

РОЛЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕОСИСТЕМ В СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.В. Хорошев¹, К.Н. Дьяконов², И.В. Воловинский³, Ю.Н. Бочкарев⁴, О.М. Подгорный⁵

^{1–5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения

⁴ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН

¹ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: avkh1970@yandex.ru

² Зав. кафедрой, проф., чл.-кор. РАН; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

³ Аспирант; e-mail: volovinskiy@gmail.com

⁴ Канд. геогр. наук, инженер 1-й категории; e-mail: uboch@yandex.ru

⁵ Студент; e-mail: holgerd18@yandex.ru

Представлены результаты исследования по устойчивости функционирования северотаежных ландшафтов на севере Западно-Сибирской равнины в бассейне р. Надым в условиях современного потепления климата. Проведено сравнение видов зависимости между мерой пространственного варьирования годичных приростов кедра (*Pinus sibirica*) в XX–XXI вв. и характеристиками урочищ бугров пучения. Предполагалось, что теснота связи и виды зависимости могут меняться сопряженно с варьированием климатических факторов. Использованы 512 кернов из 39 фаций на вершинах и склонах бугров пучения. Для группы ландшафтных характеристик бугров проведено снижение размерности методом главных компонент. Рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между параметрами порядка и приростами за каждый год с 1926 по 2013. Проверялись гипотезы о зависимости пространственного варьирования приростов от морфологических параметров бугров пучения и их фациальной структуры, о влиянии внутривековой изменчивости температур и осадков на связь между ландшафтными характеристиками и приростами кедра. Установлено, что кедровые древостои проявляют непостоянную чувствительность к морфологическим параметрам бугров пучения, что выражается в существенном варьировании тесноты корреляционной связи. В годы с особо высоким или низким фоном температур воздуха или количества осадков единый для ландшафта режим фитопродукционного функционирования распадается на разные варианты в зависимости от морфологических свойств урочищ. В холодные периоды повышенной фитопродуктивностью отличаются крупные бугры с высоким положением мерзлоты и слабовыраженным микрорельефом; в теплые периоды – небольшие бугры с большой мощностью сезонно-талого слоя. Фитопродукционная функция при глубоком положении кровли мерзлоты более стабильна. При современном потеплении увеличение приростов наблюдается только на относительно стабильных буграх со слабовыраженным микрорельефом. Полученные результаты показали, что крупномасштабный подход к исследованию реакции урочищ на изменения климата позволяет детализировать специфику фитопродукционного процесса, которая не может быть выявлена без использования ландшафтного подхода.

Ключевые слова: Западная Сибирь, бугор пучения, дендрохронология, кедр, рельеф, сезонно-талый слой, рельеф, вид зависимости, климатическая тенденция

ВВЕДЕНИЕ

Один из важнейших аспектов проблемы устойчивости ландшафтов – определение нормального диапазона варьирования характеристик функционирования. В 1970-х гг. были рассмотрены понятия устойчивости и изменчивости ведущих характеристик функционирования геосистем – годового местного стока и радиального прироста деревьев от двух ведущих факторов – годовых атмосферных осадков и радиационного баланса. Использован многолетний ряд характеристик за 40–50 лет для шести зон и подзон Западно-Сибирской равнины [Дьяконов, 1974].

Если варьирование каких-либо факторов претерпевает изменение и это отражается на изменчивости

функционирования, то в ряде случаев ландшафт переходит в другую область устойчивости с принципиальной сменой режима вплоть до формирования частично новой структуры. При этом структура ландшафта с новыми свойствами также влияет на функционирование геосистем (фаций) (рис. 1). Известно, что морфолито-генная основа в большой степени определяет характер других компонентов ландшафта. В связи с относительной инерционностью морфолито-генная основа может рассматриваться как «свойство – память» в пределах десятков – сотен лет. Смену диапазона варьирования свойства какого-либо мобильного компонента обычно связывают с трендом внешних условий (климат, антропогенное воздействие и др.). Однако бывают условия,

особенно в криолитозоне, когда морфолитогенная основа высокочувствительна к изменениям среды.

Геосистемы на северной границе тайги проявляют повышенную чувствительность к потеплению и изменению количества осадков [Ваганов и др., 1998]. Подробно изучены реакции биопродукционного процесса на климатические колебания по результатам дендрохронологических исследований [Наурзбаев и др., 2001; Astudillo-Sánchez et al., 2017; Долгова и др., 2018]. Меньше известно о локальных ландшафтных факторах. Бугры пучения особенно

чувствительны к климатическим изменениям [Васильчук и др., 2008]. Дендрохронологические данные показали, что потепление XXI в. привело к разрушению отдельных бугров пучения и образованию на их месте термокарстовых озер [Бочкарев, 2006, 2014; Дьяконов, Бочкарев, 2019]. При этом одни бугры разрушаются, другие устойчивы или растут.

В связи с высокой плотностью освоения севера Западной Сибири оценка устойчивости бугров пучения находится в центре внимания криолитологии и инженерной геологии [Москаленко, 2009; Казан-

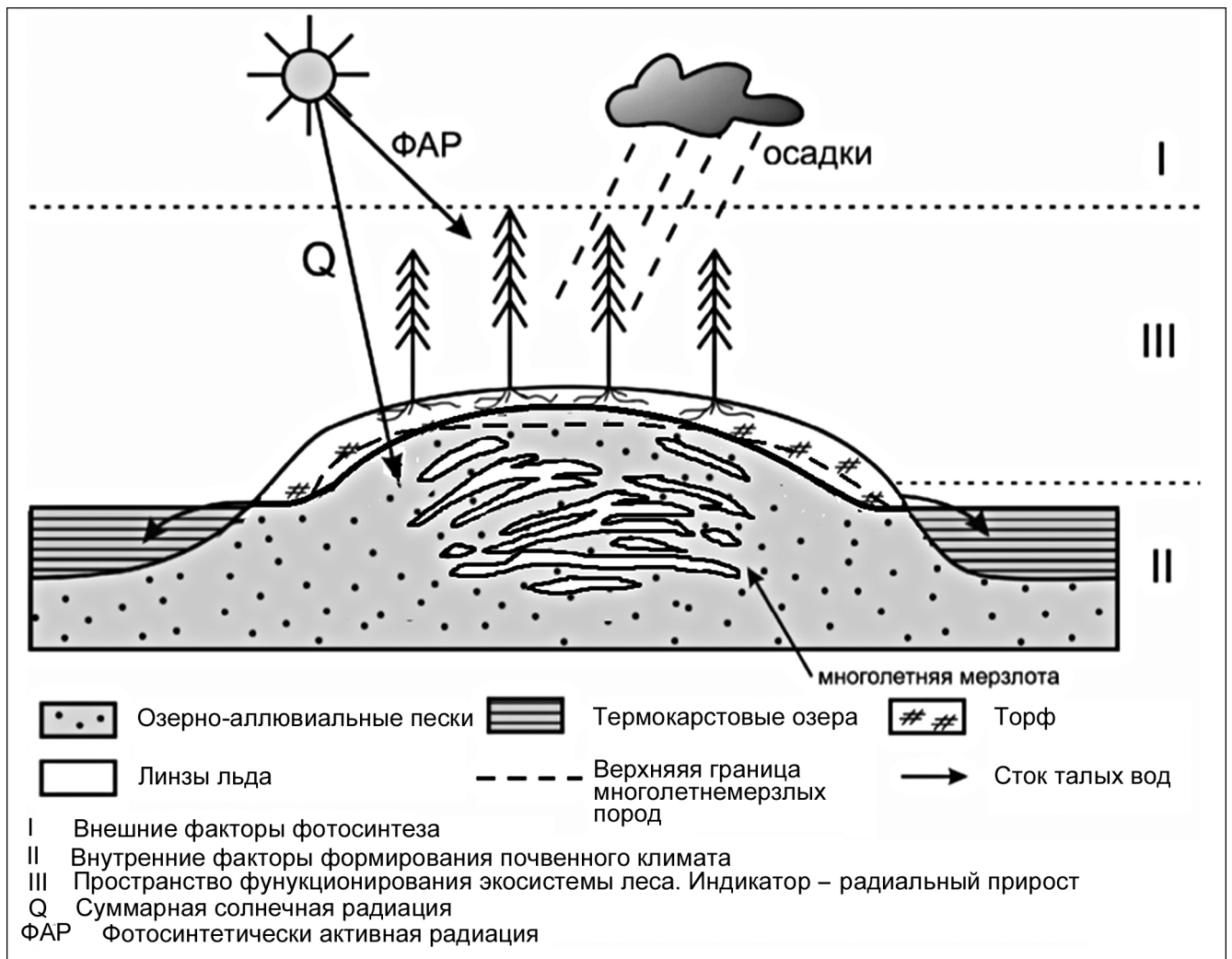


Рис. 1. Схема строения объекта исследования

Fig. 1. Scheme of the research object structure

цева, 2011]. Большой потенциал в решении этой проблемы имеет ландшафтный подход, который позволяет судить о состоянии бугров по функционированию растительного покрова и динамике пространственной структуры.

Цель исследования – оценить значимость изменяющихся ландшафтных свойств – факторов в

динамике фитопродукционного процесса с учетом климатических флуктуаций, используя методы дендрохроноиндикации.

Предмет исследования – изменчивость связей между ландшафтными характеристиками и приростами кедра на примере бугров пучения с редколесными фитоценозами.

Проверялись следующие гипотезы.

1. Пространственное варьирование приростов кедр определяется различиями морфологических параметров урочищ бугров пучения и их динамичной фациальной структурой.

2. Теснота связи и вид зависимости между ландшафтными характеристиками и приростами кедр могут меняться во времени.

3. Варьирование видов зависимости и тесноты связи во времени определяется внутривековой изменчивостью температур воздуха и атмосферных осадков.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в северной тайге Западной Сибири на Надымском стационаре Института криосферы СО РАН (65° с. ш., 72° в. д.). На территории хорошо изучены мерзлота, почвы, растительность, ландшафтная структура [Ландшафты..., 1983; Пономарева и др., 2012, 2015; Москаленко, 2009; Бочкарев, 2014; Тархов и др., 2019].

Ландшафт представляет собой озерно-аллювиальную равнину с песчаными отложениями на морских суглинках и супесях с кедрово-лиственнично-сосновыми мохово-лишайниково-кустарничковыми лесами на языковатых подзолах. Междуречья представлены плоскобугристыми и крупнобугристыми

мерзлыми торфяниками (кустарничково-мохово-лишайниковыми по буграм и торфяно-моховыми по понижениям). В краевой переувлажненной части междуречной местности много минеральных и торфяно-минеральных сегрегационных бугров пучения – одиночных или в группах (рис. 1). Большинство бугров покрыто кедровыми мохово-лишайниково-осоково-багульниковыми редколесьями, некоторые безлесны или залесены частично.

Основной методологический подход – сравнение видов зависимости между мерой пространственного варьирования годовых приростов кедр и характеристиками ландшафтной структуры для периодов с разными гидротермическими условиями. Схема исследования представлена на рис. 2.

Дендрохронологические данные отбирались отдельно на склоне и на вершинной поверхности бугров. На каждой площадке буром Пресслера опробовано 10–15 деревьев. Всего отобрано с двух сторон дерева (наклона и в противоположную) 512 кернов. Анализ кернов осуществлен на оборудовании Lintab-5 с программным обеспечением TsapWin. Применен метод перекрестного датирования. Сравнивались дендрохронологические данные с двух сторон дерева. Построение графиков позволяло выявлять ошибки съемки колец (пропущенные и ложные); был использован индекс перекрестного датирования CDI [Tech, 2010].

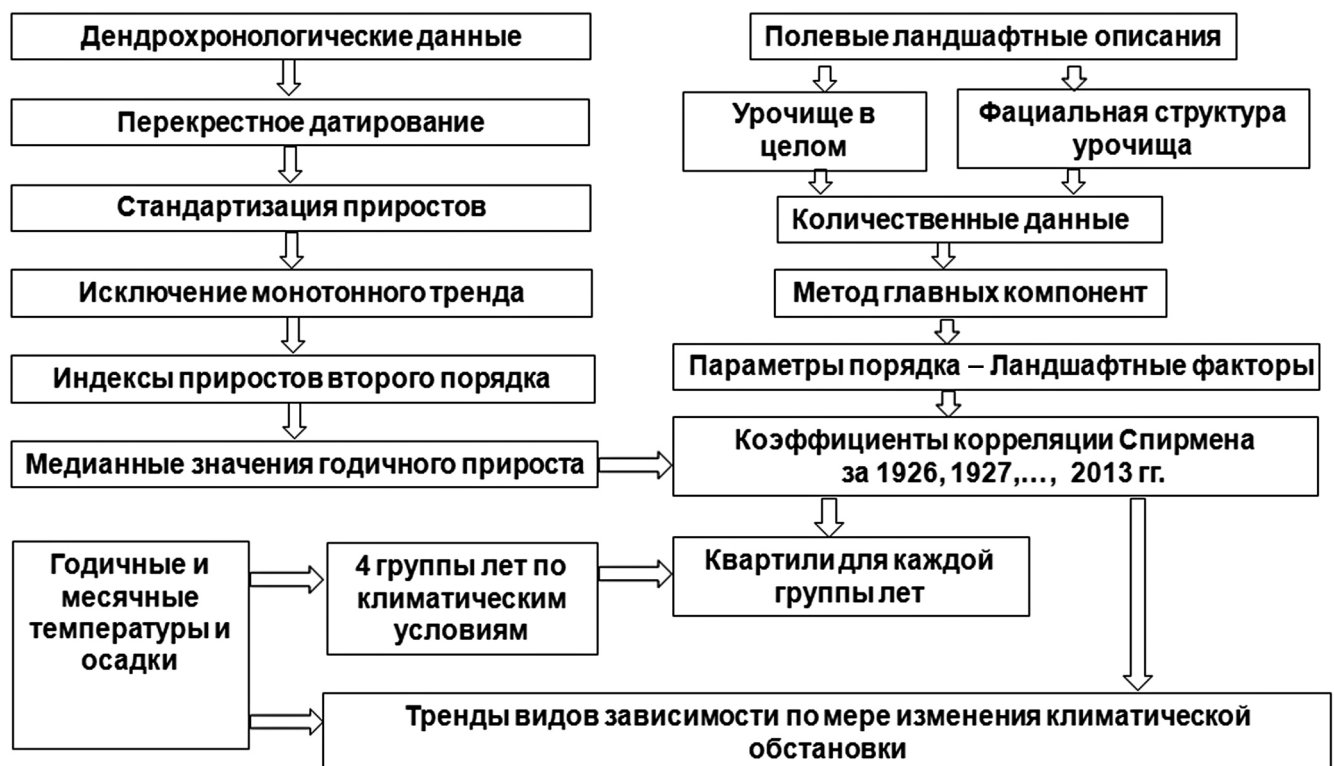


Рис. 2. Схема исследования видов зависимости между ландшафтными факторами и годовыми приростами кедр

Fig. 2. Framework for studying relationships between landscape factors and cedar annual increments

Проведена стандартизация приростов деревьев. Сначала исключается монотонный тренд, затем к индексам прироста применено сглаживание сплайном для снятия длиннопериодических колебаний роста, обусловленных биологическими свойствами деревьев. В результате вычислены индексы второго порядка, т. е. индивидуальные хронологии. Затем они усреднялись в программе ARSTAN [Cook, Holmes, 1984] для получения обобщенной хронологии площадки. В качестве переменных взяты медианные значения индексов прироста второго порядка.

Для дальнейшего анализа использованы данные по 39 фациям, обеспеченным рядами дендрохронологических измерений с 1926 по 2013 г., частично – до 2019 г.

Характеристики бугров рассматривались как потенциальные предикторы динамики фитомассы: амплитуда микрорельефа, глубина криогенных трещин; мощность торфа и сезонно-талого слоя; высота, площадь, периметр, отношение площадь/периметр, крутизна склонов. Исходные переменные описывают варьирование пространственной структуры на уровнях внутриурочищном (внутренняя мозаичность бугра и свойства компонентов) и урочищном (параметры бугра как мезоформы рельефа).

Для статистического анализа использована программа Statistica 7.0. Проведено снижение размерности данных методом главных компонент без вращения. Выявлены параметры порядка или главные компоненты, каждый из которых описывает группу сопряженно варьирующих свойств урочищ и подчиняется тому или иному ландшафтному фактору. Для каждого года с 1926-го по 2013-й рассчитан непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (ККs) как мера связи между численным значением каждого параметра порядка (координатами фаций на соответствующей оси ландшафтного фактора) и приростами за каждый год. Величина коэффициента характеризует тесноту связи, а ее знак – вид зависимости.

Использовались данные о температурах и осадках за год, зимний и летний сезоны по метеостанциям Салехард с 1884 г. и Надым с 1965 г. Выделены четыре группы климатических условий: холодные сухие, холодные влажные, теплые сухие и теплые влажные годы. В каждую группу попали 21 или 22 года. За основание для разделения групп приняты комбинации значений средних годовых температур и годовых сумм осадков ниже или выше среднего значения за 1926–2013 гг., соответственно $-6,1^{\circ}\text{C}$ и 427 мм по метеостанции Салехард (рис. 3). Для каждой группы климатических условий вычислены верхний и нижний квартили значений ККs, рассчитанных для каждого года. Верхний квартиль (число, больше которого 25% случаев из группы, т. е. 5–6 лет из 21–22) является нижней границей больших

по модулю положительных значений ККs. Нижний квартиль (число, меньше которого 25% случаев из группы) является верхней границей больших по модулю отрицательных значений ККs.

Основной предмет анализа – наличие трендов видов зависимости. Ландшафтные характеристики зафиксированы на момент полевых наблюдений. Поэтому делается допущение, что отклонение вида зависимости в какой-либо период от наблюдаемого ныне может быть обусловлено либо иной климатической обстановкой, либо иными свойствами ландшафтной структуры. О последней нет прямых данных, поэтому были использованы аэрофотоснимки Согона 1968 г. с разрешением 2 м и современные космоснимки GeoEye 1 2017–2019 гг. (разрешение 1 м). Эти данные позволяют оценить динамику роста термокарстовых озер с точностью до десятых долей процента. Сопоставление снимков показало рост площади термокарстовых озер на 1,9% (с 5,03 до 5,13 км²), в том числе за счет разрушения части бугров пучения.

Для оценки сопряженности временных рядов ККs (отдельно для каждого параметра порядка) и климатических характеристик проведена визуализация рядов на едином графике. Кривая аппроксимации построена методом локальной полиномиальной регрессии (LOWESS).

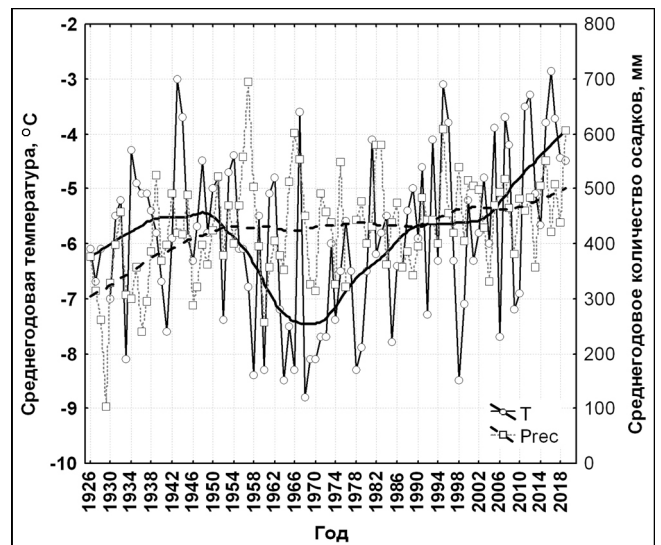


Рис. 3. Ход среднегодовых температур и годовых сумм осадков по метеостанции Салехард в 1926–2018 гг.: T – температура воздуха; Prec – осадки. Аппроксимирующие кривые построены методом локальной полиномиальной регрессии (LOWESS)

Fig. 3. The course of average annual temperatures and annual precipitation amounts at the Salekhard meteorological station in 1926–2013: T – temperatures; Prec – precipitation. The fitting curves were constructed using the local polynomial regression method (LOWESS)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пять параметров порядка в совокупности описывают 73% вариабельности ландшафтных характеристик (соответственно, 27, 16, 12, 10 и 8%). Для каждого фактора и группы климатических условий рассчитаны описательные статистики ККs между значениями фактора и приростами для разных групп климатических условий (табл.). Интерпретация факторов ландшафтной дифференциации основана на анализе факторных нагрузок для групп исходных переменных, региональных данных о зависимости характеристик бугров от интенсивности криогенных процессов [Ландшафты...,

1983; Пономарева и др., 2012, 2015], полевых наблюдениях авторов и корреляционных связях со свойствами почв.

Фактор 1 описывает плановые размеры бугров: чем больше размер бугра и *отношение площади к периметру*, тем меньше численное значение фактора. Этот фактор характеризует интенсивность притока влаги к ледяному ядру. На крупных буграх (более 10 тыс. м²), в отличие от малых, почти не встречается глубина сезонного протаивания более 50 см, т. е. они все «холодные». На малых буграх большая мощность сезонно-талого слоя (СТС) (80–200 см и более) сочетается с пониженной мощностью торфа – до 25 см.

Таблица

Описательные статистики коэффициентов корреляции Спирмена между значениями факторов дифференциации бугров пучения и годовыми приростами кедр для групп климатических условий по данным 1926–2013 гг.

Факторы	Статистика	Группы климатических условий			
		Холодные сухие годы	Холодные влажные годы	Теплые сухие годы	Теплые влажные годы
Фактор 1 (плановые размеры и форма бугра)	Нижний квартиль	–0,15	–0,06	–0,20	–0,14
	Минимум	–0,45	–0,50	–0,47	–0,46
	Верхний квартиль	0,09	0,16	0,09	0,2
	Максимум	0,38	0,31	0,42	0,38
Фактор 2 (мощность сезонно-талого слоя и торфа)	Нижний квартиль	–0,16	–0,06	–0,12	–0,09
	Минимум	–0,38	–0,23	–0,47	–0,31
	Верхний квартиль	0,07	0,07	0,12	0,13
	Максимум	0,15	0,33	0,21	0,33
Фактор 3 (амплитуда микрорельефа)	Нижний квартиль	–0,1	–0,17	–0,18	–0,06
	Минимум	–0,48	–0,41	–0,42	–0,32
	Верхний квартиль	0,16	0,13	0,03	0,09
	Максимум	0,30	0,38	0,24	0,45
Фактор 4 (высота и крутизна склонов бугра)	Нижний квартиль	–0,06	–0,08	–0,12	–0,13
	Минимум	–0,33	–0,29	–0,28	–0,21
	Верхний квартиль	0,08	0,08	0,13	0,13
	Максимум	0,29	0,30	0,20	0,32
Фактор 5 (глубина криогенных трещин)	Нижний квартиль	–0,19	–0,07	–0,09	–0,18
	Минимум	–0,34	–0,23	–0,26	–0,40
	Верхний квартиль	–0,03	0,1	0,21	0,13
	Максимум	0,32	0,15	0,35	0,27

Примечание. Разделение на сухие и влажные годы – относительно среднего годового количества осадков за 1926–2013 гг. по метеостанции Салехард (427 мм), на теплые и холодные годы – относительно среднего значения среднегодовой температуры (6,1°C).

Корреляционная связь между значениями фактора 1 и приростами кедр для большинства лет оказалась статистически недостоверной при $p < 0,05$ (рис. 4). Однако очевидны две закономерности. Во-первых, достоверные ККs (0,3–0,5) возникали

эпизодически в пиковые периоды фаз потепления и похолодания или при резко выраженном тренде температур. Во-вторых, имела место циклическая серия постепенных переходов от положительных к отрицательным связям и обратно. При этом сам

факт связи при ККs 0,2–0,3 означает наличие урочищ, для которых характерна нетипичная комбинация значений ландшафтного фактора и приростов, как правило для бугров с максимальными и минимальными плановыми размерами.

Достоверная связь типа «чем меньше значение фактора 1 (больше по площади и периметру бугор), тем больше приросты кедра» (ККs < 0) возникала преимущественно в сухие периоды (см. табл., рис. 3), которые могли быть и теплыми, и холодными. При потеплении и росте осадков (1940-е гг., см. рис. 3) увеличивалась частота реализации противоположного правила «чем меньше бугор, тем больше прирост кедра» с ККs > 0 (см. рис. 4). В период уменьшения годовых и зимних температур и высокой влажности (1950–1961) вновь дважды наблюдалась зависимость с повышенными приростами на крупных буграх, в частности в холодном влажном 1958 г. (рис. 5В). При подъеме температур с 1980-х гг. с одновременным увеличением количества осадков (почти во все годы – выше среднего за изучаемый

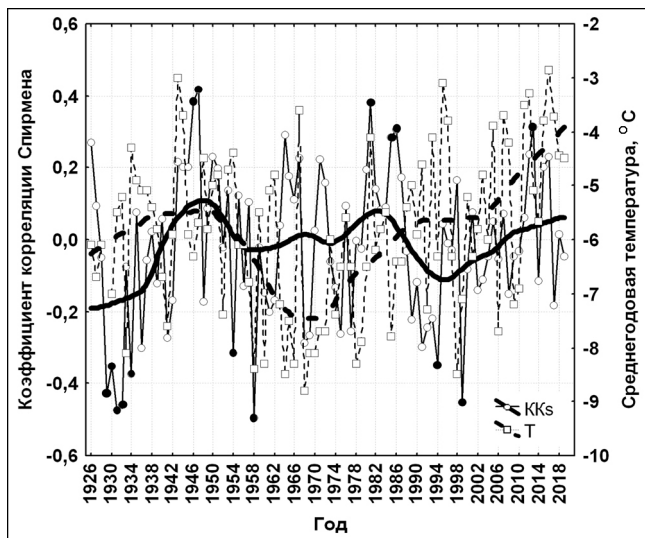


Рис. 4. Изменчивость коэффициентов корреляции Спирмена между годовыми приростами кедра и значениями фактора планового размера бугра (фактор 1) в связи с флуктуациями среднегодовых температур: ККs – коэффициент корреляции Спирмена; T – среднегодовая температура. Рост размера бугра соответствует уменьшению значения фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующие кривые получены методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 4. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values of factor of plan frost mound size (factor 1) in connection with fluctuation of mean annual temperature: ККs – Spearman correlation coefficient; T – annual temperature. The larger the mound, the higher is factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

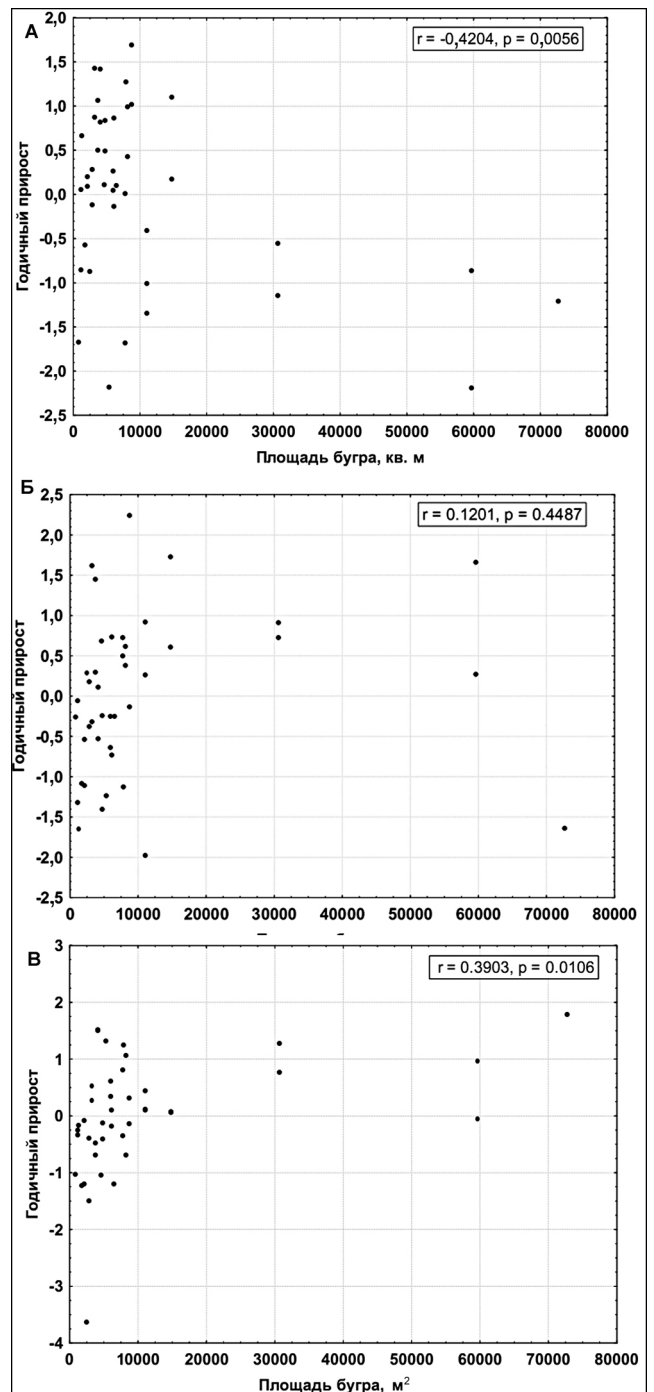


Рис. 5. Зависимость между площадью бугра и годовым индексом прироста кедра в теплом 2013 г. с влажной зимой (А), в холодном сухом 1999 г. (Б), холодном влажном 1958 г. (В): r – параметрический коэффициент корреляции Пирсона; p – уровень значимости. Непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена см. рис. 3

Fig. 5. The relationship between the area of a frost mound and the annual cedar increment in warm 2013 with a humid winter (A), in a cold dry 1999 (B), and a cold wet 1958 (B): r – Pearson correlation coefficient; p – significance level. Spearman correlations see in Fig. 3

период) восстановилось правило, характерное для теплого периода 1940-х гг.: повышенный прирост кедра на малых буграх.

При активном потеплении с 2000 г. достоверные связи отсутствовали, однако в теплый (особенно летом) и влажный (особенно зимой) 2013 г. на всех крупных буграх приросты были минимальны, т. е. повторилось правило 1940-х гг. (см. рис. 5А). На большинстве малых бугров рост зимних и годовых осадков вызвал увеличение приростов, а на больших – снижение (см. рис. 5А). В холодные годы с сухой зимой (1999) сильное промерзание приводило к увеличению приростов на крупных буграх и уменьшению на большинстве малых (см. рис. 5Б). Итак, хотя в большинстве лет фактор планового размера бугра несуществен, в экстремальные по влажности или температурам годы крупные бугры отличаются от остальных по приростам кедра.

Фактор 2 описывает глубину сезонного протаивания (индикатор почвенного климата) в связи с теплоизолирующей ролью торфа: чем меньше мощность торфа и чем мощнее СТС, тем больше численное значение фактора. Поскольку вертикальный прирост торфа в регионе не превышает долей миллиметра в год [Болотные..., 2001], то изменение его мощности за изучаемый период (88 лет) можно считать несущественным. В сухие годы (как холодные 1930-е, так и теплые 1940-е и 1980-е) приросты возрастали на буграх с большой мощностью торфа и маломощным СТС, причем при наибольшей чувствительности к зимним условиям (рис. 6). По мере потепления и роста увлажнения (с 1990-х гг.) вид зависимости менял знак: приросты увеличивались при малой мощности торфа и большой мощности СТС.

Фактор 3 отражает внутриурочищное (фациальное) варьирование: чем больше амплитуда термокарстового микрорельефа, тем больше численное значение фактора. При похолодании в сухие годы устанавливается отрицательная связь значений фактора с приростами, но с запозданием на 5–7 лет по отношению к пикам похолодания (рис. 7): чем контрастнее микрорельеф, тем меньше приросты (рис. 8). В период быстрого снижения температур после потепления 1940-х гг. возникали положительные связи, т. е. контрастная фациальная структура с глубокими (1–2 м) микрозападинами благоприятствовала повышенным приростам. Однако с 2005 г. растет повторяемость отрицательных связей в годы с холодными зимами при большом количестве зимних осадков: чем контрастнее микрорельеф, тем меньше приросты.

Фактор 4 (высота бугра и крутизна его склонов) и фактор 5 (глубина криогенных трещин) имеют достоверную корреляцию с приростами реже, чем первые три фактора, соответственно всего 2 и 5 раз

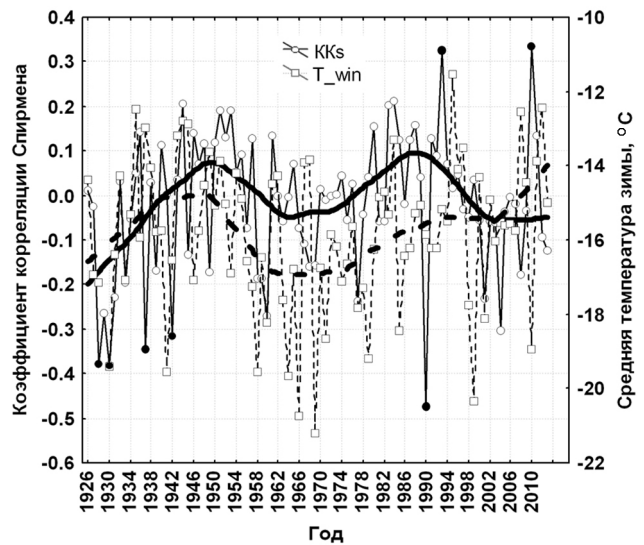


Рис. 6. Изменчивость коэффициентов корреляции Спирмена между годовыми приростами кедра и значениями фактора мощности сезонно-талого слоя (фактор 2) в связи с флуктуациями средней температуры зимнего периода: KKs – коэффициент корреляции Спирмена; T_{win} – температура зимнего периода. Рост мощности сезонно-талого слоя соответствует росту значений фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующие кривые получены методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 6. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values factor describing thickness of seasonally-thawed layer (factor 2) in connection with fluctuation of mean winter temperature: KKs – Spearman correlation coefficient; T_{win} – mean winter temperature. The thicker seasonally-thawed layer, the higher factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

за изучаемый период. Как и для вышеописанных факторов (см. рис. 4, 6, 7), выявлена цикличность смены знака связи. Однако нельзя не принимать во внимание, что наблюдаемые сейчас высота бугров и глубина криогенных трещин могут не отражать ситуацию несколько десятилетий назад [Пономарева и др., 2012]. По сути, нельзя быть уверенным, что иной знак связи, чем сейчас, не обусловлен изменением морфологии урочища и его фациальной структуры.

Зависимость приростов кедра от ландшафтных условий имеет место, но реализуется не ежегодно. Значимые связи возникают за счет небольшого количества бугров с нетипичными для ландшафта свойствами в годы с особо высокими или низкими показателями температур и осадков. При этом знак зависимости меняется согласованно с климатическими циклами.

Эпизодичность возникновения зависимости между рельефом и приростами свидетельствует

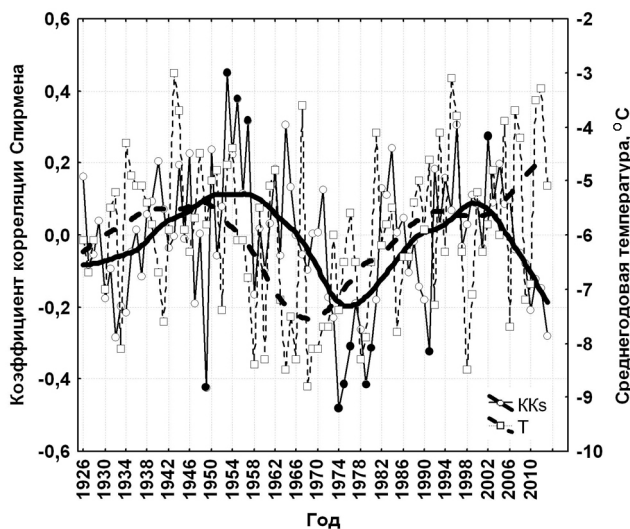


Рис. 7. Изменчивость коэффициентов корреляции между годовыми приростами кедров и значениями фактора амплитуды микрорельефа (фактор 3) в связи с флуктуациями средней годовой температуры: KKs – коэффициент корреляции Спирмена; T – среднегодовая температура. Рост амплитуды микрорельефа соответствует росту значений фактора. Черными кружками отмечены достоверные корреляции. Аппроксимирующая кривая получена методом локальной полиномиальной регрессии

Fig. 7. Temporal variability of Spearman's correlations between cedar annual increments and values of factor of microrelief elevation range (factor 3) in connection with fluctuation of mean annual temperature: KKs – Spearman correlation coefficient; T – annual temperature. The larger microrelief elevation range, the higher factor value. Black circles mark significant correlations. Approximation curves were obtained by Robust locally weighted regression

о возможности нарушения синхронности фитопро-дукционного процесса в ландшафте. Фактически в обычных климатических условиях ландшафт функционирует как единое целое со сходным откликом урочищ на межгодовые различия тепло- и влагообеспеченности, но в экстремальные периоды теряет целостность фитопродукционного процесса и «распадается» на несколько видов геосистем.

Чувствительность фитопродукционного процесса к климатической динамике неодинакова на крупных (более 10 тыс. м²) и малых буграх. Объяснение, возможно, кроется в неодинаковой динамике мерзлого ядра. Большинство малых бугров представляют собой миграционные бугры пучения, чувствительные к обводненности среды [Марактанов, 1999]. Высказывалось предположение, что крупные бугры могут быть не буграми пучения как таковыми, а остаточными поверхностями плоскобугристых торфяников [Бердников, 2012]. Позже было показано, что признаки пучения выражены более явно, чем термоостанцового происхождения [Бердников и др., 2019].

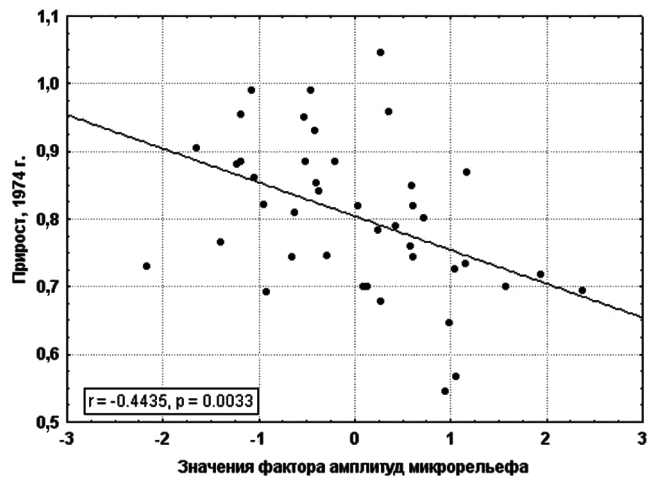


Рис. 8. Отрицательная зависимость приростов кедров в холодный 1974 г. от значений фактора амплитуд микрорельефа. Высокие значения фактора соответствуют большим амплитудам микрорельефа

Fig. 8. Negative correlation between cedar increments in cold year 1974 and factor of microrelief elevation range. High factor values correspond to high elevation range and high thickness of peat

Возникновение значимых связей только в годы с экстремальными величинами температур и осадков объясняется различием миграции влаги на буграх разного размера. Крупные бугры, в отличие от малых, обеспечивают более интенсивный фитопродукционный процесс в холодные сухие малоснежные годы, когда происходит активное нарастание мерзлого ядра за счет миграции влаги со стороны термокарстовых котловин и заболоченных понижений [Пономарева и др., 2015]. Если летом происходит приток влаги с обильными дождями, то переувлажнение почв может нарастать за счет и осадков, и подтаивания вновь образованного мерзлого слоя.

На малых буграх, благодаря повышенной доле склоновых подурочищ, возможен более интенсивный сброс избыточной влаги по кровле мерзлого слоя с уменьшением оглеения почв. На крупных буграх из-за относительно плоской вершинной поверхности во влажные годы застойный водный режим способствует снижению фитопродукции, а в сухие – нет. На малых минеральных буграх с глубоким положением мерзлоты снижение приростов в сухие годы связано с усиленной фильтрацией в песчаные отложения, что может создавать стресс фитопродукционного процесса [Kharuk et al., 2019].

Древесные сообщества бугров с малой мощностью СТС увеличивали продуктивность в годы с пониженными осадками и, соответственно, с меньшим отепляющим эффектом. Известно, что при малой мощности торфа глубина протаивания возрастает сильнее, чем при большой. При современном потеплении продуктивность кедровых древостоев

на буграх с большой мощностью СТС стала выше, чем на буграх с малой глубиной оттаивания, но за исключением холодных лет. Рост тепло- и влагообеспеченности в последние 20 лет (см. рис. 3) имеет неоднозначный отклик в фитопродукционном процессе. Деревья, «привыкшие» к холодным почвам, не выдерживают сильного насыщения почв влагой и, возможно, активизации криотурбации и термокарста в теплые годы. Фитопродукционная функция при глубоком положении кровли многолетней мерзлоты более стабильна. Фактор стабильности кровли мерзлоты оказывается не менее значимым, чем климатический фактор.

ВЫВОДЫ

Дендрохроноиндикация функционирования локальных геосистем в условиях изменения климата свидетельствует о непостоянной зависимости древостоев от морфологических параметров бугров пучения, что выражается в существенном варьировании тесноты и знака корреляционной связи, т. е. о нестационарности процессов, связывающих фитосенюзы, почвы и воды.

Преобладающие недостоверные связи между пространственной вариабельностью приростов и

характеристиками рельефа в годы с типичными погодными условиями свидетельствуют о едином режиме фитопродуцирования на большинстве бугров. В годы с особо высоким или низким фоном температур воздуха или осадков режим функционирования ландшафта распадается на разные варианты в зависимости от морфологических свойств урочищ.

Площадь бугров пучения выступает как ведущий фактор пространственной дифференциации приростов. В холодные периоды повышенной фитопродуктивностью отличаются крупные низкие бугры с высоким положением мерзлоты; в теплые периоды – небольшие бугры с большой мощностью сезонно-талого слоя. При современном потеплении увеличение приростов наблюдается только на относительно стабильных буграх со слабовыраженным микрорельефом.

Наши результаты показали, что крупномасштабный подход к исследованию реакции урочищ на изменения климата позволяет детализировать специфику фитопродукционного процесса, которая не может быть выявлена без использования ландшафтного подхода, при изучении только «репрезентативных» автономных объектов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-05-00786) и госзадания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051300176-1 «Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов». Авторы признательны О.Е. Пономаревой за содействие в организации полевых исследований и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердников Н.М.* Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 81–86.
- Бердников Н.М., Гравис А.Г., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бочкарев Ю.Н.* Льдистость многолетнемерзлых пород, слагающих бугры пучения в бассейне реки Надым // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 2. С. 29–37. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(29-37).
- Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
- Бочкарев Ю.Н.* Изучение внутривековой динамики ландшафтов северной тайги Западной Сибири методами дендрохронологии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 6267.
- Бочкарев Ю. Н.* Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. Т. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 251–270.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурызбаев М.М.* Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чиждова Ю.Н.* Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 571 с.
- Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н.* Дендрохронология Соловецких островов // География: развитие науки и образования. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. С. 394–398.
- Дьяконов К.Н.* Подходы к изучению устойчивости и изменчивости процессов в геосистемах // VII Совещание по вопросам ландшафтоведения (современное состояние теории ландшафтоведения). Пермь, 1974. С. 14–16.
- Дьяконов К.Н., Бочкарев Ю.Н.* Дендрохроноиндикация эволюции парагенетической системы «бугры пучения – термокарстовые озера» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 15–23.
- Казанцева Л.А.* Пространственная изменчивость ландшафтных и геокриологических условий естественных и нарушенных экосистем северной тайги Западной Сибири // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 2. С. 14–18.

- Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газонной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 165 с.
- Марахтанов В.П. Механизм роста миграционных бугров пучения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1999. № 3. С. 41–46.
- Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 18–23.
- Наурзбаев М.М., Сидорова О.В., Ваганов Е.А. История климата позднего голоцена на востоке Таймыра по данным сверхдлительной древесно-кольцевой хронологии // Археология, этнография и антропология Евразии. 2001. № 3(7). С. 17–25.
- Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 4. С. 21–30.
- Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бердников Н.М., Бляхарчук Т.А., Бочкарев Ю.Н., Устинова Е.В., Гравис А.Г., Лоботросова С.А., Матышак Г.В., Попов К.А., Сизов О.С., Якимов А.С. Трансформация криогенных геосистем южной части Арктики Западной Сибири под влиянием потепления климата // Научный вестник Ямало-Ненецкого АО. 2015. С. 123–130.
- Тархов М.О., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А., Петров Д.Г., Петржик Н.М. Температурная чувствительность дыхания почв бугристых торфяников севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 8. С. 946–955. DOI: 10.1134/S0032180X1908015X.
- Astudillo-Sánchez C.C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A.R., Nava-Bernal G.E., Gómez-Albores M.A. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach, *Trees*, 2017, vol. 31(2), p. 441–453, DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Cook E.R., Holmes R.L. *Program ARSTAN*, Users manual, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. Larch (*Larix dahurica* Turcz.) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone, *Regional Environmental Change*, 2019, vol. 19(1), p. 233–243, DOI: 10.1007/s10113-018-1401-z.
- Tech R. *TSAP-WIN: Time series analysis and presentation dendrochronology and related applications*, Heidelberg, Germany, 2010.

Поступила в редакцию 03.02.2021

После доработки 23.10.2021

Принята к публикации 09.03.2022

CONTRIBUTION OF MORPHOMETRIC AND CLIMATIC FACTORS TO THE VARIABILITY OF GEOSYSTEMS FUNCTIONING IN THE NORTHERN TAIGA OF WESTERN SIBERIA

A.V. Khoroshev¹, K.N. Dyakonov², I.V. Volovinsky³, Yu.N. Bochkarev⁴, O.M. Podgornyy⁵

^{1-3,5} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science*

⁴ *Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the RAS*

¹ *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru*

² *Head of department, Professor, corresponding member of RAS; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru*

³ *Post-graduate student; e-mail: volovinskiy@gmail.com*

⁴ *Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: uboch@yandex.ru*

⁵ *Undergraduate student; e-mail: holgerd18@yandex.ru*

The paper presents the results of a study on the stability of the functioning of northern taiga landscapes in the northern West Siberian Plain within the Nadym River basin under modern climate warming. We compared the types of dependence between the spatial variation in annual increments of cedar (*Pinus sibirica*) during the 20th–21st centuries and characteristics of frost mounds landscape units. We supposed that the correlation ratio and the types of dependence could change in line with the variation of climatic factors. 512 core samples from 39 facies were collected on the tops and slopes of frost mounds. The principal component analysis was applied to reduce the dimensionality of landscape attributes of the frost mounds. We calculated Spearman's correlations between order parameters and increments for each year from 1926 to 2013. We tested the hypotheses that the spatial variation in increments depend on the morphological parameters of frost mounds and their facies structure, as well as that the intrasecular variability of temperatures and precipitation affect the relationship between landscape characteristics and the increments of cedar. It was found that cedar stands exhibit variable sensitivity to the morphological parameters of frost mounds, which is expressed in significant variations of the correlation sign and value. In years with particularly high or low air temperatures or precipitation, a uniform landscape mode of phytoproductive functioning splits into different variants depending on the morphological properties of landscape units. In cold periods, large frost mounds with higher-lying permafrost and milder

microrelief are distinguished by increased phyto-productivity. In warm periods the increased increments are characteristic of small mounds with thicker seasonally thawed layer. The phytoproduction function is more stable in the units with deeper-lying permafrost. Under modern warming, the increments increase only on the relatively stable frost mounds with milder microrelief. The obtained results proved that a fine-scale approach to studying the response of urochishche landscape units to climate change provides the opportunity to clarify the specifics of phytoproduction process, which cannot be revealed without using the landscape approach.

Keywords: frost mound, dendrochronology, cedar, relief, seasonally thawed layer, microrelief, type of dependence, climatic trend

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-00786) and the state task of the MSU Faculty of Geography no. 121051300176-1 Factors and processes of spatio-temporal organization of natural and anthropogenic landscapes. The authors are grateful to O.E. Ponomareva for consultations and the assistance in the organization of field works.

REFERENCES

- Astudillo-Sánchez C.C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A.R., Nava-Bernal G.E., Gómez-Albores M.A. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach, *Trees*, 2017, vol. 31(2), p. 441–453, DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Berdnikov N.M. Bugry pucheniya v razlichnykh landshaftakh basseina reki Nadym [Frost mounds in different landscapes of the Nadym River basin], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 3, p. 81–86. (In Russian)
- Berdnikov N.M., Gravis A.G., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Moskalenko N.G., Bochkarev Yu.N. L'distost' mnogoletnemerzlykh porod, slagayushchikh bugry pucheniya v basseine reki Nadym [Ground ice content of frost mounds in the Nadym River basin], *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. XXIII, no. 2, p. 29–37, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(29-37). (In Russian)
- Bochkarev Yu. N. Mnogoletnyaya dinamika bugrov pucheniya na severe Zapadnoi Sibiri po dannym dendrokronologii [Long-term frost mounds dynamic in the north of Western Siberia according to dendrochronological data], *Voprosy geografii*, vol. 138, Moskva, Kodeks Publ., 2014, p. 251–270. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Izuchenie vnutrivenkovoi dinamiki landshaftov severnoi taigi Zapadnoi Sibiri metodami dendrokronologii [Study of the intracentennial dynamics of northern taiga landscapes of Western Siberia using dendrochronological methods], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 62–67. (In Russian)
- Bolotnye sistemy Zapadnoj Sibiri i ih prirodoohrannoe znachenie* [Mire systems of Western Siberia and their nature-protecting value], V.B. Kuvaev (ed.), Tula, Grif i K Publ., 2001, 584 p. (In Russian)
- Cook E.R., Holmes R.L. *Program ARSTAN users manual*, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Dolgova E.A., Mackovskij V.V., Solomina O.N. [Dendrochronology of the Solovets islands], *Geografija: razvitie nauki i obrazovaniya* [Geography: progress of science and education], St Petersburg, RGPU im. A.I. Gercena Publ., 2018, p. 394–398. (In Russian)
- Dyakonov K.N., Bochkarev Yu.N. Dendrokronoindikatsiya evolyutsii parageneticheskoi sistemy bugry pucheniya – termokarstovye ozera [Dendrochronological indication of the evolution of “frost mound – thermokarst lakes” paragenetic system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 4, p. 15–23. (In Russian)
- Dyakonov K.N. [Approaches to study of stability and variability of geosystem processes], *VII Soveshhanie po voprosam landshaftovedeniya (sovremennoe sostojanie teorii landshaftovedeniya)* [Actual state of theory of the landscape science], Perm', 1974, p. 14–16. (In Russian)
- Kazantseva L.A. Prostranstvennaya izmenchivost' landshaftnykh i geokriologicheskikh uslovii estestvennykh i narushennykh ekosistem severnoi taigi Zapadnoi Sibiri [Spatial variation in landscape and geocryological conditions of natural and disturbed ecosystems in the West Siberian northern taiga], *Kriosfera Zemli*, 2007, vol. XI, no. 2, p. 14–18. (In Russian)
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone, *Regional Environmental Change*, 2019, vol. 19 (1), p. 233–243, DOI: 10.1007/s10113-018-1401-z.
- Landshafty kriolitozony Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii* [Landscapes of the permafrost zone of the Western Siberian gas province], Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 165 p. (In Russian)
- Marakhtanov V.P. Mekhanizm rosta migratsionnykh bugrov pucheniya [Growth mechanism of palsas], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1999, no. 3, p. 41–46. (In Russian)
- Moskalenko N.G. Izmenenie temperatury porod i rastitel'nosti pod vliyaniem menyayushchegosya klimata i tekhnogeneza v Nadymskom raione Zapadnoi Sibiri [Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis], *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. XIII, no. 4, p. 18–23. (In Russian)
- Naurzbaev M.M., Sidorova O.V., Vaganov E.A. Istorija klimata pozdnego golocena na vostokey Tajmyra po dannym sverhhdritel'noj drevesno-kol'cevoj hronologii [Late Holocene climate history of Eastern Taimyr based on the extra-long-term tree ring chronology], *Arheologija, etnografija i antropologija Evrazii*, 2001, no. 3 (7), p. 17–25. (In Russian)
- Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M. Sovremennaya dinamika bugrov pucheniya i ploskobugrystykh torfyanikov v severnoi taige Zapadnoi Sibiri (na primere Nadymского stacionara) [Contemporary dynamics of frost mounds and flat peatlands in north taiga of West Siberia (on the example of Nadym site)], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 4, p. 21–30. (In Russian)
- Ponomareva O.E., Moskalenko N.G., Berdnikov N.M., Blyakharchuk T.A., Bochkarev Yu.N., Ustinova E.V.,

- Gravis A.G., Lobotrosova S.A., Matyshak G.V., Popov K.A., Sizov O.S., Yakimov A.S. Transformatsiya kriogennykh geosistem yuzhnoi chasti Arktiki Zapadnoi Sibiri pod vliyaniem potepeniya klimata [Transformation of cryogenic geosystems in the southern part of the Arctic of Western Siberia under the influence of climate warming], *Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo AO*, 2015, no. 2, p. 123–130. (In Russian)
- Tarkhov M.O., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Goncharova O.Yu., Bobrik A.A., Petrov D.G., Petrzhek N.M. Temperature sensitivity of soil respiration in palsa peatlands of the north of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2019, no. 8, p. 945–953.
- Tech R. *TSAP-WIN: Time series analysis and presentation dendrochronology and related applications*, Heidelberg, Germany, 2010.
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Naurzbaev M.M. The variability of summer air temperature at high latitudes in the Northern Hemisphere for the last 1.5 ka: a comparative analysis of the data on annual tree rings and ice cores, *Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 359, no. 2, p. 267–270.
- Vasil'chuk Yu.K. Vasil'chuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. *Yypuklye bugry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov* [Palsa of frozen peat mires], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2008, 571 p. (In Russian)

Received 03.02.2021

Revised 23.10.2021

Accepted 09.03.2022