

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.345:630\*424.1

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(107-119)

ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
ГАЗОВОГО БУГРА НА МЕСТЕ ЯМАЛЬСКОЙ ВОРОНКИ

С.П. Арефьев<sup>1,2</sup>, А.В. Хомутов<sup>2,3</sup>, К.А. Ермохина<sup>3</sup>, М.О. Лейбман<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, 625003, Тюмень, а/я 2774, Россия; [sp\\_arefyev@mail.ru](mailto:sp_arefyev@mail.ru)

<sup>2</sup>Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия

<sup>3</sup>Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

Проанализированы древесно-кольцевые хронологии кустарников из района воронки, образовавшейся на Центральном Ямале в результате газового выброса в октябре 2013 г. на месте бугра предположительно газового происхождения. Образцы ивы отобраны на выброшенных блоках породы с бугра, с его склона *in situ* и из фоновой тундры. По расположению блоков и описаниям растительности на них проведена реконструкция исходного положения блоков на вершине и склоне бугра. Дальнейший анализ древесно-кольцевых хронологий ивы показал, что процесс формирования бугра длился не менее 66 лет (вероятнее всего, с 1940-х гг.), в течение которых бугор увеличивался в высоту и по диаметру. Скорость роста высоты бугра в 1976–1985 гг. оценивается в 8 см/год. В некоторых локусах бугра впервые для тундровой зоны отмечена связь прироста ивы с температурой воздуха не только июля, но и августа, что может быть использовано при индикации аналогичных бугров. Отмечена периодически возникающая несогласованность древесно-кольцевых хронологий ивы с бугра, с одной стороны, и из фоновой тундры, с другой. Такие дендрохронологические диссонансы имеют 6-летнюю цикличность, связанную с планетарными приливно-отливными силами, выявлены также циклы Вольфа (10.8 лет) и Хэйла (20–22 года). Газовый выброс произошел в год дендрохронологического диссонанса на пике цикла солнечной активности.

*Воронка газового выброса, газовый бугор, тундровые кустарники, древесно-кольцевые хронологии, природные циклы*

DENDROCHRONOLOGIC RECONSTRUCTION OF GAS-INFLATED MOUND FORMATION  
AT THE YAMAL CRATER LOCATION

S.P. Arefyev<sup>1,2</sup>, A.V. Khomutov<sup>2,3</sup>, K.A. Ermokhina<sup>3</sup>, M.O. Leibman<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Northern Development, Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
P/O box 2774, Tyumen, 625003, Russia; [sp\\_arefyev@mail.ru](mailto:sp_arefyev@mail.ru)

<sup>2</sup>Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia

<sup>3</sup>Earth Cryosphere Institute, SB RAS, P/O box 1230, Tyumen, 625000, Russia

Analyzed are tree-ring width chronologies out of shrubs from the area of the crater formed at the Central Yamal as a result of gas emission in October 2013. Crater formed in place of a mound, probably formed by gas-sing. We collected samples from willow shrubs on the ejected blocks of soil, mound slope *in situ*, and the background shrub tundra. Based on the location of the blocks and their vegetation cover, we reconstructed the original block position on the top and slope of the initial mound. Further analysis of tree-ring width chronologies of the willows has demonstrated that formation of the mound had lasted for at least 66 years (most likely from the end of the 1940s), during which the mound had increased in both diameter and height. We estimated the growth rate of the mound height in 1976–1985 at 8 cm per year. It has been for the first time for the Tundra zone that in some loci the relationship has been observed between willow growth and air temperature of not only July, but also August. Thus, such relationship can be used as indication of similar mounds. Noted is a recurring inconsistency between tree-ring width of willows on the mound and on the background tundra. Such tree-ring width dissonances have a 6-year periodicity, connected to the planetary tidal effect; identified are Wolf cycles (10.8 years) and Hale cycles (20–22 years) as well. Gas emission fell into the year of dendrochronological dissonance at the peak of the solar cycle.

*Gas-emission crater, gas-inflated mound, tundra shrubs, tree-ring width chronologies, natural cycles*

ВВЕДЕНИЕ

Воронка газового выброса в центральной части п-ова Ямал была обнаружена в 2014 г. и сразу стала предметом пристального внимания со сторо-

ны ученых, государственных структур и широких слоев общества. В ходе проведенных исследований [Leibman et al., 2014] установлено, что выброс

произошел в период с 9 октября по 1 ноября 2013 г. на месте зафиксированного на космоснимках бугра, имевшего диаметр основания 45–58 м и высоту 5–6 м. На начало 2014 г. глубина воронки составляла более 50 м, диаметр ее цилиндрической части 15–16 м, раструба – 25–29 м, бруствера из выброшенного материала – около 70 м. Большой частью этого материала первоначально был лед – 9260 из 11 200 м<sup>3</sup> [Кизяков и др., 2015].

Как вокруг воронки, так и на блоках выброшенного материала присутствуют кустарники, что позволяет использовать их древесно-кольцевые структуры для восстановления параметров данного феномена с учетом имеющегося регионального опыта [Арефьев, 1994, 1998, 2015], в частности по датировке криогенных оползней [Лейбман и др., 2000; Горланова, 2002; Николаев, Самсонова, 2012], а также возрастающего интереса научного сообщества к кустарниковым хронологиям при оценке ландшафтно-климатической динамики Арктики [Schweingruber, Poschlod, 2005; Schweingruber, Rump, 2010; Myers-Smith et al., 2011; Alsos et al., 2012; Buchwal et al., 2013; Buchwal, 2014]. Известен опыт использования кольцевых структур деревьев при изучении криогенных процессов на территории Якутии, в частности, при оценке динамики лесов, наледей, реконструкции развития термокарстовых озер и термокарстовых депрессий [Николаев, Петров, 2009; Николаев, 2010, 2011; Николаев, Скачков, 2012].

Изучение объекта подобного рода дендрохронологическим методом предпринято впервые. Цель исследований – реконструкция геоморфологических процессов формирования газового бугра с применением дендрохронологических индикаторов. Исходя из методологии дендроиндикации [Горчаковский, Шиятов, 1985; Methods..., 1990], авторы полагали, что процессы формирования бугра, а также его разрушения нашли отражение в параметрах годовых колец и могут быть датированы при анализе древесно-кольцевых хронологий (ДКХ). Поскольку полевые работы проводились после газового выброса, для интерпретации параметров ДКХ необходимо было реконструировать расположение исследуемых кустарников относительно вершины и склонов бугра по материалам космоснимков с применением геоморфологических и геоботанических методов. В свою очередь предполагалось, что анализ реакции ДКХ на изменение положения кустарников в мезорельефе поможет подтвердить или уточнить исходное местоположение выброшенных блоков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

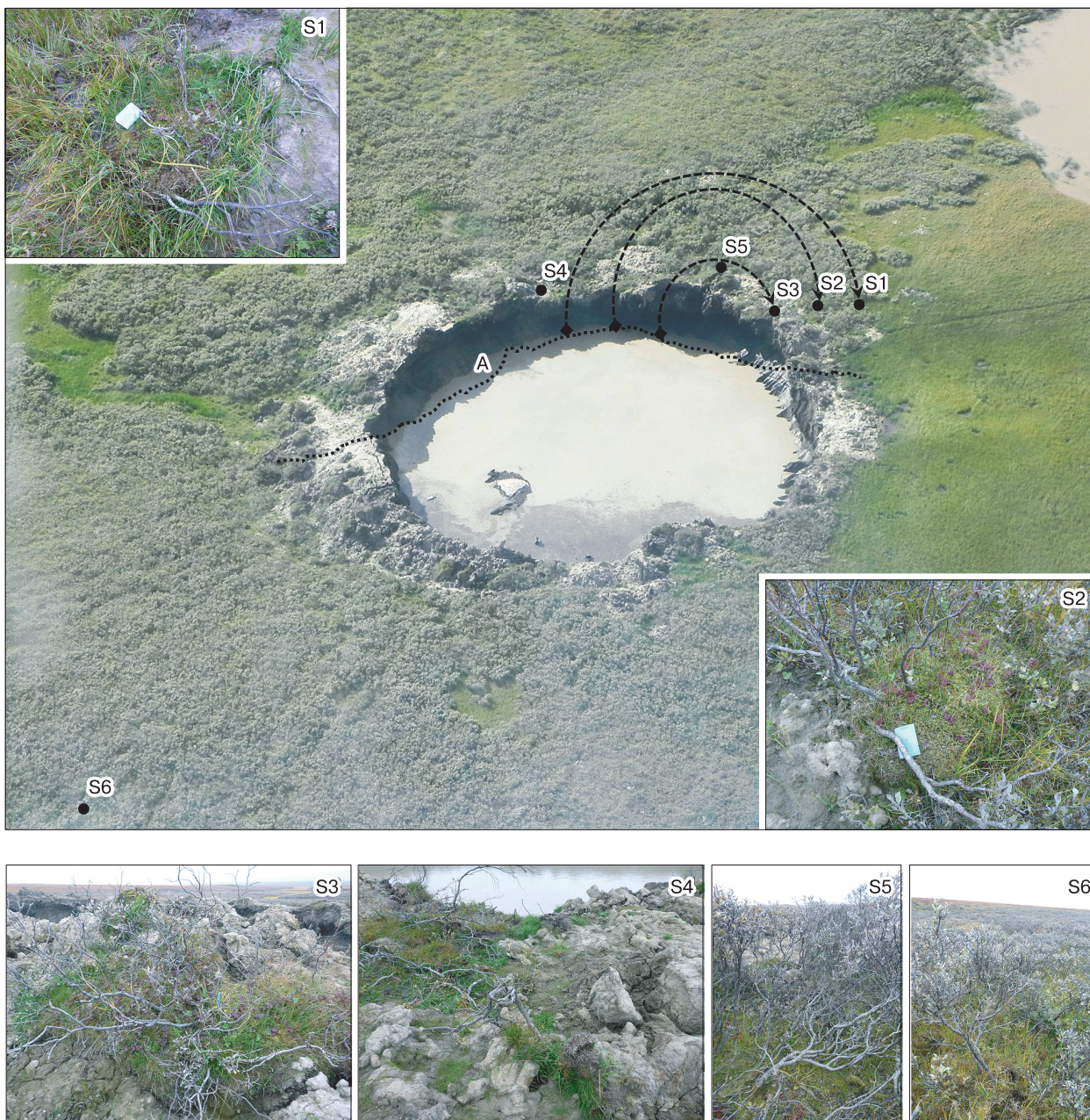
### Отбор образцов кустарников и построение ДКХ

Образцы ивы для исследования собраны в августе 2015 г. Возможности полевого опробования

были ограничены как по времени, так и в части сохранности кустов после выброса. Удалось отобрать пять стволиков ивы мохнатой (*Salix lanata*) с существовавшего бугра, спилены сделаны ниже узла кушения. Эти кустарники (образцы S1–S5) произрастали в пяти различных локусах поверхности бугра от его вершины и склонов до основания (рис. 1). Образец S6, отобранный в 54 м от края воронки в фоновой тундре, рассматривается в качестве контроля, не испытывавшего влияния процесса формирования бугра. Локусы S5 и S4 представлены ивой, сохранившейся *in situ* соответственно на пологом склоне бугра и, вероятно, внизу крутой его части (у края воронки по состоянию на 2015 г.) (см. рис. 1). Еще три локуса представлены ивой, сохранившейся на выброшенных блоках породы с дерниной.

Для реконструкции положения этих блоков на бугре принималось, что наиболее удаленные от оси воронки фрагменты в исходном состоянии с наибольшей вероятностью были ближе к его вершине. В пользу этого свидетельствует изучение расстояния разлета осколков породы при вулканических извержениях, определяемого при прочих равных условиях расстоянием осколка от оси эруптивной колонны [Carey, Sparks, 1986; Wohletz, Heiken, 1992]. По дальности нахождения блока от края воронки, а также по фитоиндикаторам его растительного покрова [Природа..., 1995] авторы предположили, что блок с ивой S3, наименее удаленный от оси воронки, исходно принадлежал к верхней части склона бугра, S2 – к вогнутой поверхности с толстой моховой подушкой уже в пределах вершины бугра, а S1 – к дренированной поверхности вершины (см. рис. 1).

Стволик кустарника с его регистрирующими структурами (годовыми кольцами) рассматривался как вынесенный на поверхность датчик-самописец состояния кровли бугра в локусе площадью порядка 1–3 м<sup>2</sup>, а информация с него считывалась при измерении ширины колец и анализе ДКХ. Для построения ДКХ использовали общепринятые методы с учетом особенностей прироста стелющихся кустарников [Арефьев, 2015; Methods..., 1990]. Поскольку кустарники на выброшенных блоках были единичны, для каждого локуса взято по одному стволику, но с измерением ширины колец не менее чем на трех срезах, взятых на разных участках стволика (в его основании, обычно находящемся подо мхом, на 1/3 и 2/3 его длины, включая развилки). Всю поверхность среза зачищали лезвием, контрастировали меловой пудрой. На каждом срезе измерения проводили под микроскопом с точностью до 0.01 мм по двум перпендикулярным диаметрам, по возможности по четырем радиусам. Всего на реконструированном профиле измерения проведены на 103 радиусах, от 10 до 31 для разных локусов.



**Рис. 1.** Местоположение точек отбора образцов кустарника (S1–S6) в районе Ямальской воронки (вид с вертолета, фото А.В. Хомутова от 15.08.2015 г.) и состояние местности на момент отбора (вкладки S1–S6, фото А.В. Хомутова от 02.09.2015 г.).

А – реконструированная линия поверхности бугра [Кизяков и др., 2015]; стрелками показано реконструированное перемещение блоков породы с ивой при выбросе.

При перекрестной датировке полученных кольцевых серий использовали известные ДКХ со смежных территорий [Арефьев, 1998, 2015; Лейбман и др., 2000; Николаев, Самсонова, 2012]. Датировка колец отдельных радиусов каждого среза выполнялась с дополнительным отслеживанием сомнительных и выпадающих колец по всей его

окружности под микроскопом, затем выполнялась перекрестная датировка ДКХ с разных спилов и разных образцов. Далее для каждого локуса рассчитывали ряды средней ширины годичных колец (абсолютные ДКХ), в которых информация о локальных факторах, определяющих рост кустарника, накладывается на единый для данной террито-

рии макроклиматический фон. Кроме того, для каждого радиуса рассчитывали стандартные индексы ширины колец с дальнейшим построением рядов средних индексов. Такая процедура позволяет исключить влияние локальных факторов и максимально приблизить индивидуальные ДКХ к общему виду. Стандартизацию ДКХ проводили методом тройного экспоненциального скользящего среднего (ТМА) с равными весами [Грешилов и др., 1997]:

$$EMA_1 = (p_1 + EMA_0)/2, \dots, EMA_t = \\ = (p_t + EMA_{t-1})/2, EMA_0 = p_1; I_t = p_t/TMA_p,$$

где  $p$  – абсолютная ширина кольца;  $t$  – позиция временного ряда;  $EMA$  – скользящее среднее первого порядка;  $TMA$  – скользящее среднее третьего порядка;  $I$  – индекс ширины кольца.

Этот метод не позволяет выявлять вековые климатические тренды, поэтому редко применяется в дендрохронологии [Methods..., 1990]. Однако использование сплайна с предельно малым окном целесообразно в силу особенностей рассматриваемых кустарниковых кольцевых рядов – их малой длины, высокой частоты аномальных значений, нарушения стационарности на фоне активных геоморфологических процессов. Такая стандартизация ДКХ кустарников дает более высокий и достоверный отклик на климатические параметры по сравнению с широко применяемым методом негативного экспоненциального сглаживания, использованным авторами ранее [Арефьев, 2015].

Параметры множественной регрессии стандартизованных ДКХ по климатическим рядам определяли в программе STATISTICA (v. 10). Для оценки отклика ДКХ на климатические факторы использовали параметр  $\beta$  – нормированный коэффициент регрессии, изменяющийся в пределах от  $-1$  до  $+1$ . В той же программе проводили кластерный анализ ДКХ, при этом наиболее показательные результаты дал метод простого евклидова расстояния.

Для характеристики локальных условий произрастания кустарников в период 1977–2013 гг. по абсолютным измерениям рассчитывали: 1) среднюю ширину кольца – показатель бонитета почвенно-климатических условий (т. е. потенциальной высоты, которой может достигнуть кустарник в данных условиях); 2) коэффициент вариации ширины кольца – показатель стабильности этих условий; 3) коэффициент чувствительности ДКХ [Douglass, 1936] – показатель лимитирующего воздействия внешних факторов, пропорциональный уровню физиологического стресса кустарника [Арефьев, 1998]; 4) автокорреляцию ДКХ первого порядка – показатель связи прироста текущего и предыдущего годов, в биологическом смысле характеризующий гомеостатическую способность кустарника сохранять относительное постоянство

внутренней среды в условиях непостоянства внешних условий произрастания (табл. 1).

### Дендрохронологическая индикация высоты снежного покрова

В условиях тундры абсолютный прирост кустарников определяется как единичными для данной территории климатическими факторами, в первую очередь летней температурой воздуха [Арефьев, 2015], так и локальными факторами, прежде всего глубиной сезонноталого слоя, ветровым режимом, высотой снежного покрова, предохраняющего побеги от вымерзания и повреждения поземкой [Горчаковский, Шиятов, 1985; Природа..., 1995]. В подзоне типичных тундр Ямала побеги ивы выживают только под прикрытием снега, а высота и абсолютный прирост ивы обычно пропорциональны глубине снежного покрова. Максимальный прирост кустарников отмечается в долинах рек и ручьев, где высота снежного покрова и глубина сезонноталого слоя достигают наибольших значений. Возрастная кривая в хронологиях радиального прироста кустарниковых ив в типичных тундрах практически не прослеживается [Арефьев, 1998, 2015]. Это позволяет использовать ряды абсолютного прироста ивы для индикации условий внешней среды и без дополнительных преобразований, исключающих возрастные особенности роста.

Положительная связь радиального прироста с высотой снежного покрова установлена и для деревьев северной криолитозоны [Николаев, Скачков, 2011, 2012], где высота снежного покрова определяет температурный режим почвогрунтов [Некрасов, 1981]. При малой его высоте происходит сильное промерзание корнеобитаемого слоя в зимний период, что отрицательно сказывается на радиальном приросте деревьев в последующий год. В этом плане важны также сроки установления и схода устойчивого снежного покрова, его максимальная высота [Поздняков, 1986; Николаев, Скачков, 2012].

Индикация кустарниками высоты снежного покрова имеет принципиальное значение при реконструкции роста бугра, поскольку по мере роста зона его влияния на высоту снежного покрова увеличивается, а кустарники, растущие на бугре, со временем могут подниматься из зоны с высоким снежным покровом у основания бугра в зону, где снег с бугра сдувается ветром.

### Расчет дендрохронологических диссонансов

Стандартизованные ДКХ тундровых кустарников Ямала, отражающие в основном фоновый макроклиматический сигнал, обычно характеризуются высокой синхронностью и корреляцией [Николаев, Самсонова, 2012; Арефьев, 2015]. На некоторых участках ДКХ такая согласованность может отсутствовать из-за воздействия нарушающих факторов [Арефьев, 2003]. Как показали исследо-

Таблица 1. Характеристика древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) ивы на месте воронки

ДКХ	Происхождение	Состояние кустарника	Растительный покров	Проективное покрытие по ярусам, %	Годы роста	Возраст (на 2013 г.), лет	Число радиусов	Прирост за 1977–2013 гг.			
								Средний, мм	Вариация, %	Чувствительность	Автокорреляция
S1	Выброшенный на 11.5 м от края воронки блок с вершины бугра	Моховая дернина толщиной 4–6(8) см; ива погибшая, сломлена	<i>Salix lanata</i> <i>Carex</i> sp. <i>Rubus arcticus</i> <i>Polemonium</i> sp. <i>Petasites frigidus</i> <i>Poa</i> sp. <i>Hylocomium splendens</i> + <i>Pleurozium schreberi</i>	<10 60 <5 <5 1 1 20	1951–2014	63	10	0.20	88.2	0.34	0.56
S2	Выброшенный на 6 м блок с вершинной части бугра	Моховая дернина; ива погибшая длиной 0.8–1.0 м	<i>Salix lanata</i> <i>Carex</i> sp. <i>Rubus arcticus</i> <i>Petasites frigidus</i> <i>Pleurozium schreberi</i> <i>Polytrichum</i> sp.	50 20 15 1 70 5	1948–2013	66	12	0.16	55.2	0.36	0.29
S3	Выброшенный блок на бруствере у края воронки, с круглого склона бугра	Моховая дернина; ива живая длиной 0.7–0.8 м	<i>Salix</i> sp. <i>Carex</i> sp. <i>Rubus arcticus</i> <i>Ranunculus borealis</i> <i>Polemonium</i> sp. <i>Pleurozium schreberi</i>	15 25 25 <5 1 30	1976–2015	38	12	0.21	51.2	0.27	0.49
S4	Склон бугра у края воронки, частично погребенный матриалом бруствера	Ива погибшая, сломлена	<i>Salix</i> sp. <i>Carex</i> sp. <i>Rubus arcticus</i> <i>Polemonium</i> sp. <i>Salix nummularia</i> <i>Petasites frigidus</i>	10 30 5 <5 1 1	1965–2014	49	15	0.30	47.5	0.26	0.61
S5	Пологий склон бугра в 6 м от края воронки	Ива живая высотой 0.6 м над поверхностью, с развилкой ствола	<i>Salix lanata</i> <i>Carex</i> sp. <i>Rubus arcticus</i> <i>Petasites frigidus</i> <i>Pleurozium schreberi</i>	70 40 5 1 80	1924–2015	90	31	0.28	49.8	0.29	0.41
S6	Фоновый слабодренированный участок в 54 м от края воронки	Ива живая высотой 0.8 м над поверхностью, с развилкой	<i>Salix lanata</i> <i>Carex</i> sp. <i>Polemonium</i> sp. <i>Pleurozium schreberi</i>	70 60 <5 70	1935–2015	79	23	0.33	41.2	0.25	0.49

вания А.Н. Николаева и В.В. Самсоновой на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ), нарушение согласованности ДКХ кустарниковых ив наблюдается в криогенных оползнях [Николаев, Самсонова, 2012]. В нашем случае несогласованность участков ДКХ ивы с бугра, с одной стороны, и ДКХ ивы с контроля, с другой, может рассматриваться как свидетельство локальных напряжений при формировании бугра. Такую несогласованность ДКХ мы обозначаем как ДКХ-диссонанс.

Для выявления ДКХ-диссонансов использован скользящий коэффициент корреляции Пирсона  $r_t$  с предельно малым окном, относимый к конечной дате окна  $t$  [Арефьев, 2003], давший лучшие результаты по сравнению с более грубыми непараметрическими ранговыми коэффициентами; расчет вели на стандартизованных рядах.

Использованы данные по метеостанции Марре-Сале [http://Aisori.meteo.ru/ClimateR], находящейся в 50 км на юго-запад от бугра.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Характеристики древесно-кольцевых хронологий

Самая продолжительная хронология ивы получена с пологого склона бугра (S5), она начина-

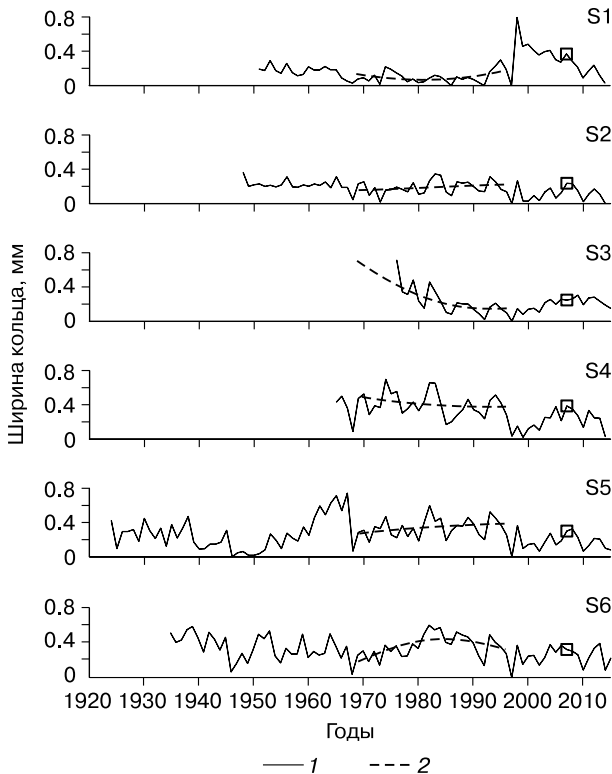


Рис. 2. Абсолютные хронологии (линии 1) ширины колец кустарников (мм) в зоне выброса.

Линии 2 – полиномиальные 2-й степени тренды хронологий за период 1969–1996 гг.; квадратиком выделено окно для оценки согласованности хронологий на 2008 г.

ется с 1924 г., возраст ивы на момент выброса составил 90 лет, что близко к ее предельному возрасту. На реконструированном профиле от фоновой тундры до вершины бугра прослеживается нелинейное, но упорядоченное изменение возраста ивы: в фоновой тундре и на примыкающем к ней пологом склоне бугра (S6 и S5) он наибольший (79–90 лет), далее на крутом склоне (S4 и S3) он наименьший (49 лет в нижней его части и 38 лет в верхней), наконец, на вершине бугра (S1 и S2) возраст кустарника составил 63–66 лет (см. рис. 1, табл. 1).

Упорядоченность прослеживается и в изменении других параметров ДКХ ивы на профиле. По направлению от фоновой тундры к вершине бугра средняя ширина годичных колец последовательно уменьшается от 0.33 до 0.16–0.20 мм, а ее вариация, наоборот, увеличивается от 41.2 до 88.2 %, причем в дренированном локусе вершины S1 она наибольшая. Чувствительность ДКХ также последовательно увеличивается от 0.25 в фоновой тундре до 0.34–0.36 на вершине. Наибольшая автокорреляция ДКХ отмечается в локусах крутого склона бугра S3 и S4 (0.46 и 0.61), несколько меньше ее уровень в низких локусах S5 и S6 (0.41 и 0.49). На вершине бугра автокорреляция колеблется от самого низкого значения на моховой подушке S2 (0.29) до сравнительно высокого в дренированном локусе S1 (0.56).

Доля выпадающих колец в среднем составила 5.5 % (S1 – 6.0 %; S2 – 9.9; S3 – 5.2; S4 – 8.3; S5 – 3.7; S6 – 6.2 %).

Отмеченные закономерности свидетельствуют в пользу правильности реконструкции профиля. Судя по приведенным выше параметрам ДКХ, в фоновой тундре и на пологом склоне бугра, где взяты наиболее продолжительные ДКХ, условия для роста ивы были в целом наиболее стабильными и благоприятными. В локусах, относимых к вершине бугра, условия для роста ивы сформировались (или восстановились) позже, к концу депрессивных для кустарников 1940-х гг. с холодными летними сезонами (рис. 2, 3). Условия для ивы в ло-

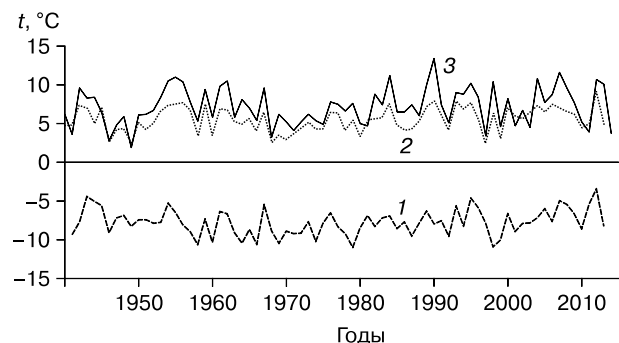


Рис. 3. Многолетний ход средней годовой (1), летней (2) и июльской (3) температуры воздуха  $t$  по данным метеостанции Марре-Сале.

кусах вершины бугра были наименее благоприятными с самого начала ее роста там, из чего можно заключить, что к концу 1940-х гг. бугор уже возвышался над поверхностью, при этом сдувание снега с его вершины было причиной угнетенного состояния кустарника.

Позднее всего (1965–1976 гг.) условия для роста ивы появились в локусах, находившихся к моменту выброса на крутом склоне бугра (S3 и S4). Сравнительно низкая чувствительность и высокая автокорреляция ДКХ ивы со склона указывают на воздействие факторов, определявших особый почвенно-климатический режим в этих локусах.

#### Анализ пространственно-временных изменений ДКХ

Сравнительный анализ абсолютных ДКХ, фиксирующих все фоновые и локальные факторы, влияющие на рост кустарников, показывает как сходство, так и различия хода роста ивы в разных локусах бугра (см. рис. 2). В большинстве ДКХ отмечаются годовые отрицательные аномалии прироста, судя по рис. 2 и 3, приходящиеся на годы с неблагоприятными условиями сезона вегетации (холодное короткое лето): 1941, 1946, 1949, 1968 (по S4, S5), 1980, 1985, 1992, 1997, 2010, 2014 гг. (см. рис. 2, 3). Положительные годовые аномалии прироста ивы, обычно синхронные теплым продолжительным сезонам вегетации, приходятся на 1938, 1953, 1956, 1965, 1974, 1982, 1989, 1993, 1998, 2007, 2012 гг. (см. рис. 2, 3). Даты и климатические причины этих аномалий согласуются с результатами изучения ДКХ ивы как на территории Бованенковского ГКМ в 50 км севернее [Арефьев, 1998, 2015; Николаев, Самсонова, 2012], так и на геокриологическом полигоне “Васькины Дачи” в 40 км к востоку от воронки [Лейбман и др., 2000].

Многолетний период уменьшения прироста ивы, связанный с холодными вегетационными сезонами 1940-х гг., прослеживается в ДКХ фоновой тундры (S6). Но особенно глубокой и продолжительной депрессия была в самом нижнем локусе склона бугра (S5), где у кустарника в период с 1939 по 1952 г. отмечалось выпадение колец, а их средняя ширина была близка к нулю (см. рис. 2). Начало роста ивы в более высоких локусах бугра зафиксировано не раньше, чем с конца этого периода. При этом в локусе вершины бугра S2, где оно датируется 1948 г., в этот период депрессия прироста ивы не отмечается. Напротив, в 1948 г. ширина годичного кольца была наибольшей за весь период жизни стволика (0.36 мм), а в следующем 1949 году аномально падения прироста, как в S5 и S6, не было. Можно предположить, что локус S2, находившийся в 2013 г. на вершине бугра, в 1948–1949 гг. был еще в зоне невысоких снежных заносов на небольшой высоте вблизи тогдаш-

ней вершины бугра или у его подножия, но вскоре был поднят растущим бугром на обдуваемую от снега высоту. В локусе вершины S1, где начало роста ивы датируется 1951 г., такой картины не прослеживается: первые кольца были узкими (0.19–0.18 мм), уменьшение прироста в конце 1960-х гг. (до уровня примерно 0.1 мм) связано с аномально холодным летним сезоном, что отмечается и в других локусах.

Не вполне ясна причина интенсивного роста ивы в S5 (до 0.74 мм) по сравнению контролем S6 (не более 0.50 мм) в 1960-х гг. Следует иметь в виду, что на 1957 г. приходится рубеж эпох атмосферной циркуляции [Кононова, 2015], определяющих помимо прочего основные румбы и скорость ветров, а значит, и положение снежных заносов относительно бугра, что отражается на росте кустарников. С 1998 г. отмечаются признаки перехода к северной меридиональной циркуляции с наибольшим разнообразием и наименьшей устойчивостью циркуляционных режимов [Кононова, 2015]. Таким образом, очертания метеорологической зоны влияния бугра на прирост кустарников могли изменяться в зависимости от типа атмосферной циркуляции, но на протяжении циркуляционных эпох и периодов ориентация этой зоны относительно бугра определялась преобладающим румбом ветров прежде всего снежного периода.

Прирост ивы на вершине бугра (S1, S2) в меньшей степени зависит от направления ветров, поскольку при любом из них снег с вершины сдувается, и прирост кустарника постоянно лимитирован малой высотой снежного покрова и нивацией. В результате ива на вершине образует низкие распластанные формы и характеризуется в целом малой (менее 0.2 мм) хронически депрессивной шириной годичных колец. В локусе S1 ширина колец ивы до 1995 г. была наименьшей (в среднем около 0.1 мм), однако позднее она резко увеличилась (до 0.80 мм в 1998 г.), что показывает влияние дополнительного локального фактора, которым, судя по всему, было образование трещины в кровле бугра.

По склону бугра с уменьшением высоты наблюдается пространственно-временное смещение фаз депрессии и подъема прироста ивы (см. рис. 2). В верхней части склона S3 прирост ивы перешел в депрессивную фазу (0.1–0.2 мм) в 1985–2002 гг. Ниже по склону бугра и на контроле (S4–S6) глубокая депрессия отмечается позднее, в 1997–2002 гг. Ее инициировали крайне неблагоприятные климатические условия лета 1997 г., приведшие не только к почти тотальному выпадению кольца этого года, но и к усыханию части ветвей ивы и длительному уходушению ее жизненного состояния в целом. Депрессию усугубили неблагоприятные условия 1999 г. Восстановления прироста ивы до прежнего уровня в этих локусах (и в S2

на вершине) не произошло вплоть до 2013 г. Только в двух верхних локусах бугра (S1 и в меньшей степени в S3) ширина колец превзошла уровень, существовавший до 1997 г.

Учитывая пролонгированное негативное влияние аномально холодных летних сезонов на прирост ивы, многолетние закономерности ее роста лучше всего рассмотреть на промежутке между двумя наиболее глубокими отрицательными аномалиями 1968 и 1997 гг. Заметим, что он совпадает с наиболее устойчивым периодом эпохи южной атмосферной циркуляции [Кононова, 2015]. Аппроксимация ДКХ на этом временном промежутке полиномом 2-й степени показывает закономерную картину изменения тренда прироста ивы в зависимости от ее положения на бугре (см. рис. 2). В фоновой тундре (S6) после неблагоприятного 1968 года наблюдается постепенное восстановление прироста с 0.25 мм до высокого уровня (около 0.5 мм) в первой половине 1980-х гг., а затем некоторое его уменьшение.

На пологом склоне бугра (S5) восстановление уровня прироста сначала происходило аналогично, но затем отмечалось некоторое увеличение прироста до конца рассматриваемого периода, что может свидетельствовать об увеличении высоты снежного покрова в ветровой тени растущего бугра, благоприятном для роста ивы. Заметим, что только для этого локуса зафиксирована достоверная множественная регрессия абсолютного прироста ивы с количеством осадков в предшествовавший образованию кольца зимний период ( $R = 0.58$ , уровень значимости  $p = 0.02$ ), при этом значимыми факторами регрессии являются суммы осадков ноября ( $\beta = 0.45$ ) и января ( $\beta = 0.36$ ). Это говорит о том, что уровень снежного покрова в локусе определялся в значительной степени фоновыми факторами, а влияние на него локальных факторов было наименьшим по сравнению с другими локусами.

В нижней части крутого склона (S4) восстановление прироста до высокого уровня 0.48 мм произошло уже в 1969 г., что указывает на большую высоту снежного покрова в локусе в эти годы; затем на протяжении рассматриваемого периода прирост ивы остается на почти постоянном уровне со слабой тенденцией к уменьшению.

Наконец, в верхней части склона ива стала расти только с 1976 г., образуя сначала очень широкие кольца (до 0.72 мм), характерные для потенциально наиболее высоких стволиков и соответствующие высокому уровню снега. При этом в данном локусе сразу проявляется тренд к уменьшению прироста: уже к 1985 г. он падает до 0.1 мм (0.2 мм на аппроксимирующей кривой), что соответствует приросту распадающихся кустов ивы на вершине бугра, где снег сдувается ветром. Это может свидетельствовать о том, что в течение 10 лет

по мере роста бугра произошел выход локуса S3 из зоны высоких снежных заносов и перемещение его вверх по склону в обдуваемую зону с увеличением высоты на величину порядка 0.8 м (высота ивы в зоне больших снежных заносов, см. табл. 1). Таким образом, скорость роста высоты бугра по грубой оценке могла составить около 8 см в год, а своей финальной высоты 5–6 м бугор мог достигнуть за 62–75 лет.

Заметим, что в самой длинной хронологии S5 наиболее четко выделяются депрессии 1939–1949 и 1997–2010 гг., временной интервал между которыми составляет около 60 лет. Это близко к 61–65-летнему циклу, характерному для ДКХ Полярного Урала [Шиятов, 1986], а также к циклу системы “атмосфера–арктические льды–океан” [Семенов, 2015]. По продолжительности такой цикл близок к периоду от начала роста ивы на вершине бугра до его разрушения (63–66 лет).

Обобщенную картину отмеченных изменений ДКХ профиля дает кластерный анализ, проведенный на временных отрезках 1978–1996 и 1997–2013 гг., разделенных 1997 г. с почти нулевым приростом ивы (на этих отрезках представлены все шесть рассматриваемых локусов).

Кластеризация хронологий абсолютного прироста учитывает все внешние факторы, влияющие на ширину годичного кольца, как фоновые, так и локальные. По ее результатам на отрезке до 1997 г. выделяется два кластера: фоновый, включающий контроль S6 и нижние локусы S4, S5, и находящийся под влиянием процессов формирования бугра, включающий верхние локусы S1, S2, S3 (рис. 4, а). После 1997 г. образуется три кластера: дренированный локус вершины бугра S1; остальные локусы бугра; контроль S6 (см. рис. 4, б).

Кластеризация стандартизованных ДКХ распределяет их по особенностям влияния фоновых макроклиматических факторов на прирост ивы в разных локусах (например, как один и тот же климатический фон по-разному влияет на прирост деревьев в сухом и заболоченном лесах). На отрезке до 1997 г. наблюдается постепенное нарастание различий стандартизованных ДКХ от контроля (S6) к вершине бугра (S1), что обусловлено усилением преобразования фонового макроклиматического сигнала в приросте ивы локальными условиями бугра по мере приближения к его вершине (см. рис. 4, в, г). После 1997 г. образуется три кластера ДКХ: S4 из нижней части крутого склона бугра, наиболее обособленный от прочих; дренированные локусы S3, S1; слабодренированные мшистые локусы S6, S5, S2.

Описанные закономерности кластеризации ДКХ подтверждают изложенные при анализе кривых абсолютного прироста выводы об увеличении размеров бугра, а также о нарастании деформационно-разрушительных процессов в его куполе. Су-

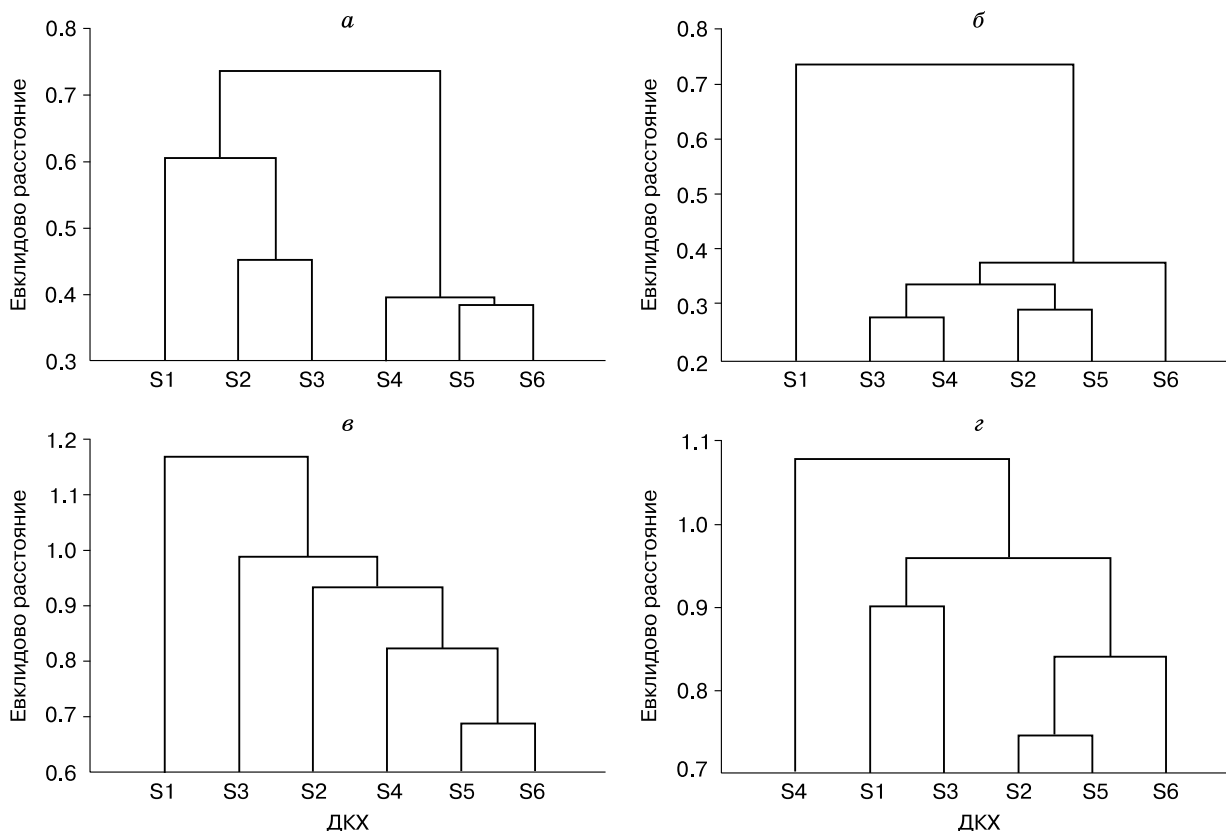


Рис. 4. Изменение кластерного положения ДКХ ивы в процессе роста бугра.

Абсолютная ширина колец: а – 1978–1996 гг., б – 1997–2013 гг.; стандартизованная ширина колец: в – 1978–1996 гг., г – 1997–2013 гг.

для по ним, до 1997 г. нижний локус S5 еще не вошел в зону влияния бугра, а локус S4, хотя и испытывал его воздействие, оно не влекло многолетних изменений прироста ивы, значительно отличающихся от контроля. После 1997 г. локусы S5 и S4 вошли в зону влияния формирующегося бугра, причем S4 стал испытывать наибольшее влияние. В это же время на вершине бугра происходила дифференциация состояния отдельных локусов, что свидетельствует о локальных нарушениях поверхности, например, об образовании трещин. На таком нарушенном участке вершины (S1) прирост ивы резко увеличивался в результате дренажа, повышения температуры СТС, а также защищенности от инвазии простирającegoся в трещине стволика.

#### Особенности влияния фоновых климатических факторов на прирост ивы с бугра

Для поиска индикаторов бугров-предшественников воронок определены параметры множественной регрессии стандартизованного прироста ивы из фоновой тундры (S6) и с бугра (совокупная ДКХ S1–S5) со среднемесячными температурами воздуха за временной промежуток с весны года  $t - 1$ , предшествовавшего году образования коль-

ца, по август года  $t$  образования кольца. Единственным значимым компонентом регрессии в обоих случаях является температура воздуха в июле, ее отклик  $\beta$  составляет 0.6–0.7. При этом отклик ДКХ с бугра в летний период запаздывает по сравнению с контролем: на июньскую температуру воздуха он ниже, чем на контроле, а на августовскую – выше (рис. 5). Аналогичное запаздыва-

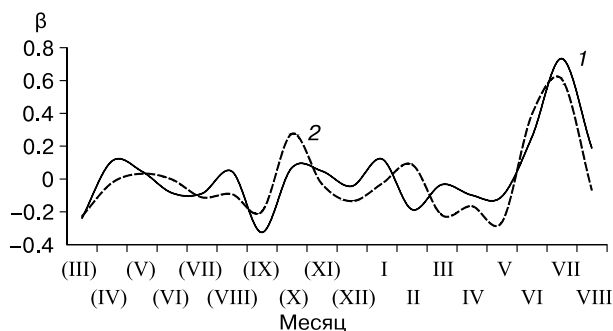


Рис. 5. Отклик  $\beta$  стандартизованного прироста ивы с бугра S1–S5 (линия 1) и из фоновой тундры S6 (линия 2) в год  $t$  на среднемесячные температуры воздуха в год  $t - 1$  (в скобках) и в период 1977–2013 гг.

Таблица 2. Параметры регрессии ДКХ бугра по среднемесячным температурам воздуха  $t$  и месячным суммам осадков  $h$  предыдущего (в скобках) и текущего годов для разных месячных комбинаций

ДКХ	Параметр	$t$					$t, [h]$	
		VI-VIII	V-VIII	III-VIII	(VI-VIII), VI-VIII	(V-VIII), V-VIII	VI-VIII	V-VIII
S6	$M$	VII	VII	VII	VII	VII	VII, [h: VII]	VII
	$p$	0.001	0.001	0.0009	0.005	0.009	0.002	0.005
S5	$M$	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII
	$p$	0.0001	0.0002	0.0003	0.0009	0.0003	0.0003	0.002
S4	$M$	VII, VIII	VII, VIII	VII, VIII	VIII	VIII	VIII	VIII
	$p$	0.001	0.003	0.02	0.01	0.04	0.01	0.04
S3	$M$	VII	VII	VII	VII	VII	VII	–
	$p$	0.001	0.003	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02
S2	$M$	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII
	$p$	0.001	0.001	0.003	0.009	0.008	0.004	0.01
S1	$M$	VII, VIII	VII, VIII	VII, VIII	VII	VII	VII, VIII	VIII
	$p$	0.0002	0.0002	0.001	0.0005	0.001	0.0009	0.0004

Примечание.  $M$  – значимые компоненты (месяц);  $p$  – уровень достоверности модели регрессии.

ние было отмечено у ДКХ ивы, отобранной на севере Гыданского полуострова, по сравнению с ДКХ ивы с севера п-ова Ямал [Арефьев, 2015].

Детальнее это запаздывание рассмотрено на регрессионных моделях, дающих достоверную множественную корреляцию  $R$  стандартизованной ширины колец ивы с климатическими факторами, составляющую от 0.61 до 0.74 для разных локусов (табл. 2). В четырех из шести локусов, включая контроль, единственным значимым компонентом регрессии является июльская температура воздуха. Но в дренированном локусе вершины бугра S1 и особенно в локусе основания крутого склона бугра S4 значимым компонентом становится температура воздуха в августе. Более того, в S4 она чаще всего является единственным значимым компонентом. Именно эти два локуса при кластеризации по евклидову расстоянию были наиболее обособлены от прочих в период после 1997 г. (см. рис. 4). Очевидно, отклик ДКХ ивы на фоновый климатический режим в этих локусах в наибольшей степени изменен процессом формирования бугра. Существенный отклик ДКХ на августовскую температуру воздуха в Субарктике был отмечен только для лиственницы с крайнего северо-востока Якутии [Ваганов и др., 1996].

**Закономерности проявления ДКХ-диссонансов на бугре**

Анализ согласованности стандартизованных ДКХ ивы бугра с ДКХ контрольной ивы позволил выявить ряд ДКХ-диссонансов (рис. 6), которые, как сказано выше, рассматриваются в качестве индикатора напряжений, возникающих в породах бугра в процессе его роста. Для наглядного примера окно расчета ДКХ-диссонанса 2008 г. выде-

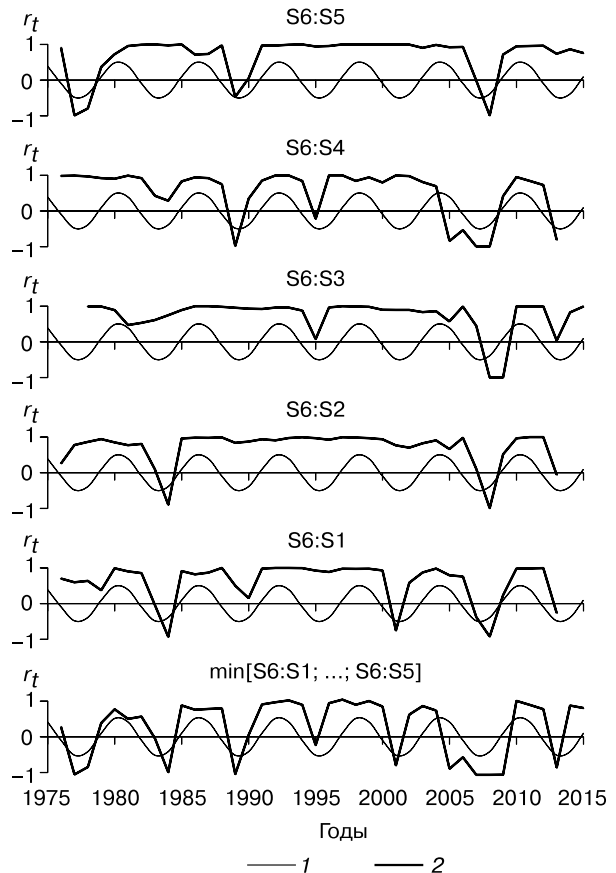


Рис. 6. Изменение согласованности  $r_t$  между ДКХ бугра S1–S5 и ДКХ фоновой тундры S6 (линии 2) и в рамках 6-летнего цикла (линии 1).

Таблица 3. Датировка и проявленность ДКХ-диссонансов на бугре

Локус бугра	Год диссонанса						
	1977	1984	1989	1995	2001	2008	2013
S5	+		+			+	
S4		+	+			+	+
S3				+		+	+
S2		+	+			+	+
S1	+	+	+		+	+	+
Число локусов с диссонансом	2	3	4	1	1	5	4

лено квадратиком на рис. 2. При отдельном рассмотрении ДКХ-диссонансов по каждому локусу (S6:S5 и др.) их проявление выглядит спонтанным. Однако хронология минимальных значений согласованности  $r_t$  в год  $t$  по всем пяти локусам бугра  $\min [r_t(S6:S1), \dots, r_t(S6:S5)]$  показывает синхронность и циклическую упорядоченность ДКХ-диссонансов бугра (см. рис. 6, табл. 3). Примечательно, что последний диссонанс пришелся именно на год разрушения бугра при газовом выбросе (2013-й).

ДКХ-диссонансы соответствуют году со сравнительно холодным летом и низким приростом ивы, который непосредственно следует за годом со сравнительно теплым летом или несколькими такими годами с высоким приростом кустарников (рис. 7).

Отчетливая 6-летняя цикличность ДКХ-диссонансов на бугре прослеживается на рис. 6. Из табл. 3 видно, что регулярность проявления этого цикла в разных локусах неодинаковая, наиболее регулярное проявление ДКХ-диссонансов наблюдается с периодом в 24 года (в 1989 и 2013 гг.). Аналогичную картину дает и метод автокорреляции.

Метод спектрального анализа Фурье также показывает наличие цикла ДКХ-диссонансов с периодом 5.4–6.0 лет, достоверно выявляются также 12- и 18-летний циклы (вероятно, кратные 6-летнему), циклы Вольфа с периодом 10.6–10.8 лет и Хэйла с периодом 20–21 год (рис. 8). При этом 5.4–6.0-летний и хэйловский циклы характерны для ДКХ Полярного Урала [Шиятов, 1986]. В качестве причин их возникновения указываются приливно-отливные силы Луны и Солнца [Яворский, 1975; Яворский и др., 1979], которые, очевидно, могут периодически дестабилизировать состояние бугра. Заметим также, что газовый выброс пришелся на пик солнечной активности Вольфа, зарегистрированный в 2011–2013 гг. [Обзор..., 2014]. Аналогичные ДКХ-диссонансы в локусах бугра соответствуют высоким пикам солнечной активности 1989 и 2000–2001 гг. Наоборот, ДКХ-диссонансы 1984, 2001, 2008 гг. были синхронны минимумам солнечной активности.

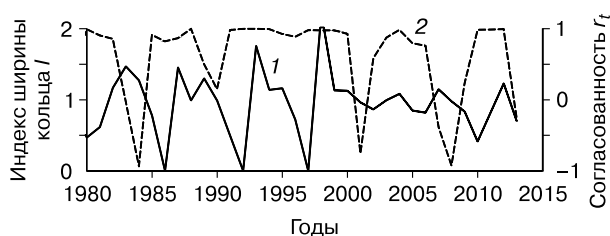


Рис. 7. Стандартизованная ДКХ фоновой тундры S6 (линия 1) и ее согласованность  $\min [r_t(S6:S1...S5)]$  с ДКХ бугра (линия 2).

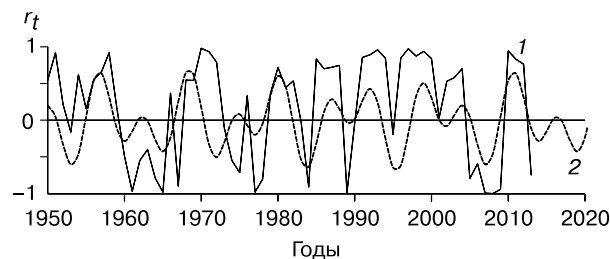


Рис. 8. Хронология согласованности прироста ивы с вершины бугра  $r_t(S1:S6)$  (линия 1) и ее аппроксимация гармоникой Фурье (линия 2), периоды 6 и 20 лет,  $r = 0.61$ .

## ВЫВОДЫ

Анализ древесно-кольцевых хронологий кустарников из района воронки, образовавшейся на Центральном Ямале в результате газового выброса, позволил установить следующее.

Находившийся на месте воронки газового выброса бугор, вероятно, начал формироваться в 1940-х гг. Об этом свидетельствует стабильно низкий уровень прироста ивы в локусе вершины бугра, характерный для обдуваемых ветром возвышенных участков, последовавший после повышенного его уровня в первые два года роста ивы (1948–1949 гг.). Аналогичная датировка начала роста бугра получена при расчете через ориентировочную скорость его роста, оцененную по ДКХ ивы со склона бугра.

В период с 1976 по 1985 г. высота бугра увеличилась приблизительно на 0.8 м. Об этом свидетельствует уменьшение уровня прироста ивы из верхнего локуса склона бугра, связанного, вероятно, с изменением положения ивы на бугре в процессе его формирования. Первоначально высокий прирост ивы соответствовал потенциальной высоте кустарника до 0.8 м и его нахождению в зоне снежных заносов внизу склона бугра. К концу этого периода, судя по низкой величине прироста, характерной для расплывчатых кустов, ива оказалась в обдуваемой ветром более высокой зоне склона. Это позволяет оценить вертикальную скорость роста бугра примерно в 8 см/год, а ориенти-

рочное время роста бугра до финальной высоты – в 62–75 лет.

Рост бугра в высоту и по диаметру продолжался в период 1997–2013 гг. вплоть до его разрушения при газовом выбросе. Об этом свидетельствует увеличение зоны влияния бугра на прирост ивы перед выбросом по сравнению с предыдущим периодом по результатам кластерного анализа ДКХ ивы из разных локусов профиля от фоновой тундры до вершины бугра.

Резкое увеличение прироста ивы в локусе вершины бугра в 1995–1998 гг., по-видимому, связано с возникновением трещин в кровле бугра и соответствующим увеличением дренированности и глубины сезонного протаивания вокруг трещин, а также с защитой растущего в трещине кустарника от нивации.

Диссонансы между ДКХ ив, растущих на бугре и в фоновой тундре, обусловлены локальными факторами формирования бугра и проявляются циклически с периодом в 6 лет. Цикл такой продолжительности связывается с действием приливно-отливных сил, возможно, влиявших на процесс развития бугра. В проявлении ДКХ-диссонансов выявлены также природные циклы Вольфа (10.6–10.8 лет) и Хэйла (20–22 года). Выброс 2013 г. пришелся на год ДКХ-диссонанса и пика цикла солнечной активности Вольфа.

Для некоторых локусов бугра установлена необычная для заполярной области достоверная детерминация древесно-кольцевого прироста не только июльскими, но и августовскими температурами воздуха в год образования кольца. Существование связи между шириной древесных колец ивы и температурой воздуха в августе может рассматриваться как индикатор процессов, приведших к газовому выбросу.

*Авторы выражают благодарность В.А. Глазнову за сделанные им описания растительного покрова.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-17-10203).*

## Литература

- Арефьев С.П.** Оценка состояния кустарниковой растительности тундр в районах освоения газоконденсатных месторождений среднего Ямала // Освоение Севера и проблема рекультивации: Докл. II Междунар. конф. Сыктывкар, 1994, с. 117–122.
- Arefyev, S.P., 1994. Evaluation of the condition of the shrub vegetation in the tundra in the areas of gas condensate production of Middle Yamal, in: Development of the North and Re-cultivation Issues: Proceedings of the II International Conference. Syktyvkar, p. 117–122. (in Russian)
- Арефьев С.П.** Хронологическая оценка состояния кустарниковых тундр Ямала // Сиб. экол. журн., 1998, № 3–4, с. 237–243.
- Arefyev, S.P., 1998. Chronological evaluation of the condition of the shrub tundras in Yamal. Sib. Ecol. Zhurn. No. 3–4, 237–243.
- Арефьев С.П.** Корреляционный анализ аномальности прироста деревьев и кустарников Тазовского полуострова // Дендрохронология: Достижения и перспективы: Материалы Всерос. совещ. Красноярск, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2003, с. 51.
- Arefyev, S.P., 2003. Correlation analysis of the growth anomaly in trees and shrubs on the Taz Peninsula, in: Dendrochronology: Achievements and Perspectives: proceedings of the all-Russia meeting with participation of foreign scientists, Sukachev Forest Institute, Krasnoyarsk, SB RAS, p. 51. (in Russian)
- Арефьев С.П.** Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарников на севере Ямала и Гыданского полуострова // Журн. Сиб. федерального ун-та. Сер. Биология, 2015, т. 8, № 4, с. 377–393.
- Arefyev, S.P., 2015. Fixation of climate warming in the grow ring chronologies in the north of Yamal and of the Gydan Peninsula. Zhurn. Sib. Federalnogo Un-ta, biology series 8 (4), 377–393.
- Ваганов Е.А.** Дендрохронологические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. Новосибирск, Наука, 1996, 246 с.
- Vaganov, E.A., Shiyatov, S.G., Mazepa, V.S., 1996. Dendrochronological Studies in Ural-Siberian Sub-Arctic. Nauka, Novosibirsk, 246 pp. (in Russian)
- Горланова Л.А.** Методика дендрохронологической датировки оползневых событий // Экстремальные криосферные явления: Фундаментальные и прикладные аспекты: Тез. Междунар. конф. М., Науч. совет по криологии Земли РАН, 2002, с. 148–149.
- Gorlanova, L.A., 2002. The method of dendrochronological dating of landslide events, in: Extreme Cryospheric Phenomena. Fundamental and Applied Aspects: abstracts of international conference. Moscow, Scientific Council on Earth Cryology, RAS, pp. 148–149. (in Russian)
- Горчаковский П.Л.** Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях / П.Л. Горчаковский, С.Г. Шиятов. М., Наука, 1985, 209 с.
- Gorchakovskiy, P.L., Shiyatov, S.G., 1985. Phytoindication of the Natural Conditions and Processes on Highlands. Nauka, Moscow, 209 pp. (in Russian)
- Грешилов А.А.** Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. М., Радио и связь, 1997, 112 с.
- Greshilov, A.A., Stakun, V.A., Stakun, A.A., 1997. Mathematical Methods of Making Forecasts. Radio i Svyaz, Moscow, 112 pp. (in Russian)
- Кизяков А.И., Союшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В.** Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.
- Kizyakov, A.I., Sonyushkin, A.V., Leibman, M.O., Zimin, M.V., Khomutov, A.V., 2015. Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal. Earth's Cryosphere, XIX (2), 15–25. (in Russian)
- Кононова Н.К.** Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундам. и прикл. климатология, 2015, № 1, с. 133–162.
- Kononova, N.K., 2015. Changes in atmospheric circulation of the Northern Hemisphere in XX–XXI centuries and their consequences for the climate. Fundam. i Prikl. Klimatologiya, No. 1, 133–162.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И., Арчегова И.Б., Горланова Л.А.** Этапы развития криогенного оползания на Югорском полуострове и Ямале // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 4, с. 67–75.
- Leibman, M.O., Kizyakov, A.I., Archegova, I.B., Gorlanova, L.A., 2000. Development stages of a cryogenic landslide on Yugra Peninsula and in Yamal. Earth's Cryosphere, IV (4), 67–75. (in Russian)

- Некрасов И.А.** Снежный покров и глубокое промерзание литосферы // Тематические и региональные исследования мерзлотных почв Северной Евразии. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 3–21.
- Nekrasov, I.A., 1981. Snow cover and deep freezing of the lithosphere, in: Thematic and regional studies of the permafrost soils of Northern Eurasia. Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, p. 3–21. (in Russian)
- Николаев А.Н.** Дендрохронологические исследования наледей Центральной Якутии // Лед и снег, 2010, № 1 (109), с. 93–102.
- Nikolaev, A.N., 2010. Dendrochronological studies of aufeis in Central Yakutia. *Led i Sneg*, No. 1 (109), 93–102.
- Николаев А.Н.** Дендрохронологический анализ природных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии): Дис. ... д-ра биол. наук. Якутск, 2011, 336 с.
- Nikolaev, A.N., 2011. Dendrochronological analysis of natural processes in the permafrost zone (Central Yakutia): Author's abstract, doctorate thesis (biology), Yakutsk, 336 pp.
- Николаев А.Н., Петров Р.Н.** Влияние криогенных процессов на лесные экосистемы Центральной Якутии // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса: Материалы Всерос. конф. с участием иностранных ученых. Красноярск, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2009, с. 124–127.
- Nikolaev, A.N., Petrov, R.N., 2009. The influence of cryogenic processes on the forest ecosystems of Central Yakutia, in: The environmental and geographic aspects of forest formation: proceedings of the all-Russia meeting with participation of foreign scientists, Sukachev Forest Institute, Krasnoyarsk, SB RAS, p. 124–127.
- Николаев А.Н., Самсонова В.В.** Влияние склоновых процессов на произрастание ивы на Ямале // Вестн. ТюмГУ, 2012, № 12, с. 195–203.
- Nikolaev, A.N., Samsonova, V.V., 2012. The influence of overland flow processes on the growth of willows in Yamal. *Vestn. TyumGU*, No. 12, 195–203.
- Николаев А.Н., Скачков Ю.Б.** Влияние динамики снежного покрова на рост и развитие лесов в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 3, с. 71–80.
- Nikolaev, A.N., Skachkov, Yu.B., 2011. Influence of the snow cover dynamics on the growth and development of forests. Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*, XV (3), 71–80. (in Russian)
- Николаев А.Н., Скачков Ю.Б.** Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев в Центральной Якутии // Журн. Сиб. федерального ун-та. Сер. Биология, 2012, № 5, с. 43–51.
- Nikolaev, A.N., Skachkov, Yu.B., 2012. The influence of the snow cover and of the temperature regime of permafrost soils on the radial growth of trees in Central Yakutia. *Zhurn. Sib. Federal'nogo Un-ta, biology series*, No. 5, 43–51.
- Обзор** состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации после 2013 г. М., Федеральное агентство по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2014, 227 с.
- Review of the Condition and the Degree of Environmental Pollution in the Russian Federation after 2013. Federal Agency of Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Rosgidromet), Moscow, 2014, 227 pp. (in Russian)
- Поздняков Л.К.** Мерзлотное лесоведение / Л.К. Поздняков. Новосибирск, Наука, 1986, 192 с.
- Pozdnyakov, L.K., 1986. Permafrost Forest Studies. Nauka, Novosibirsk, 192 pp. (in Russian)
- Природа Ямала** / Отв. ред. Л.Н. Добринский. Екатеринбург, Наука, 1995, 437 с.
- Dobrinsky, L.N., (Ed.), 1995. The Nature of Yamal. Nauka, Yekaterinburg, 437 pp. (in Russian)
- Семенов В.А.** Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера–арктические льды–океан // Фундам. и прикл. климатология, 2015, № 1, с. 132–148.
- Semenov, V.A., 2015. Fluctuations of the modern climate caused by feedbacks in the atmosphere–Arctic ice–ocean system. *Fundam. i Prikl. Klimatologiya*, No. 1, 132–148.
- Шиятов С.Г.** Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С.Г. Шиятов. М., Наука, 1986, 137 с.
- Shiyatov, S.G., 1986. Dendrochronology of the Upper Boundary of the Forest in the Urals. Nauka, Moscow, 137 pp. (in Russian)
- Яворский Н.Х.** Астро-динамико-статистическое прогнозирование климатических условий, в которых возможно формирование засух и переувлажнений // Вопросы агрономии. Фрунзе, Киргиз. с.-х. ин-т, 1975, с. 118–125.
- Yavorsky, N.H., 1975. Astro-dynamic and statistical prediction of climatic conditions accounting for possible formation of draughts and overwetting. *Voprosy Agronomii*, Kyrgyz Agricultural Institute, Frunze, p. 118–125.
- Яворский Н.Х., Яворский Е.Н., Яворский В.Н.** Теоретически возможные циклы в выпадениях осадков за счет влияния на них атмосферных приливов // Вопросы агрономии. Фрунзе, Киргиз. с.-х. ин-т, 1979, с. 131–137.
- Yavorsky, N.H., Yavorsky, E.N., Yavorsky, V.N., 1979. Theoretically possible precipitation cycles due to the impact of atmospheric tides on them. *Voprosy Agronomii*, Kyrgyz Agricultural Institute, Frunze, p. 131–137.
- Alsos, I.G., Eidesen, P.B., Broekman, R., Loonen, M., Rozema, J.** No divergence in *Cassiope tetragona*: persistence of growth response along a latitudinal temperature gradient and under multi-year experimental warming // *Ann. Botany*, 2012, No. 110, p. 653–665.
- Buchwal, A.** Dendroclimatological records of annual growth in high and low arctic sites (central Spitsbergen, W. Greenland) // *Tree Ring in Archeology, Climatology and Ecology (TRACE 2014)*. Aviemore, Scotland, 2014, 27 p.
- Buchwal, A., Rachlewicz, G., Fonti, P., Cherubini, P., Gärtner, H.** Temperature modulates intra plant growth of *Salix polaris* from a high arctic site (Svalbard) // *Polar Biology*, 2013, vol. 36 (9), p. 1305–1318.
- Carey, S., Sparks, R.S.J.** Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns // *Bull. Volcanol.*, 1986, vol. 48, p. 109–125.
- Douglass, A.E.** Climatic cycles and tree-growth. Wash., Carnegie Inst., 1936, vol. 3, 171 p.
- Leibman, M.O., Kizyakov, A.I., Plekhanov, A.V., Streletskaya, I.D.** New permafrost feature – deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations // *Geography, Environment, Sustainability*, 2014, vol. 7 (4), p. 68–80.
- Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences** / Ed. by E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London, Kluwer Acad. Publ., 1990, 364 p.
- Myers-Smith, I.H., Forbes, B.C., Hallinger, M., et al.** Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities // *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6 (4), 15 p.
- Schweingruber, F.H., Poschold, P.** Growth rings in herbs and stem anatomy // *Forest Snow and Landscape Res.*, 2005, vol. 79 (3), p. 195–415.
- Schweingruber, F.H., Rump, H.H.** Annual ring studies on plants in permafrost areas of the high Arctic // *European Conf. on Permafrost (EUCOP III)*, Norway, Svalbard Sci. Centre, Longyearbyen, 2010, vol. 3, p. 75.
- Wohletz, K., Heiken, G.** *Volcanology and Geothermal Energy*. Berkeley; Los Angeles; Oxford, Univ. California Press, 1992, 432 p.
- URL: <http://Aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 01.06.2016).

Поступила в редакцию  
14 июня 2016 г.