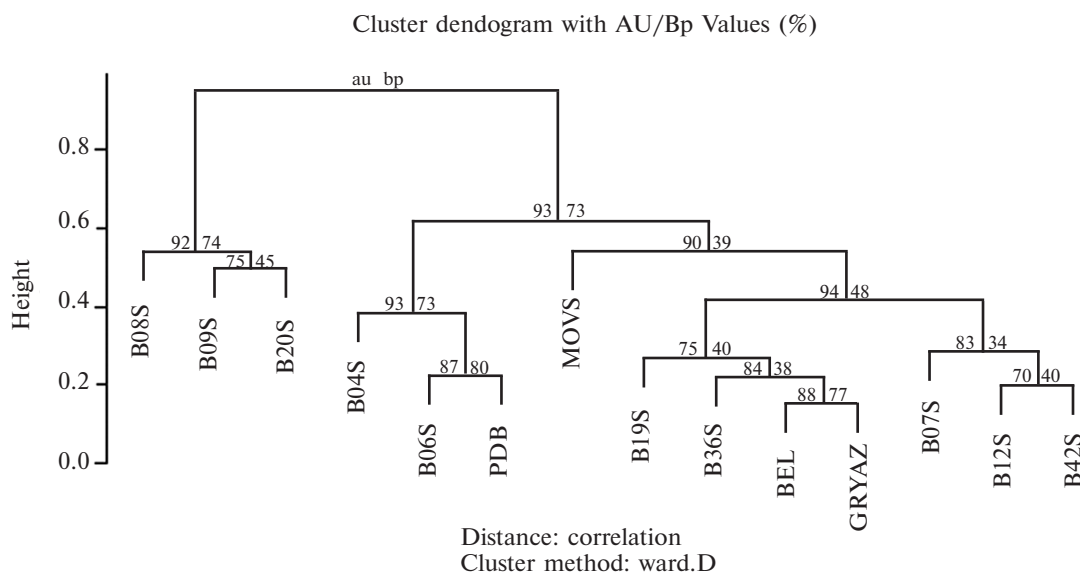


Рис. 3. Результаты кластерного анализа 14 стандартных хронологий.

Таблица 2. Климатическая функция отклика локальных хронологий на среднемесячные температуры (Т) и осадки (О) за июнь–декабрь прошлого года (6п–12п) и январь–сентябрь текущего года (1–9).

№	Пло- щадка	Предыдущий год (июнь–декабрь)							Текущий год (январь–сентябрь)								
		6п	7п	8п	9п	10п	11п	12п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	B04S	–	–	+O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+O
2	B06S	–	+O	+T	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	+O
3	B07S	–	+O	–T, +O	–	–	–	–	–	+O	–	–	–	–	+T	–	–
4	B08S	–	–	–	+T	–	–	+O	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	B09S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	B12S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	–
7	B19S	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	–	–	–	–	+T	–	+O
8	B20S	–	–	–	–	–T	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	–
9	B36S	–	–	+O	–	–	–	+O	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	B42S	–	–	–T	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11	BEL	–	–	–	–	+O	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	+O
12	GRYAZ	–	–	–	–	+O	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	+O
13	MOVS	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	–	–	–	+T	–
14	PDB	–	–	–	–	+T	–	–	–	–	–	–	–	–	+T	–	–

Примечание. В таблице показаны только статистически значимые коэффициенты регрессии

объединения всех серий в сводную хронологию. Однако результаты проведенного нами кластерного анализа свидетельствуют о наличии отдельных групп хронологий внутри всей выборки (рис. 3). Так, отдельным кластером выделены хронологии, полученные из заболоченных местообитаний (B08S, B09S, B20S). Сосны из смешанного леса, расположенного в центре Большого Соловецкого острова в районе горы Поднебесной (B04S, B06S и PDB), также образуют самостоятельную группу. Выделяется хронология MOVS, которая построена для сосен

из сообщества смешанного леса на песках, расположенного на севере Большого Соловецкого. Примечательно, что эта хронология не группируется с расположенными вблизи двумя другими хронологиями B07S и B08S, что, вероятно, связано с их расположением в заболоченных местах. Практически все остальные хронологии сосны получены из сосняков-зеленомошников.

Корректность кластеризации локальных хронологий подтверждается результатами проведенного дендроклиматического анализа (табл. 2). Большинство хронологий (8 из 14) оказались

чувствительными к изменениям температуры воздуха июля. Все хронологии, за исключением одной B20S, представляют собой сосны из двух местообитаний: смешанный лес и сосняк-зеленомошник. Внутри этой группы 4 хронологии (BEL, GRYAZ, B19S и B06S) показали общий положительный сигнал на осадки сентября текущего года. При этом 3 хронологии получены из сосняков-зеленомошников. Выделенная в отдельный кластер хронология MOVS имеет непохожую на все остальные климатическую функцию отклика. Это единственная хронология, у которой обнаружена положительная связь с температурой воздуха не в июле, а в августе. Вероятнее всего, такой сигнал связан с расположением этой площадки на песках. Сосны, растущие на болоте (B08S, B09S и B20S) и выделенные нами в отдельную группу в результате кластерного анализа, не показали сходных признаков отклика на климатические параметры.

ВЫВОДЫ

Прирост сосны из смешанных лесов и сосняков-зеленомошников зависит от изменчивости температуры воздуха июля.

Внутри группы хронологий чувствительных к изменениям температуры июля, выделяется подгруппа сосен из сосняков-зеленомошников, которая оказалась также чувствительна к увеличению количества осадков в сентябре.

Единственная площадка, расположенная на песках, показала отличный от остальных хронологий климатический сигнал, а именно зависимость от температуры августа.

Хотя сосны, растущие на болотах, объединяются в один кластер, общего климатического отклика для них не обнаружено.

Проведенный комплексный анализ показывает, что объединение локальных хронологий в сводную хронологию пригодную для целей палеореконструкций должно проводиться с учетом наличия у них сходного климатического сигнала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим сотрудников Соловецкого музея-заповедника А.Н. Соболева и Л.А. Петровскую, оказавшим нам большую помощь в сборе дендрохронологического материала, а также В.В. Грязнову, Ю.З. Мацковскую, Л.И. Лазукову, Р.С. Жукова за помощь в измерении и датировании образцов, В.Н. Михаленко, Т.М. Кудерину, А.В. Кудикова за помощь при проведении полевых работ. Авторы благодарят двух рецензентов — Алексея Грачёва и анонимного рецензента за ценные комментарии и замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-77-20123.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors are grateful to A.N. Sobolev and L.A. Petrovskaya (the employees of the Solovetsky Museum Reserve) for assistance in collecting dendrochronological materials; to V.V. Gryaznova, Yu.Z. Mashkovskaya, L.I. Lazukova and R.S. Zhukov for assistance in sample measurement and dating; to V.N. Mikhalenko, T.M. Kuderina, and A.V. Kudikov for assistance during field works. Authors are grateful to Aleksei Grachev and the anonymous reviewer for their comments.

FUNDING

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant no. № 17-77-20123.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В.* Леса Соловецкого архипелага. Архангельск: ГУП "СОЛТИ", 2009. 244 с.
2. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана и И.Н. Болотова. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 184 с.
3. *Соломина О.Н., Мацковский В.В., Жуков Р.С.* Дендрохронологические "летописи". "Вологда" и "Соловки" как источник данных о климате последнего тысячелетия // Доклады Академии наук. 2011. № 439 (2). С. 1104–1109.
4. *Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Курдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М.* Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
5. *Anchukaitis K.J., Wilson R., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E.R., D'Arrigo R., Davi N., Esper J., Frank D., Gunnarson B.E., Hegerl G., Helama S., Klesse S., Krusic P.J., Linderholm H.W., Myglan V., Osborn T.J., Zhang P., Rydval M., Schneider L., Schurer A., Wiles G., Zorita E.* Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions // *Quat. Sci. Rev.* 2017. V. 163. P. 1–22.
6. *Bunn A.G.* A dendrochronology program library in R (dplR) // *Dendrochronologia.* 2008. V. 26 (2). P. 115–124.
7. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland, 2007. 151 p.*

8. Cook E., Holmes R. Guide for computer program ARSTAN, Adapted from User's Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona, 1986. P. 50–65.
9. Cook E.R., Kairiukstis L.A., et al. Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publ.: Dordrecht, 1989. 394 p.
10. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset // *Int. J. of Climatology*. 2014. V. 34 (3). P. 623–642.
11. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. 43. P. 69–78.
12. Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Ver. 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996. 262 p.
13. Stokes M.A., Smiley T.L. An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson, 1996. 73 p.
14. Suzuki R., Shimodaira H. Pvclust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering // *Bioinformatics*. 2006. V. 22. P. 1540–1542.
15. Zang C., Biondi F. Dendroclimatic calibration in R: the bootRes package for response and correlation function analysis // *Dendrochronologia*. 2013. V. 31 (1). P. 68–74.
16. Zang C., Biondi F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships // *Ecography*. 2015. V. 38 (4). P. 431–436.
17. URL. <http://cran.r-project.org/> (Дата обращения: 13.01.2019).
5. Anchukaitis K.J., Wilson R., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E.R., D'Arrigo R., Davi N., Esper J., Frank D., Gunnarson B.E., Hegerl G., Helama S., Klesse S., Krusic P.J., Linderholm H.W., Myglan V., Osborn T.J., Zhang P., Rydval M., Schneider L., Schurer A., Wiles G., and Zorita E. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions. *Quat. Sci. Rev.*, 2017, vol. 163, pp. 1–22.
6. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, vol. 26(2), pp. 115–124.
7. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, 2007. 151 p.
8. Cook E., Holmes R. *Guide for Computer Program ARSTAN, Adapted from User's Manual for Program ARSTAN*. Laboratory of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona, 1986, pp. 50–65.
9. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*, Cook E.R., Kairiukstis L.A., et al. Eds. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1989. 394 p.
10. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34(3), pp. 623–642.
11. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, no. 43, pp. 69–78.
12. Rinn F. *TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual*. Heidelberg, 1996. 262 p.
13. Stokes M.A., Smiley T.L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Tucson: The University of Arizona Press, 1996. 73 p.
14. Suzuki R., Shimodaira H. Pvclust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering. *Bioinformatics*, 2006, vol. 22, pp. 1540–1542.
15. Zang C., Biondi F. Dendroclimatic calibration in R: the bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 2013, vol. 31(1), pp. 68–74.
16. Zang C., Biondi F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, vol. 38(4), pp. 431–436.
17. The Comprehensive R Archive Network. Available at: <http://cran.r-project.org/> (accessed 13.01.2019).

REFERENCES

1. Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prouzvin L.I., Torkhov S.V. *Lesa Solovetskogo arhipelaga* [Forests of the Solovki Islands]. Arkhangel'sk: SOLT Publ., 2009. 244 p.
2. *Prirodnaya sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [The Natural Environment of the Solovetsky Archipelago in a Changing Climate], Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N., Eds. Yekaterinburg: UrO RAN Publ., 2007. 184 p.
3. Solomina O.N., Matskovskii V.V., Zhukov R.S. The Vologda and Solovki dendrochronological “chronicles” as a source of information about the climate conditions of the last millennium. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 439(2), pp. 1104–1109.
4. Shiyatov S.G., Vaganov Ye.A., Kirilyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa B.C., Naurzbayev M.M., Khantemirov P.M. *Metody dendrokronologii* [Methods of Dendrochronology], Part I: *Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'tsevoi informatsii* [Basics of Dendrochronology. Collecting and Obtaining Tree-Ring Data]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskii Gos. Univ., 2000. 80 p.

Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands

E. A. Dolgova^{*}, O. N. Solomina^{**}, V. V. Matskovsky^{***}, A. S. Dobryansky^{****},
N. A. Semenyak^{*****}, and S. S. Shpunt^{*****}

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: dolgova@igras.ru*

***e-mail: solomina@igras.ru*

****e-mail: matskovsky@igras.ru*

*****e-mail: alex@igras.ru*

******e-mail: semenyak@igras.ru*

******e-mail: sergey.s.shpunt@gmail.com*

Received May 08, 2018; revised October 19, 2018; accepted November 30, 2018

The paper presents the results of an analysis of the spatial variability of pine tree-ring growth in the Solovetsky Islands. As a result of the field work, tree-ring network containing 14 dendrochronological pine sites in various habitats were developed. For each site, a local tree-ring width pine chronology (from 472 to 271 years) is obtained, representing pine growth features in different habitat conditions. A comparison between chronologies revealed synchronous growth of pine in various habitats in the late 17th, in the first half of the 18th and the beginning of the 19th centuries. The use of cluster analysis allowed to identify several groups of chronologies with similar characteristics. So, trees growing on swamps, on a sandy substrate and in a green-moss pine forest or in a mixed forest are allocated in separate clusters. This clustering is also confirmed by the results of a dendroclimatic analysis of local chronologies. It turned out that the increase in the pine's growth in the mixed forest and in the green-moss pine forest depends on the July air temperature variation. Inside this group, samples from pine forests have a common feature – a positive relationship of growth with the precipitation of September. The only site located on the sands showed a different climatic signal than the other chronologies, namely, the dependence on the temperature of August.

Keywords: dendrochronology, climatic response function, tree-ring width, synchrony.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>