ЭКОЛОГИЯ, 2023, № 6, с. 416–421

УДК 630+582.475(235.222)*

ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА КАТУНСКОМ ХРЕБТЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 120 ЛЕТ

© 2023 г. Д. А. Савчук[a], *, Е. Е. Тимошок[a], Е. О. Филимонова[a], С. А. Николаева[a]

[a] *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия 634055 Томск, просп. Академический, 10/3*

**e-mail: savchuk@imces.ru*

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.
После доработки 14.06.2023 г.
Принята к публикации 29.06.2023 г.

Описана временна́я динамика верхней границы леса в ороклиматических условиях Катунского хребта на примере горно-ледникового бассейна Аккем за последние 120 лет. Рассмотрены изменения плотности деревьев и подроста кедра и лиственницы на восточном и западном склонах, зарождение и особенности образования плотных и разреженных групп и внешние факторы, влияющие на их формирование.

Ключевые слова: верхняя граница леса, климат, экологические факторы, Горный Алтай

DOI: 10.31857/S0367059723060082, **EDN:** BNQYJA

Верхняя граница леса является прекрасным природным объектом для изучения раннего отклика лесных экосистем на изменения климата ([1–3] и др.), поскольку в высокогорьях деревья произрастают в экстремальных климатических условиях, и реакция границы леса на изменения климата выражена наиболее четко. Граница также является высокочувствительным индикатором воздействия биотических и абиотических факторов среды на региональном и локальном уровнях [4]. С началом глобального потепления климата в мире настолько активно развернулись исследования верхних границ горных систем, что к настоящему времени в зарубежной литературе появилось более 20 обзоров по этой тематике (см., например, [3, 5–7]). В обзорах акцентировалось, что для лучшего понимания причинно-следственных связей динамики границы и ее отклика на изменения окружающей среды и климата важно изучать верхнюю границу леса на локальном и даже микромасштабном уровнях [7].

В России учениками и последователями С.Г. Шиятова наиболее изучена верхняя граница леса на Урале (см. [8–10]). Также подобные исследования проводились в Хибинах [11], на Кавказе [12], плато Путорана [13, 14], в Кузнецком Алатау [15], горах Южной Сибири [16], Прибайкалье [17] и др. В Горном Алтае изучены структура и особенности формирования древостоев хвойных на границе леса за 200 лет [18] и динамика заселения лесотундрового экотона [19] на Северо-Чуйском хребте, а также особенности образования и функционирования разных видов кулис на г. Красная [20]. На Катунском хребте динамику верхней границы леса не изучали.

Цель настоящей работы – описать временну́ю динамику верхней границы леса в ороклиматических условиях Катунского хребта на примере горно-ледникового бассейна Аккем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Динамику верхней границы леса в ороклиматических условиях Катунского хребта изучали на его северном макросклоне, в горно-ледниковом бассейне Аккем, расположенном в наиболее высокой части хребта. В бассейне развит высокогорный глубоко расчлененный альпийский рельеф. На склонах отмечены скальные выходы, осыпи, участки травянистых тундр, леса, пятна петрофитной растительности.

Растительный покров связан с охлаждающим влиянием ледников г. Белуха, распространяющимся на десятки километров вниз по долине р. Аккем. Верхняя граница леса образована кедром сибирским (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). В бассейне распространены лиственнично-кедровые и кедровые разнотравно-зеленомошные и бруснично-зеленомошные леса.

По данным ГМС Аккем (49°55′ с.ш., 86°32′ в.д., 2050 м над ур. м., 1951–2023 гг.), климат бассейна характеризуется низкими зимними (от –15.1 до –17.0°C), летними (от +7.9 до +9.5°C) и среднего-

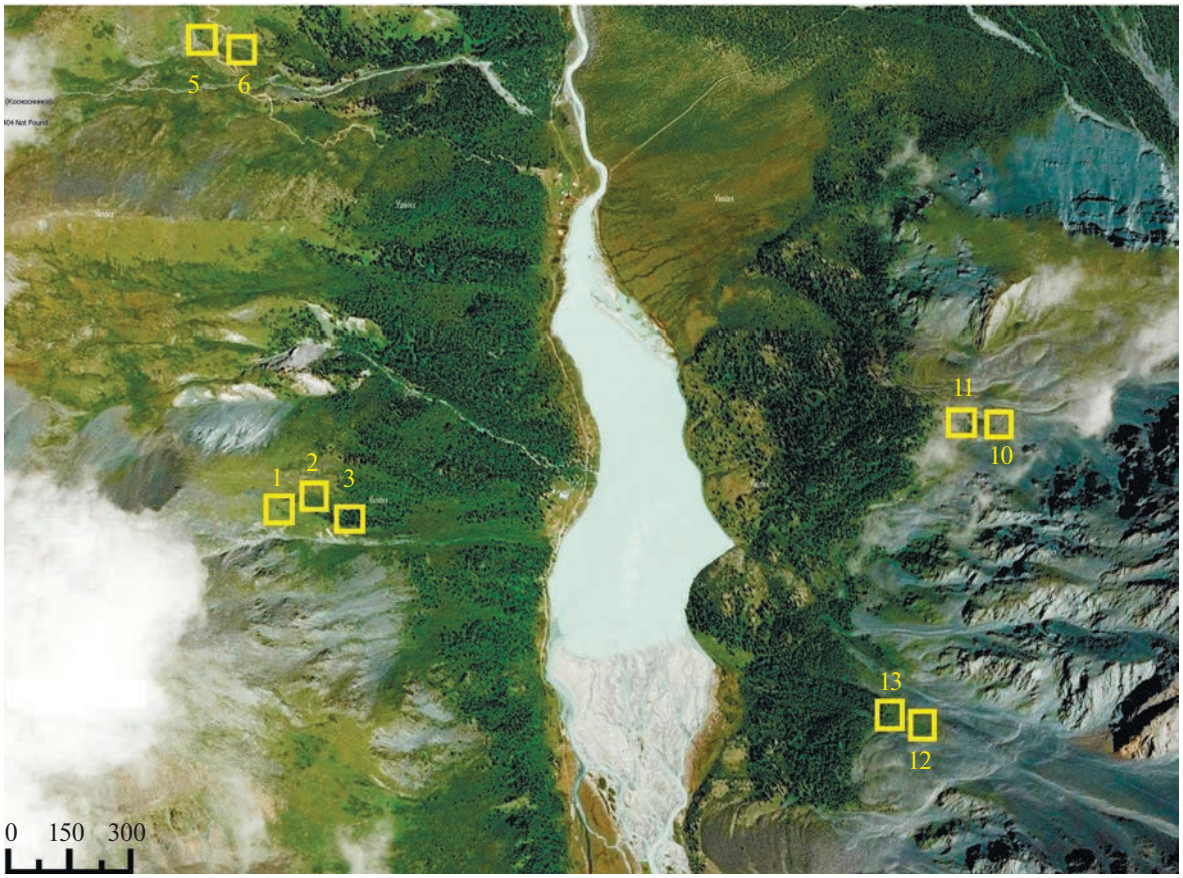

Рис. 1. Спутниковое изображение горно-ледникового бассейна Аккем (Катунский хребет, Горный Алтай). Квадратами показано расположение пробных площадей, рядом указан их номер.

довой (–3.8°C) температурами; годовая сумма осадков 550 мм, из которых 55% выпадает летом и только 4% зимой.

Для оценки динамики верхней границы леса на восточном и западном склонах долины от границы сомкнутых лесов до границы отдельных деревьев и подроста кедра и лиственницы были заложены 4 высотных профиля на высотах 2190–2400 м над ур. м. (рис. 1), включающих 9 пробных площадей (ПП) размером 20 × 40 м (табл. 1). На каждой ПП проведен сплошной перечет взрослых деревьев и подроста (239 и 123 экз. соответственно). К подросту отнесены молодые особи высотой менее 1.5 м и возрастом менее 50 лет. Для определения возраста у 52 деревьев и крупного подроста взяты керны максимально близко к поверхности земли. Для более точного его установления измеряли ширину годичных колец на установке LINTAB с точностью 0.01 мм, затем полученные ряды перекрестно датировали для выявления ложных и выпавших колец [21]. Возраст определяли по сдатированным годичным кольцам с учетом поправок на количество колец, отсутствующих на керне у сердцевины, и на высоту отбора керна [22]. Возраст мелкого подроста (98 модельных особей) устанавливали по годичным приростам стволика с контролем по годичным кольцам. Фиксировались живые и погибшие особи подроста. Тесноту связи между количеством появившихся деревьев по пятилетним периодам и средними значениями температуры и осадков за текущие и предыдущие пятилетия по отдельным месяцам, холодному (ноябрь–март) и теплому (июнь–август) периодам оценивали с помощью коэффициента корреляции Спирмена (R) – в статье приведены только его достоверные значения (при $p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Верхняя граница в горно-ледниковом бассейне Аккем занимает полосу выше сомкнутых лесов на высотах от 2190 до 2400 м над ур. м. (см. табл. 1). На восточном склоне первые единичные деревья лиственницы появились 120 лет назад, на западном – 230 (годы ранее 1890 г., т.е. более 120 лет назад, на рис. 2 и 3 не приводятся). Динамика заселения кедра и лиственницы за последние 120 лет синхронна на восточном и западном склонах: с 1920-х по 1970-е гг. наблюдается монотонное увеличение плотности деревьев, с 1980-х по 2000-е –

Таблица 1. Характеристика пробных площадей и собранного материала в горно-ледниковом бассейне Аккем (Катунский хребет, Горный Алтай)

№ п.п.	Абсолютная высота, м	Крутизна склона, град	Категория древесной растительности	Древостой		Подрост	Кол-во взрослых деревьев, экз
				состав (по запасу)	плотность, экз/га	плотность, экз/га	
Восточный склон							
1	2370	25–30	Одиночные деревья	9К1Л	75	150	18
5	2340	10	Одиночные деревья	8Л2К	125	100	10
2	2330	30	Разреженная группа деревьев	10К + Л	125	350	62
6	2330	5–7	Плотная группа деревьев	10К	450	550	39
3	2320	30	Плотная группа деревьев	10К	507	767	27
Западный склон							
10	2290	10–20	Одиночные деревья	ед.Л	33	200	3
12	2200	25–35	Одиночные деревья	9Л1К	125	350	16
11	2265	2–5	Разреженная группа деревьев	10Л + К	433	600	36
13	2190	25–30	Разреженная группа деревьев	7Л3К	300	750	28

увеличение плотности подроста, в 2010-е – резкое уменьшение этого показателя (рис. 2а, 2б).

Проведенные исследования показали, что плотные группы деревьев (сомкнутость крон 0.4–0.5, расстояние между деревьями менее 5 м) на высотах 2320–2330 м над ур. м. отмечены только на восточном склоне. Они представляют собой кулисы, вытянутые вдоль склона с довольно высокой плотностью (450–500 экз/га) деревьев кедра при полном отсутствии лиственницы. В процессе формирования групп выделяются три этапа: 1900–1930-е гг. – постоянно низкая плотность деревьев (13–26 экз/га), 1940–1970-е и 1980–2000-е гг. – увеличение этого показателя (от 52 до 142 экз./га и от 65 до 194 экз/га соответственно) (рис. 3в, табл. 1).

Разреженные группы деревьев из кедра и лиственницы (сомкнутость крон 0.2–0.3, расстояние между деревьями 5–10 м) располагаются на высотах 2320–2330 м над ур. м. на восточном и 2190–2265 м на западном склонах. Плотность деревьев

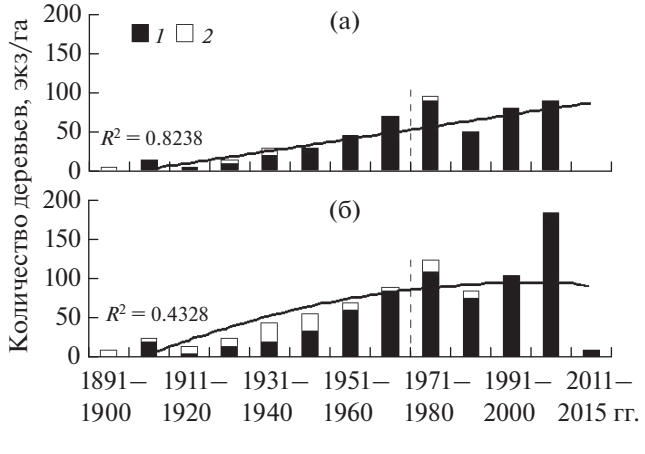

Рис. 2. Время появления деревьев и подроста кедра (*1*) и лиственницы (*2*) на восточном (а) и западном (б) склонах в горно-ледниковом бассейне Аккем (Катунский хребет) за период 1891–2015 гг. Вертикальная пунктирная линия разделяет взрослые деревья и подрост. Приведена сплошная линия тренда и величина достоверности аппроксимации R^2.

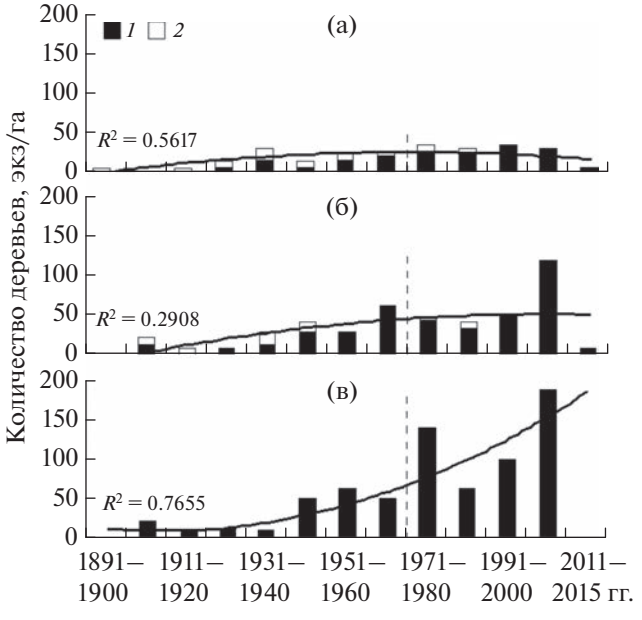

Рис. 3. Время появления деревьев и подроста кедра (*1*) и лиственницы (*2*) в горно-ледниковом бассейне Аккем (Катунский хребет) за период 1891–2015 гг.: а – одиночные деревья, б – разреженные, в – плотные группы. Вертикальная пунктирная линия разделяет взрослые деревья и подрост.

на восточном склоне (125 экз/га) более чем в 2 раза ниже, чем на западном (300–433 экз/га). Особенности формирования разреженных групп деревьев иные, чем плотных: в 1900–1970-е гг. отмечена невысокая плотность деревьев кедра и лиственницы (20–60 экз/га), а с 1980-х гг. резко повышается плотность подроста кедра – от 47 до 120 экз/га, подрост лиственницы единичен (рис. 3б, табл. 1).

Формирование групп деревьев на восточном и западном склонах имеет свои особенности. На восточном склоне в 1902 г. первыми заселились 2 дерева кедра (113 лет), ставшие «ядром» зарождения самой старой плотной группы, а в 1929 г., через 27 лет, появилось еще одно дерево кедра (86 лет). В 1950–1960-е гг. заметно увеличилось количество молодых деревьев, в 1990–2000-е гг. – подроста кедра. На западном склоне в 1918 и 1932 гг. “ядром” самой старой разреженной группы выступили лиственницы (97 лет и 83 года), в 1980–2000 гг. появился густой подрост кедра, с 1990-х подрост лиственницы отсутствует.

Одиночные деревья кедра и лиственницы (сомкнутость крон до 0.1, расстояние между деревьями более 10 м) произрастают на высотах 2340–2370 м над ур. м. на восточном и 2200–2290 м на западном склонах; выше (до 2440 м над ур. м.) поднимается только подрост кедра на восточном склоне. Плотность одиночных деревьев на обоих склонах была низкой на протяжении последних 120 лет (5–23 экз/га – у кедра, 5–14 – у лиственницы). Деревья кедра появились в 1920-х гг., лиственницы – в 1890-х гг. (см. рис. 3а). Подрост кедра обилен, подрост лиственницы старше 30 лет единичен, а более молодой отсутствует.

В настоящее время 80–115-летние деревья кедра и лиственницы в плотных группах генеративные: они могут участвовать в поддержании существования группы собственным семенным материалом. Репродуктивная граница обоих видов в бассейне Аккем проходит на высоте 2370 м над ур. м.

ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшим фактором, определяющим динамику верхней границы леса, является температура воздуха [5], что отмечено в Альпах [6, 7], Хибинах [11], на Южном Урале [9]. При этом она играет различную роль при заселении лиственниц на разных временны́х интервалах и разных высотных уровнях экотона верхней границы леса на плато Путорана [14]. Корреляционный анализ показал, что в горно-ледниковом бассейне Аккем температура довольно слабо влияет на появление деревьев в погодичной динамике (R = 0.27 для марта, 0.30 – для августа, 0.32 – для ноября только на западном склоне). Увеличение плотности подроста кедра на верхней границе бассейна Аккем с 1980-х гг., особенно на западном склоне, связано с началом потепления климата, инструментально зафиксированного на Алтае [23], тогда как подрост лиственницы в эти годы был крайне немногочисленным, а с 1990-х гг. ее возобновление прекратилось (см. рис. 2а, 2б). Примечательно, что с 1970-х гг. повышалась плотность подроста хвойных на верхних границах разных горных систем: в Горном Алтае на Северо-Чуйском хребте [18, 19], в Альпах [6], на Урале на склонах с более тонким снежным покровом [10]. Во всех регионах ускорение темпов заселения склонов связывали с потеплением климата [2], а региональные/локальные вариации этого процесса – с защищенностью микроместообитаний от ветра, толщиной снежного покрова и температурой почвы [10]. Следует заметить, что более ранний пик появления хвойных деревьев на верхней границе, зафиксированный в Альпах в 1920–1940-е гг. [6], отмечен нами для лиственницы в 1920-х и кедра в 1930-х гг. на Северо-Чуйском хребте [18, 19], на Катунском хребте отсутствовал.

Другим важным фактором является количество летних и зимних осадков [7]. Например, высказано предположение о связи верхней границы распространения пихты на Кавказе с режимом летнего увлажнения [12], выявлена положительная связь плотности деревьев на границе леса с высотой снежного покрова [6] и температурой почвы [10]. По нашим данным, на более сухом восточном склоне количество появившихся деревьев достоверно больше зависит от суммы осадков июня 5-летнего периода, предшествовавшего их появлению (R = 0.76), чем текущего (R = 0.55), а на более влажном западном склоне – от предшествовавшего пятилетия (R = 0.53). В то же время на восточном склоне появление деревьев зависит от суммы зимних осадков (R = 0.77 для января, 0.55 – для периода с ноября по март), а на западном такая связь отсутствует. Группы деревьев на верхней границе на восточном склоне сформировались в понижениях рельефа глубиной до 2 м, где вследствие метелевого переноса накапливался снег, что способствовало формированию плотных кулис вдоль склона, а на открытых участках, где снежный покров постоянно сдувался, подрост элиминировал. Наибольшее количество погибших молодых особей кедра наблюдалось среди одиночных деревьев, а наименьшее – в плотных группах. Отмеченное резкое снижение плотности подроста в 2010–2015 гг. (см. рис. 2, 3) вызвано, вероятно, малоснежными холодными зимами в 2011, 2012, 2014 гг., когда температуры января–февраля были ниже среднемноголетней на 4.4–5.8°C, а суммы осадков составляли 20–40% от нормы.

Подобная роль снежного покрова в сохранении подроста лиственницы отмечена в экотоне верхней границы на Приполярном Урале [24].

Тесную связь появления деревьев и снега фиксировали также на верхней границе в Хибинах [11], на Южном Урале [9], при формировании разных видов кулис на г. Красная в Горном Алтае [20].

Еще один влияющий на динамику верхней границы фактор – экзогенные гравитационные процессы [25]. Зафиксированные нами оползневые явления в бассейне Аккем ограничивают продвижение деревьев вверх, снижая абсолютную высоту верхней границы леса на западном склоне по сравнению с восточным. Разница таких высот в настоящее время составляет 80 м.

Следует отметить, что формирование верхней границы леса на склонах происходит в основном за счет возобновления кедра. Аналогичная закономерность отмечена на верхних границах на Северо-Чуйском хребте [19] и г. Красная [20]. Предположение, что возобновление лиственницы на верхней границе в Прибайкалье увеличилось с 1980-х гг. за счет повышения сумм осадков в зимний период [17], в бассейне Аккем не нашло подтверждения.

Тренды временно́й динамики верхней границы леса в бассейне Аккем (см. рис. 2, 3) свидетельствуют о том, что за последние 120 лет появление деревьев идет наиболее активно в плотных группах и слабо – среди одиночных деревьев. Это согласуется с выявленной в Хибинах [11] и на г. Красная в Горном Алтае [20] закономерностью по преимущественному заселению участков между уже сформировавшимися группами деревьев, чем открытых участков на горных склонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верхняя граница леса в горно-ледниковом бассейне Аккем (Катунский хребет) занимает полосу выше сомкнутых лесов на восточном склоне на высотах 2320–2370 м, на западном – на 2190–2290 м над ур. м. Среднемесячные температуры с учетом их вертикальных градиентов [26] на верхнем пределе распространения взрослых деревьев кедра и лиственницы (2370 над ур. м.) составляют +6.6°С для июня, +7.9°С – для июля и +6.3°С – для августа, что и определяет современную температурную границу их произрастания. На восточном склоне первые единичные деревья на верхней границе появились только 120 лет назад, на западном – на 110 лет раньше (230 лет). С 1980-х гг. плотность подроста кедра растет, подрост лиственницы с 1990-х гг. отсутствует. Результаты, полученные в ходе исследования в ороклиматических условиях горно-ледникового бассейна, уточняют общую картину формирования верхней границы леса за столетний период, важны для понимания продвижения границы в условиях близости ледников и активных оползневых процессов, могут дополнить модели реакции высокогорных экосистем на изменения климата, позволят выполнить достоверные прогнозы изменений окружающей среды.

Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта № 121031300226-5, FWRG–2021–0003). Авторы благодарят к.б.н. А.Ю. Бочарова и к.б.н. М.Н. Белову за помощь в сборе полевого материала. Также выражаем благодарность анонимному рецензенту, чьи ценные замечания и советы способствовали улучшению статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и подтверждают, что работа не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г.* Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 209 с.
2. *Grace J., Berninger F., Nagy L.* Impacts of climate change on the tree line // Ann. Bot. 2002. V. 90. № 4. P. 537–544. https://doi.org/10.1093/aob/mcf222
3. *Kullman L.* A review and analysis of factual change on the max rise of the swedish scandes treeline, in relation to climate change over the past 100 years // J. Ecol. Nat. Res. 2018. V. 2. № 6. Article 000150. P. 1–16. https://doi.org/10.23880/jenr-16000150
4. *Kim J.-W., Lee J.-S.* Dynamics of alpine treelines: positive feedbacks and global, regional and local controls // J. Ecol. Environ. 2015. V. 38. № 1. P. 1–14. https://doi.org/10.5141/ecoenv.2015.001
5. *Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P.* Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // Ecol. Let. 2009. V. 12. № 10. P. 1040–1049. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
6. *Holtmeier F.-K., Broll G.* Altitudinal and polar treelines in the northern hemisphere – causes and response to climate change // Polarforschung. 2010. V. 79. № 3. P. 139–153. https://doi.org/10.2312/polarforschung.79.3.139
7. *Holtmeier F.-K., Broll G.* Treeline research – from the roots of the past to present time. A review // Forests. 2020. V. 11. № 1. Article 38. P. 1–31. https://doi.org/10.3390/f11010038
8. *Шиятов С.Г.* Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
9. *Моисеев П.А., ван дер Меер М., Риглинг А., Шевченко И.Г.* Влияние изменений климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала // Экология. 2004. № 3. С. 1–9. [*Moiseev P.A., van der Meer M., Rigling A., Shevchenko I.G.* Effect of climatic changes on the formation of Siberian spruce generations in subglotsy tree stands of the Southern Urals // Russ. J. Ecol. 2004. V. 35. № 3. P. 163–171.]

10. *Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazepa V.S.* et al. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? // Glob. Change Biol. 2014. V. 20. № 11. P. 3530–3543. https://doi.org/10.1111/gcb.12613

11. *Моисеев П.А., Галимова А.А., Бубнов М.О.* и др. Динамика древостоев и их продуктивности на верхнем пределе произрастания в Хибинах на фоне современных изменений климата // Экология. 2019. № 5. С. 341–355. [*Moiseev P.A., Galimova A.A., Bubnov M.O.* et al. Tree stands and their productivity dynamics at the upper growing limit in Khibiny on the background of modern climate changes // Russ. J. Ecol. 2019. V. 50. № 5. P. 431–444.] https://doi.org/10.1134/S106741361905008

12. *Акатов П.В.* Изменение верхней границы распространения древесных видов растений на Западном Кавказе (бассейн р. Белой) в связи с современным потеплением климата // Экология. 2009. № 1. С. 37–43. [*Akatov P.V.* Changes in the upper limits of tree species distribution in the Western Caucasus (Belaya river basin) related to recent climate warming // Russ. J. Ecol. 2009. V. 40. № 1. P. 33–38.] https://doi.org/10.1134/S1067413609010056

13. *Kirdyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A.* et al. 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia // Boreas. 2012. V. 41. № 1. P. 56–67. https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x

14. *Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В.* и др. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243–254. [*Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V.* et al. Structure and dynamics of tree stands at the upper timberline in the western part of the Putorana Plateau // Russ. J. Ecol. 2019. V. 50. № 4. P. 311–322. https://doi.org/10.1134/S1067413619040076 https://doi.org/10.1134/S0367059719040073

15. *Петров И.А., Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т.* Реакция хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау на изменение климата // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22. № 4. С. 518–527. https://doi.org/10.15372/sej20150403

16. *Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L., Ranson K.J.* Climate-induced mountain tree-line evolution in southern Siberia // Scand. J. For. Res. 2010. V. 25. № 5. P. 446–454. https://doi.org/10.1080/02827581.2010.509329

17. *Воронин В.И., Осколков В.А., Буянтуев В.А., Сизых А.П.* Тенденции динамики верхней границы леса в высокогорьях Северного Прибайкалья // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 77–85. https://doi.org/10.15372/SJFS20160408

18. *Тимошок Е.Е., Филимонова Е.О., Пропастилова О.Ю.* Структура и формирование древостоев хвойных в экотоне верхней границы древесной растительности Северо-Чуйского хребта (Центральный Алтай) // Экология. 2009. № 3. С. 187–194. [*Timoshok E.E., Filimonova E.O., Propastilova O.Yu.* Structure and formation of conifer stands in the upper timberline ecotone on the North Chuya Ridge, Central Altai // Russ. J. Ecol. 2009. V. 40. № 3. P. 172–179.] https://doi.org/10.1134/S1067413609030059

19. *Тимошок Е.Е., Николаева С.А., Тимошок Е.Н.* и др. Экологический мониторинг автотрофного блока наземных экосистем в Северо-Чуйском центре оледенения (Центральный Алтай) // Сиб. экол. журн. 2022. № 3. С. 249–262. [*Timoshok E.E., Nikolaeva S.A., Timoshok E.N.* et al. Environmental monitoring of the autotrophic section of terrestrial ecosystems in the Severo-Chuisky glaciation center (central Russian Altai Mountains) // Contemp. Probl. Ecol. 2022. V. 15. № 3. P. 201–211.] https://doi.org/10.1134/S199542552203012X

20. *Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L.* et al. Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // J. Mt. Sci. 2017. V. 14. № 3. P. 442–452. https://doi.org/10.1007/s11629–016–4286–7

21. *Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В.* и др. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с.

22. *Николаева С.А., Савчук Д.А.* Оценка методов дендроиндикации при датировании экзогенных гравитационных процессов прошлого в верховьях р. Актру (Горный Алтай) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 392–404. https://doi.org/10.31857/S2587556621030110

23. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: Оценочный доклад. М.: WWF России, 2011. 168 с.

24. *Григорьев А.А., Моисеев П.А., Нагимов З.Я.* Динамика верхней границы древесной растительности в высокогорьях Приполярного Урала под влиянием современного изменения климата // Экология. 2013. № 4. С. 284–295. [*Grigor'ev A.A., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y.* Dynamics of the timberline in high mountain areas of the nether-Polar Urals under the influence of current climate change // Russ. J. Ecol. 2013. V. 44. № 4. P. 312–323.] https://doi.org/10.1134/S1067413613040061

25. *Leonelli G., Pelfini M., Morra di Cella U., Garavaglia V.* Climate warming and the recent treeline shift in the European Alps: The role of geomorphological factors in high-altitude sites // Ambio. 2021. V. 40. № 3. P. 264–273. https://doi.org/10.1007/s13280-010-0096-2

26. *Севастьянов В.В.* Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск: Изд-во ТГУ, 1998. 201 с.