

УДК 911.52

DOI: 10.15372/GIPR20220213

И.В. ВОЛОВИНСКИЙ*, А.В. ХОРОШЕВ*, Ю.Н. БОЧКАРЁВ*, **

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия,
volovinskiy@gmail.com, avkh1970@yandex.ru, uboch@yandex.ru

**Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, uboch@yandex.ru

ЛАНДШАФТНАЯ СТРУКТУРА КАК РЕГУЛЯТОР ДИНАМИКИ ПРИРОСТА КЕДРА В СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Представлены результаты исследований, направленных на выявление статистических связей между ландшафтной структурой и изменчивостью приростов кедра в мерзлотно-бугристых северотаежных ландшафтах Западной Сибири (бассейн р. Надым). Составлены дендрохронологии сосны сибирской (*Pinus sibirica*), произрастающей на буграх пучения разного типа. Методом главных компонент получены независимые переменные, описывающие урочищные и ландшафтные характеристики территории. Проанализированы керны с 512 деревьев с 23 бугров. Применены следующие методы: метод перекрестного датирования, стандартизация приростов, исключение монотонного тренда для каждого дерева. По результатам классификации космических снимков Sentinel рассчитаны доли озер, лесов, редколесий, сплавин и плоскобугристых торфяников при радиусе окрестности бугра 100–2000 м. Для анализа зависимости медианного прироста на площадке от характеристик урочища бугра и ландшафтного соседства применены корреляционный, дисперсионный и регрессионный виды анализа. Установлено, что на высоких буграх изменчивость приростов выше на вершинах, чем на склонах, на низких — чаще наоборот. Выявлено, что более высокая изменчивость приростов характерна при соседстве с плоскобугристыми торфяниками, более низкая — при соседстве с термокарстовыми озерами. Доказано, что вершины и склоны бугров по-разному реагируют на климатические колебания в зависимости от ландшафтной структуры и высоты бугра: близкое соседство озер снижает изменчивость фитопродукционного функционирования на вершинных поверхностях. Выявлено, что чувствительность приростов кедра к температурным колебаниям повышается с ростом дробности фациальной структуры, обусловленной развитием термокарстовых просянок и криогенных трещин.

Ключевые слова: бугор пучения, дендрохронология, фитопродукционное функционирование, изменчивость, торфяник, озеро.

I.V. VOLOVINSKIY*, A.V. KHOROSHEV*, Yu.N. BOCHKAREV*, **

*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia,
volovinskiy@gmail.com, avkh1970@yandex.ru, uboch@yandex.ru

**Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
625026, Tyumen, ul. Mal'ygina, 86, Russia, uboch@yandex.ru

LANDSCAPE STRUCTURE AS THE REGULATOR OF THE SIBERIAN STONE PINE GROWTH DYNAMICS IN THE NORTHERN TAIGA OF WESTERN SIBERIA

This paper presents the results of studies aimed at identifying statistical relationships between the landscape structure and the variability in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) increments in the permafrost-hilly northern-taiga landscapes of Western Siberia (Nadym river basin). Dendrochronologies of Siberian stone pine growing on frost mounds of different types were compiled. Principal component analysis was applied to obtain independent variables that describe the site and landscape structure of the territory. Cores from 512 trees growing on 23 frost mounds were analyzed. The methods used were as follows: crossdating, dendrochronological standardization, and elimination of monotonic trends for each tree. Results of the classification of Sentinel satellite images were used to calculate the proportions of lakes, forests, sparse forests, floating bogs and flat-hilly peat bogs, with the radius of the vicinity of a frost mound of 100–2000 m. Correlation, dispersion and regression analyses were used in the analysis of the dependence of the median increment on the characteristic of the mound site and landscape neighborhoods. It is established that on high mounds the variability in increments is higher on tops than on slopes, whereas the situation is often the contrary on low mounds. It is also found that the tops and slopes of the frost mounds respond differently to climatic fluctuations

depending on the landscape structure and the height of the mound: the close proximity of lakes reduces the variability of phyto-productive functioning on the summit surfaces. It was revealed that the sensitivity of Siberian stone pine growth to temperature fluctuations increases with an increase in the diversity of the facies structure caused by the development of thermokarst subsidence and cryogenic cracks.

Keywords: frost mound, dendrochronology, phytoproductive functioning, variability, peat bog, lake.

ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый уровень развития ландшафтоведения требует перехода от этапа идентификации, описания, классификации пространственных структур к этапу объяснения механизмов взаимодействия элементов пространственной структуры. Необходимо формализовать способы описания направленного воздействия удаленных пространственных элементов и их сочетаний на динамику природно-территориальных комплексов (ПТК) и установить масштабные уровни процессов, способных влиять на диапазон возможных состояний ПТК в сфере их воздействия.

Пространственная структура ландшафта в современной ландшафтно-экологической литературе рассматривается как важный фактор формирования эмерджентных свойств, проявляющихся в динамике мобильных компонентов (популяции животных, сток, распространение нарушений растительного покрова, экзодинамические процессы в рельефе и др.), устойчивости их функционирования [1, 2]. К числу актуальных вопросов относится построение статистических моделей связей между характеристиками пространственной структуры (как предиктор) и характеристиками изменчивости показателей функционирования во времени (как отклик). Так, по мнению Т.И. Коноваловой [3], если внешний сигнал не выходит за пределы количественных вариаций, происходящих в определенном интервале, внутри которого сохраняется данное качество, то видимой реакции обычно не происходит. Весьма перспективным и «привилегированным» вкладом ландшафтоведения в проблему адаптации хозяйства к глобальным изменениям представляется применение моделей межкомпонентных связей и зависимости динамики свойств ландшафта от климатических параметров при разных сценариях [4]. Ключевое место занимает исследование скоростей развития структуры ландшафта; особенно важна оценка вкладов внутригодовых и многолетних состояний в развитие, определение количественных пределов, за которыми наступают новые состояния. Наиболее остро стоит следующий вопрос: динамика какого масштаба в вышестоящей экосистеме отражается на режиме функционирования исследуемой экосистемы [5]. Привлекает внимание и проблема соотношения вкладов локальных и глобальных факторов в изменчивость экосистем [6].

Достаточно давно исследуется влияние разномасштабных климатических эффектов на функционирование лесных экосистем [7]. Многими исследователями отмечена особо высокая чувствительность лесной растительности к глобальным климатическим изменениям на северной границе ее ареала [8–10]. Состояние высокотемпературной многолетней мерзлоты в зоне ее прерывистого распространения при современном потеплении не может не влиять на устойчивость функционирования ландшафтов, понимаемую как сохранение определенного диапазона колебаний состояний. Исследования динамики криогенных форм рельефа, сезонно-талого слоя, температуры мерзлых толщ в условиях потепления Северной Евразии многочисленны [11, 12]. Подробно изучается вопрос об изменчивости растительного покрова и продуцирования биомассы в связи с климатическими циклами [13]. При этом в качестве удобного индикатора часто рассматривается многовековая и внутривековая динамика приростов древесины [14, 15]. В то же время весьма ограничен объем сведений о том, как динамика криогенного ландшафта и его пространственная структура отражаются на фитопродукционном функционировании. Как известно, большая часть льда в льдонасыщенном ядре миграционных бугров пучения формируется за счет внутригрунтовой влаги окружающей территории; размер бугра в определенной степени зависит от ширины зоны, откуда эта влага поступает [16, 17]. Поскольку эти процессы обычно имеют пульсационный характер, закономерно предположить, что растительный покров посредством связи с состоянием почв и мерзлой подстилающей породы может испытывать существенные колебания биопродуктивности. В связи с этим задача данного исследования — определить, какие свойства пространственной структуры ландшафта увеличивают или уменьшают изменчивость фитопродукционного функционирования и каковы размеры территории, которая связана с функционированием бугров пучения.

Цели исследования — выявление статистических связей между ландшафтной структурой и изменчивостью характеристик приростов древостоя и определение иерархических уровней пространственной и временной структуры бугров пучения и вмещающих их ландшафтов, на которых выявляется максимальная связь между этими структурами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено в междуречье Надыма и Хейгияхи, в 40 км к юго-западу от г. Надыма в Ямало-Ненецком автономном округе. Территория относится к Полуйской провинции подзоны северной тайги Западной Сибири.

На территории представлены два типа ландшафта: ландшафты озерно-аллювиальных равнин с кедровыми лишайниковыми лесами, а также плоско- и крупнобугристые мерзлые торфяники [10, 18]. В пределах этих типов ландшафтов представлены описанные ниже классы урочищ.

Лесные урочища, к которым относятся сегментно-гривистые поймы с кедрово-березовыми травяно-сфагновыми лесами. Это относительно дренированные поверхности I и II террас с лиственнично-кедровыми лесами, а также хорошо дренированные поверхности с сосново-лиственничными лишайниковыми лесами. Лесные урочища характеризуются отсутствием многолетней мерзлоты.

Кустарничково-сфагново-лишайниковые торфяники, расположенные на междуречье и выглядящие как слабохолмистая поверхность с амплитудами микрорельефа до 1 метра. Средняя глубина залегания многолетней мерзлоты 50–100 см. Почвенный покров представляет собой прослой слабо и хорошо разложившегося торфа с линзами песков или супесей. Растительность представлена мхами и лишайниками в равной пропорции.

Сплавины и болота представляют собой обводненные участки, на которых отсутствует открытая вода. Сплавины примыкают к краям озер в котловинах термокарстового происхождения, занятых характерной для низовых болот растительностью — осоками (*Carex*) и вахтой трехлистной (*Menyanthes trifoliata*).

Мерзлотные бугры пучения — это бугры высотой до 15 м, образование которых связано с процессами формирования и накопления сегрегационного льда. Растительность и почвы на буграх идентичны кустарничково-лишайниковым торфяникам, однако часто на буграх произрастают лиственнично-кедровые редколесья.

Проверялись следующие гипотезы: различный генезис и фациальная структура урочищ мерзлотных бугров с кедровыми редколесьями может обуславливать неодинаковую реакцию фитопродукционного функционирования на фазы климатических циклов; склоновые и вершинные подурочища отличаются по чувствительности фитопродукционного функционирования к фазам климатических циклов; ландшафтная структура местности оказывает влияние на степень чувствительности фитопродукционного функционирования урочищ бугров пучения к климатическим колебаниям.

Исходными данными служили результаты измерений годовых приростов сосны сибирской (кедра) (*Pinus sibirica*). Керны отбирались отдельно для деревьев на склоне и на основной поверхности бугров пучения. Обычно число апробируемых деревьев на одну площадку составляло 10–15 (всего 512 деревьев). При анализе кернов был применен метод перекрестного датирования. Для обработки рядов годового прироста деревьев проведена стандартизация приростов, с преобразованием абсолютных величин прироста в относительные. Методика определения нормы прироста была разработана Э. Куком и реализована в программном пакете ARSTAN [20]. Сначала для каждого дерева исключается монотонный тренд, затем к полученным индексам прироста применено сглаживание сплайном для снятия длиннопериодических колебаний роста, обусловленных биологическими свойствами деревьев. В результате вычислены индексы второго порядка, т. е. индивидуальные хронологии деревьев. Затем полученные индивидуальные хронологии усреднялись в программе ARSTAN для получения обобщенной хронологии на пробной площади. Далее в качестве переменных используются медианные значения индексов прироста второго порядка.

Ландшафтными описаниями и опробованием обеспечены 23 бугра пучения. Дана характеристика растительного и почвенного покровов на склонах и вершинах (видовой состав деревьев, кустарников, кустарничков, мхов и лишайников, мощность горизонтов почв). Стандартное описание осуществлялось методом микропрофилирования. В большинстве случаев описывалась сплавина перед грядой, болотные кочки в нижней части склона, склон гряды, основная поверхность и противоположный склон. Для каждой фации описана морфометрия (включая характер микропонижений), растительный покров (высота и диаметр деревьев, расстояние между деревьями, обилие кустарников, кустарничков, трав, мхов и лишайников), измерена мощность сезонного протаивания с помощью шупа. Для оценки степени разрушения бугра измерены количество микротрещин, расчлененность микрорельефа, наклон деревьев, контрастность условий промерзания.

На внутриурочищном уровне в качестве независимых переменных в статистических моделях рассматриваются следующие факторы: амплитуда превышений в микрорельефе, густота расположения

положительных и отрицательных термокарстовых форм микрорельефа, глубина криогенных трещин, мощность торфа, мощность сезонно-талого слоя.

На урочищном уровне в качестве независимых переменных были взяты: высота бугра, площадь бугра, периметр, отношение площадь/периметр, крутизна склонов. Кроме того, в качестве дискретной переменной использована принадлежность бугра к типу торфяно-минеральных или минеральных. Предполагалось, что размеры и форма бугра отражают интенсивность процесса пучения и стадию развития процесса, степень близости к стадии деградации, что отражается на устойчивости функционирования в зависимости от погодных условий конкретного года.

На ландшафтном уровне проверялась гипотеза о зависимости изменчивости приростов от характера ландшафтного соседства, т. е. от степени взаимодействия с урочищами в той или иной окрестности. В качестве независимых позиционных переменных рассматривались: расстояние до ближайших к подножью бугра озера, болотного массива; доли термокарстовых озер, болот, плоских поверхностей с тундровой кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью; мера разнообразия ландшафтного покрова по формуле Шеннона.

Расчет ландшафтного соседства был произведен в программном пакете SagaGIS на основе классифицированных снимков Sentinel-2 от 22 апреля и 6 июля 2018 г. с разрешением 10 м. Типы ландшафтного покрова выделялись исходя из значений индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), который выявляет обводненность территории (открытая вода, болота), и индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), индицирующего зеленую фитомассу. Вокруг каждой площадки опробования были построены буферы радиусом 100, 200, 500, 1000 и 2000 м, что позволило оценить долю площади разных видов урочищ. При классификации выделено пять классов ландшафтного покрова: леса, редколесья, водные объекты (обычно термокарстовые озера), сплавины (болота), плоскобугристые торфяники.

Для анализа данных применены дисперсионный, корреляционный, регрессионный анализ и метод главных компонент. Расчеты проводились в программе Statistica 7.0. В качестве показателей временной изменчивости годовых приростов для каждой площадки рассчитаны среднеквадратические отклонения приростов за пять 50-летних периодов: 1878–1927, 1898–1948, 1918–1967, 1938–1978 и 1968–2017 гг. Для исследования связей показателей временной изменчивости приростов с ландшафтными факторами рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (K_p) и Спирмена (K_s). Предпочтение последнего обусловлено сильным отклонением от нормального распределения показателей межгодовой изменчивости приростов, а также данных о свойствах рельефа, почв, отложений и ландшафтного соседства при невозможности их приведения к нормальному виду. Дисперсионный анализ и его непараметрический аналог (метод Краскела–Уоллеса, ниже — KW) применялся для исследования чувствительности межгодовой изменчивости приростов к собственным свойствам урочищ и характеристикам ландшафтного соседства.

Для сравнения вкладов ландшафтных факторов на межгодовую изменчивость приростов методом главных компонент были выделены восемь интегральных переменных, синтезирующих информацию о совокупности вышеперечисленных характеристик бугров и позиционных показателей. Затем были построены мультирегрессионные модели с прямым пошаговым выбором при $F = 1$, где зависимая переменная — изменчивость межгодовых приростов за тот или иной 50-летний период, а независимые — факторы дифференциации. Критерием сравнения вкладов факторов были стандартизованные регрессионные коэффициенты Beta (значения по модулю).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ландшафтного соседства на состояние деятельного слоя урочищ бугров пучения. Косвенное свидетельство существования парагенетической системы бугра пучения и примыкающих урочищ — установленное наличие статистически достоверных связей между рядом характеристик соседства и свойствами компонентной структуры бугров пучения.

На всех масштабных уровнях (для круга радиусом 100, 200, 500, 1000 и 2000 м, в центре которого фация, обеспеченная полевым описанием) прослеживается достоверная отрицательная связь между мощностью сезонно-талого слоя (СТС) и долей водных объектов в пределах круга, а конкретнее — с заозеренностью (см. таблицу). Та же закономерность отношений между мощностью и СТС и долей сплавин (т. е. зарастающих торфом периферий озер) свидетельствует о сходном стабилизирующем влиянии гидроморфных и водных урочищ на мерзлотное состояние бугров.

Корреляционные зависимости между мощностью сезонно-талого слоя на исследуемой площадке в междуречье Надыма и Хейгияхи и долей урочищ разных видов в ее окрестностях

Классы ландшафтного покрова	Радиус окрестности, м									
	100		200		500		1000		2000	
	Ks	R	Ks	R	Ks	R	Ks	R	Ks	R
Леса	-0,33	-0,06	-0,15	0,05	-0,11	0,02	0,16	0,13	0,31	0,06
Редколесья	-0,27	-0,25	-0,30	-0,47	-0,35	-0,38	0,06	0,12	0,16	0,07
Озера	-0,33	-0,16	-0,22	-0,06	-0,14	-0,11	-0,32	-0,19	-0,32	-0,11
Сплавины	-0,01	-0,07	-0,29	-0,15	-0,08	-0,15	-0,06	0,14	-0,23	0,05
Торфяники	0,13	0,08	0,16	0,36	0,14	0,11	-0,01	0,09	-0,23	0,05

Примечание. Зависимости рассчитаны по результатам классификации космического снимка Sentinel-2. Ks — коэффициенты корреляции Спирмена (жирным шрифтом выделены достоверные значения при $p < 0,05$). R — частные коэффициенты корреляции в мультирегрессионном уравнении, где зависимая переменная — мощность сезонно-талого слоя, независимые — доли классов ландшафтного покрова.

Ландшафтная структура в круге с радиусом 2000 м оказалась статистически наиболее значимой для состояния деятельного слоя урочищ бугров: мощность СТС возрастает по мере роста доли лесов и уменьшения доли плоскобугристых торфяников и термокарстовых озер. Так как лесные урочища сосредоточены в основном в долине р. Хейгияхи и на террасе р. Надым, полученный результат означает, что стабильность мерзлотного состояния поверхности бугров определяется близостью к долинам как к более теплообеспеченным объектам. Однако в кругах с радиусом 100–500 м зафиксирована отрицательная зависимость от доли кедровых редколесий. При этом фактически учитывается характер урочищ, непосредственно соседствующих с бугром в рамках парагенетической системы: чем больше редколесий, тем меньше мощность СТС. Непосредственное (в круге с радиусом 100 м) соседство с озерами большой площади — фактор, уменьшающий глубину протаивания, что может оказывать существенное влияние на фитопродукционное функционирование. Однако достоверные параметрические и непараметрические корреляции между приростами каждого года и мощностью наблюдаемого ныне СТС крайне редки за период с начала XX в. Корреляции между мощностью СТС и среднеквадратическими отклонениями приростов за пять 50-летних периодов (пересекающихся на 20 лет) также, как правило, недостоверны по коэффициенту Спирмена. Следовательно, необходима проверка гипотезы о чувствительности фитопродукционного функционирования к характеристикам пространственной структуры на уровнях подурочища (вершинная поверхность и склон), урочища (бугор в целом) и местности (группа соседствующих урочищ).

Зависимость изменчивости приростов во времени от ландшафтных характеристик. По результатам дисперсионного анализа не обнаружено однозначной зависимости стандартного отклонения приростов за 50-летний период (временной изменчивости) от видов урочищ и подурочищ. Как правило, для урочищ разных видов характерен неодинаковый диапазон значений временной изменчивости. Так, по результатам дисперсионного анализа при отсутствии достоверных различий ($F = 1,54$ при $p = 0,22$; тест KW = 0,26 при $p = 0,66$), на торфяно-минеральных буграх среднеквадратическое отклонение приростов за 1968–2017 гг. всегда находится в узком диапазоне низких значений (0,11–0,19), в то время как на минеральных может быть и очень низким (0,09), и очень высоким (0,36). Следовательно, наличие торфяной толщи на поверхности бугра можно считать существенным фактором стабилизации фитопродукционного функционирования. Различие между склонами и вершинами также недостоверно (тест KW = 0,99 при $p = 0,32$), однако на склонах среднеквадратическое отклонение приростов всегда низкое (0,09–0,19), в то время как на вершинах может быть низким и высоким (0,09–0,36), что свидетельствует о меньшей стабильности состояния деятельного слоя на вершинах некоторых (не всех) бугров. Вероятно, именно поэтому вершинные поверхности чаще, чем склоны, вовсе лишены древесного яруса или заняты одиночными деревьями и характеризуются большей долей покрова лишайников. Всегда низкая изменчивость (0,09–0,16) характерна для краевых частей озерно-аллювиальной равнины (не более 1 км от поймы Хейгияхи) с повышенной мощностью СТС, в то время как во внутренней части междуречья может быть низкой и высокой (0,11–0,36).

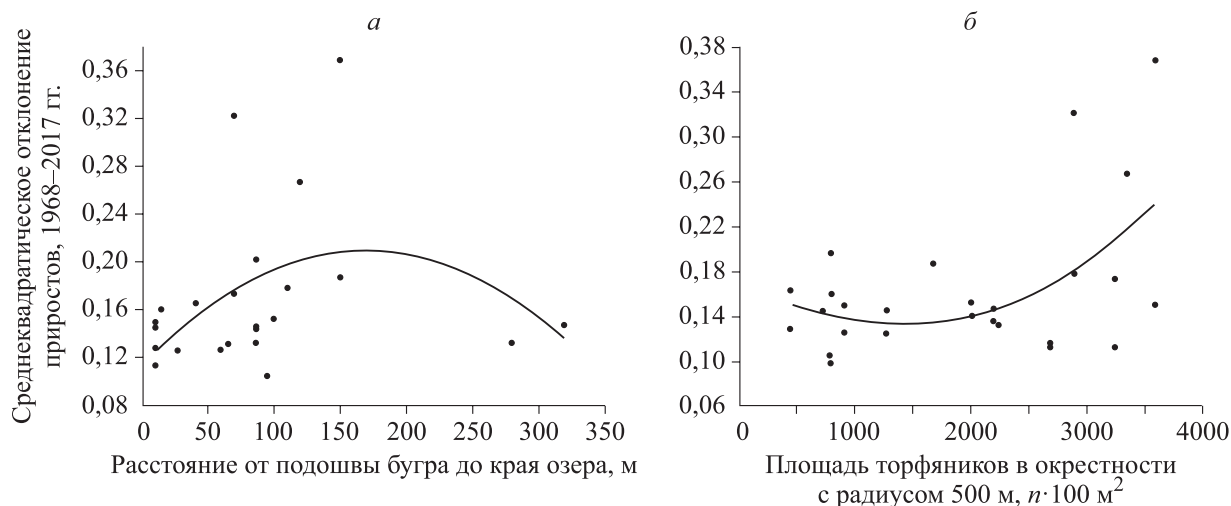
На склонах изменчивость приростов в каждый из пяти 50-летних периодов обычно возрастает с ростом глубины наблюдаемых ныне трещин (Ks от 0,26 до 0,58 с ростом значений к современному

периоду). Обратим внимание, что некоторые площадки выбиваются из этого правила за счет высокой изменчивости приростов во второй половине XIX в. и в первой половине XX в., что может индигировать изменение морфологии данных бугров: вероятно, период высокой изменчивости соответствует обстановке с большей глубиной трещин по сравнению с наблюдаемой сейчас. На вершинных поверхностях бугров межгодовая изменчивость не коррелирует с глубиной трещин. Скорее всего, это объясняется тем, что на склонах трещинный микрорельеф связан с термокарстовым отседанием склонов и более динамичен: от глубины трещин зависит чувствительность фитопродуктивности к погодным условиям.

Анализ зависимости межгодовой изменчивости (среднеквадратического отклонения) приростов от расстояний до ближайшего термокарстового озера показал следующее. Для периода 1968–2017 гг. имеет место снижение изменчивости приростов на вершинах по мере приближения озера к бугру в диапазоне расстояний 0–200 м с $K_p = 0,51$ ($p = 0,01$), $K_s = 0,50$ (см. рисунок, а); для склоновых подурочищ зависимость отсутствует. Часть склоновых и вершинных подурочищ вблизи озера в настоящее время имеет низкую межгодовую изменчивость, но во второй половине XIX в. и первой половине XX в. она была высокой. Для них можно предполагать изменение характера соседства вследствие прогрессирующего увеличения площади озера и приближения акватории к подножью бугра.

Для периода 1968–2017 гг. выявлено, что при увеличении доли плоскобугристых торфяников в окрестностях исследуемых площадок межгодовая изменчивость приростов на минеральных буграх возрастает при $K_p = 0,43$ ($p = 0,02$) и $K_s = 0,30$ (см. рисунок, б), для вершинных подурочищ $K_p = 0,57$ ($p = 0,02$) и $K_s = 0,60$. За 20-летний период (1998–2017), соответствующий наиболее активному росту температур, изменчивость резко возрастает при большой площади торфяников в радиусе 500 м: $K_p = 0,60$ ($p = 0,02$) $K_s = 0,36$. В предыдущие периоды связь отсутствует. Интересно, что для одного из бугров (19-7), расположенного вблизи термокарстового озера, в течение XX в. изменчивость приростов постепенно снижалась. В настоящее время обычно соседство плоскобугристых торфяников повышает изменчивость, а соседство озер — снижает. Поэтому возможной причиной постепенной стабилизации фитопродукционного функционирования была деградация примыкающего к бугру торфяника и замещение его разрастающимся термокарстовым озером.

Сравнение межгодовой изменчивости приростов за современный период (1968–2017 гг.) в пределах каждого бугра на вершинных поверхностях и склонах показало ее существенную зависимость от микрорельефа. На вершинах бугра изменчивость была более высокой в случае более выраженного микрорельефа, обычно связанного с термокарстовыми просадками глубиной 1–2 м. На склонах того же бугра изменчивость выше при условии наличия сети глубоких (>50 см) узких трещин. На низких буграх более высокая изменчивость приростов кедр чаще наблюдалась на склонах, чем на вершинах. На буграх высотой >6 м зависимость оказалась противоположной.



Зависимость изменчивости (среднеквадратического отклонения) приростов кедр на вершинах бугров в 1968–2017 гг. от ландшафтной структуры в радиусе 500 м: расстояния до ближайшего термокарстового озера (а) и площади торфяников (б).

Мультирегрессионные модели, в которых зависимой переменной была изменчивость межгодовых приростов за тот или иной 50-летний период, а независимыми — восемь факторов дифференциации ландшафта, показали следующее. Для вершинных подурочищ коэффициент детерминации уравнения составил 0,50 при $p = 0,01$. Наиболее достоверный вклад в межгодовую изменчивость приростов за 1968–2017 гг. вносит третий фактор, описывающий сопряженное варьирование амплитуд микрорельефа (в основном за счет термокарстовых просадок), глубины криогенных трещин и мощности торфа ($Beta = 0,72$; $p = 0,001$). На втором месте пятый фактор, описывающий уменьшение амплитуд микрорельефа по мере увеличения диаметра бугра ($Beta = 0,47$; $p = 0,018$). В уравнение также вошли с меньшим уровнем достоверности первый фактор, отвечающий за размер бугра и соседство с озером (площадь, периметр подошвы, расстояние от подошвы до уреза воды) ($Beta = 0,32$; $p = 0,087$) и седьмой фактор поперечного профиля бугра (высота, крутизна склонов) ($Beta = 0,29$; $p = 0,099$). Для склонов аналогичная модель совокупного влияния факторов оказалась менее достоверной (коэффициент детерминации 0,38 при $p = 0,07$); при этом в уравнение вошли те же значимые третий и пятый факторы (с преимущественным вкладом пятого).

Проведенное исследование позволило установить некоторые критические значения количественных показателей пространственной структуры ландшафта, при которых достигается высокая или низкая устойчивость функционирования древесного яруса в пределах бугров пучения и термокарстовых котловин.

Обратную корреляцию между мощностью сезонно-талого слоя и долей водных объектов в окрестностях можно объяснить тем, что со временем скорость увеличения площади термокарстовых озер уменьшается, поскольку рост размеров озер обратно пропорционален площади боковой поверхности озерной котловины. Известно, что в больших термокарстовых котловинах уровень воды более стабилен, чем в малых [21]. По этой причине постоянный уровень воды в меньшей степени вызывает сезонное оттаивание верхнего деятельного слоя мерзлых толщ, чем переменчивый. Наше исследование показало, что торфяно-минеральные бугры чаще соседствуют с термокарстовыми озерами, чем минеральные. Закономерность прослеживается на всех масштабных уровнях. Таким образом, стабильно высокая заозеренность окрестности может оказывать стимулирующее влияние на накопление торфа на поверхности бугра. Теплоизоляционные свойства торфа, в свою очередь, способствуют большей стабильности фитопродукционного функционирования торфяно-минеральных бугров, по сравнению с минеральными.

Проявление противоположных видов зависимости между долей лесов и мощностью СТС на разных масштабных уровнях объясняется тем, что речь идет о принципиально разных типах лесных фитоценозов. Леса и редколесья в ближней окрестности (до 500 м), как правило, произрастают на соседних буграх пучения, т. е. в сходной мерзлотной обстановке. Произрастание старовозрастных лесов и редколесий в ближайших окрестностях обусловлено относительной стабильностью торфяно-минеральных бугров, как правило, благодаря неглубокому протаиванию. Если мерзлота на поверхности бугров перестает быть стабильной, лесная растительность деградирует в результате образования термокарстовых просадок или оползания склонов.

На вершинах высоких бугров обнаружена повышенная нестабильность фитопродукционного функционирования по сравнению со склонами. Это согласуется с данными о меньшей стабильности рельефа вершин бугров по сравнению со склонами [22] и индицирует менее стабильное положение кровли мерзлых пород растущих бугров. Для склонов фитопродукционная функция может стабилизироваться примыкающими озерами.

Повышенная изменчивость приростов на вершинах высоких бугров, окруженных плоскобугристыми торфяниками, свидетельствует о тесной парагенетической связи между этими видами урочищ. Торфяники служат источниками влаги, вызывающей рост миграционных бугров и нестабильность состояния кровли мерзлоты и мощности сезонно-талого слоя, что обуславливает высокую изменчивость приростов на минеральных буграх. Невысокие бугры, видимо, испытывают меньшее давление растущего ледяного ядра, но подвержены более активной динамике на склонах, что повышает там изменчивость приростов. В то же время на крупных низких формах рельефа, окруженных озерами и сплавинами, малая изменчивость приростов свидетельствует об их стабильности. Из факторов ландшафтной структуры наибольший относительный вклад в рост временной изменчивости приростов вносит динамичность рельефа поверхности бугра, основным индикатором которой служит рост глубины термокарстовых просадок и криогенных трещин. Иначе говоря, чем более дробная фациальная структура подурочища, тем более чутко приросты реагируют на межгодовые колебания состояния среды.

ВЫВОДЫ

1. Зависимость приростов кедр, их временной изменчивости и пространственной вариабельности от размера и высоты бугров свидетельствует об обусловленности фитопродукционного функционирования их генезисом и сопутствующим различием современных криогенных процессов. Минеральные бугры часто отличаются от торфяно-минеральных пониженной стабильностью приростов кедр.

2. В местности с преобладанием плоскобугристых торфяников фитопродукционное функционирование минеральных бугров пучения более изменчиво по годам, чем в местности с чередованием термокарстовых озер, сфагновых болот и бугров пучения. Приросты кедр на торфяно-минеральных буграх менее чувствительны к соседству плоскобугристых торфяников.

3. Древостои вершин и склонов бугров по-разному реагируют на климатические колебания в зависимости от ландшафтной структуры окрестности и высоты бугра. При близком соседстве озер на вершинных поверхностях изменчивость фитопродукционного функционирования снижается. На низких буграх изменчивость приростов на вершинах ниже, чем на склонах, на высоких буграх — наоборот.

4. Чувствительность фитопродукционного функционирования древоств к температурным колебаниям повышается с ростом дробности фациальной структуры, обусловленной развитием термокарстовых просадок и криогенных трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (19-05-00786).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Turner M.G., Gardner R.H. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. — New York: Springer, 2015. — 482 p.
2. Hall O., Hay G.J., Bouchard A., Marceau D.J. Detecting dominant landscape objects through multiple scales: An integration of object-specific methods and watershed segmentation // Landscape Ecology. — 2004. — Vol. 19, N 1. — P. 59–76.
3. Коновалова Т.И. Картографическое моделирование изменчивости геосистем // Моделирование географических систем. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2004. — С. 24–28.
4. Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. Влияние глобального потепления на ландшафтную структуру Северного Кавказа // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2012. — № 4. — С. 45–61.
5. Shugart H.H., Michaels P.J., Smith T.M., Weinstein D.A., Rastetter E.B. Simulation Models of Forest Succession // SCOPE 35. Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes. — New York: John Wiley and Sons, 1988. — 376 p.
6. Phillips J.D. Global and local factors in Earth surface systems // Ecological Modelling. — 2002. — Vol. 149, N 3. — P. 257–272.
7. Rupp T.S., Starfield A.M., Chapin F.S. III A frame-based spatially explicit model of subarctic vegetation response to climatic change: Comparison with a point model // Landscape Ecology. — 2000. — Vol. 15, N 4. — P. 383–400.
8. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурзбаев 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 // ДАН. — 1998. — Т. 358, № 5. — С. 681–684.
9. Комплексный мониторинг северотаяжных геосистем Западной Сибири / Отв. ред. В.П. Мельникова. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. — 207 с.
10. Бочкарёв Ю.Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. — 2014. — Т. 138. — С. 251–270.
11. Пономарёва 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. 16, № 4. — С. 21–30.
12. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. — 2012. — № 6. — С. 18–32.
13. Москаленко Н.Г. Изменения растительности севера Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенных изменений // Изв. РГО. — 2012. — Т. 144, вып. 1. — С. 63–72.
14. Бочкарёв Ю.Н., Дьяконов К.Н. Дендрохронологическая индикация функционирования ландшафтов на северной и верхней границах леса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2009. — № 2. — С. 37–50.
15. Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология. — 2012. — № 5. — С. 43–51.

16. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. — 571 с.
17. **Serrallà M.** Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics // Quaternary Research. — 2011. — Vol. 75. — P. 366–370.
18. Мельников Е.С., Тагунова Л.Н., Лазарева Н.А., Москаленко Н.Г. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газонной провинции. — Новосибирск: Наука, 1983. — 165 с.
19. Бердников Н.М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. — 2012. — Т. 16, № 3. — С. 81–86.
20. **Cook E.R., Holmes R.** Guide for computer program ARSTAN // Tree-ring chronologies of Western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. — Tucson: University of Arizona, 1986. — P. 50–65.
21. Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М.: Изд-во Ин-та геоэкологии РАН, 2014. — 27 с.
22. Пономарёва О.Е., Гравис А.Г., Бляхарчук Т.А., Бочкарёв Ю.Н., Устинова Е.В., Бердников Н.М., Москаленко Н.Г. Реакция островной криолитозоны северной тайги Западной Сибири на изменение климата // Материалы V конф. геоэкологов России, 14–17 июня 2016 г. — М.: Университетская книга, 2016. — Т. 2, ч. 6. — С. 107–114.

Поступила в редакцию 03.03.2021

После доработки 24.05.2021

Принята к публикации 29.12.2021