

СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА ГРАНИЦ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ХРЕБТА ЗАПАДНЫЙ ТАННУ-ОЛА В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

Х.Б. Куулар

ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, лаборатория геоинформатики и моделирования процессов, вед. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: khbkr@list.ru

В работе приведены результаты отклика темнохвойного леса и подроста кедра в лесах хребта Западный Танну-Ола на наблюдаемое изменение климата в регионе в последние десятилетия. По данным близлежащей метеостанции Чадан аномалия среднегодовой температуры воздуха составила $1,6 \pm 0,8^\circ\text{C}$, вегетационного периода – $1,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$. Ключевые участки исследования расположены на территории Республики Тыва в пределах $50^\circ55'–51^\circ15'$ с. ш. и $91^\circ30'–92^\circ20'$ в. д., что соответствует трем высотным уровням среднегорья: нижняя полоса (1100–1300 м над ур. моря), граничащая со степью и покрытая лиственничными лесами с березой; средняя полоса (1300–1800 м над ур. моря), покрытая лиственничными и кедровыми лесами; лиственничные и кедровые леса верхней полосы (1800–2120 м над ур. моря). В ходе полевых работ определяли прирост вершинного побега подроста кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), высоту, возраст и общее количество подроста. Количественно определили корреляционные связи между приростом, температурой воздуха и относительной влажностью, используя данные метеостанции Чадан за ряд лет. Полученные результаты свидетельствуют о положительной корреляции в нижней полосе среднегорья с относительной влажностью, в верхней полосе среднегорья с температурой воздуха. Увеличение количества подроста кедра на нижней и верхней полосах среднегорья подтверждает смещение темнохвойного леса вниз и вверх по хребту при потеплении регионального климата. Космические снимки Landsat-TM/ETM+/OLI показывают рост значений вегетационных индексов *NDVI* и *NDWI*. По данным космоснимков получено увеличение площади темнохвойных лесов за последние десятилетия на территории ключевых участков, однако достоверность этих данных не оценивалась статистически. Работы требуют продолжения в полевых условиях.

Ключевые слова: подрост кедра, ключевые участки, потепление климата, снимки Landsat, корреляционные связи

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы широко используются для мониторинга растительности и параметров окружающей среды. В частности, анализ динамики лесов дистанционными методами в период потепления климата проводился в работах [Тельнова, 2017; Fang, He, 2020; Camarretta et al., 2020; Zhang et al., 2021; Park et al., 2021]. В настоящее время большое внимание уделяется изучению горных лесов, так как экосистемы горных территорий более чувствительны, чем равнинные к климатическим изменениям [Шиятов и др., 2007; Ivanova, Soukhovolsky, 2016; Гайсин и др., 2020; Бочарников, 2022]. Сбору и анализу данных, свидетельствующих о потеплении климата в горах Южной Сибири, посвящено много работ [Петров и др., 2019; Vabushkina et al., 2018; Кошкарров и др., 2021]. Республика Тыва расположена в южной части гор Южной Сибири. Хвойные леса отличаются повышенной чувствительностью к изменениям климата. В связи с этим леса региона стали объектом пристального изучения [Баринов и др., 2014; Тайник и др., 2015; Приходько и др., 2018].

Природные особенности региона. Климатические условия. Климат резко континентальный, среднегодовая температура $-0,9 \pm 0,8^\circ\text{C}$, среднегодовые осадки $255,1 \pm 48,8$ мм по данным метеостанции Чадан, расположенной у северного подножья хребта. В период с 2000 по 2016 г. аномалия годовой суммы осадков составила $45,5 \pm 12,8$ мм, среднегодовой температуры воздуха – $1,6 \pm 0,8^\circ\text{C}$, вегетационного периода – $1,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$ по сравнению с базовым периодом (1961–1990) (рис. 1). На рис. 2 приведены графики средней температуры и суммы осадков вегетационного периода (IV–IX месяцы) за 1967–2019 гг. По графику видно постепенное повышение температуры воздуха и рост суммы осадков. Осадки на ключевых участках значительно выше, чем на метеостанции Чадан, увлажнение меняется сильнее. График показывает только тенденцию изменения увлажнения в регионе.

Растительный покров. Темнохвойные леса на южном пределе своего распространения в горах приурочены к местообитаниям, обеспечивающим стабильное увлажнение субстрата и приземного

слоя воздуха. Исследования горных лесов Республики Тыва представляют особый интерес в связи с яркой выраженностью градиента эколого-ценотических условий. Внимание автора посвящено изучению динамики подроста кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на временных площадках вдоль профилного участка северного макросклона хребта Западный Танну-Ола как чуткого индикатора изменения лесов.

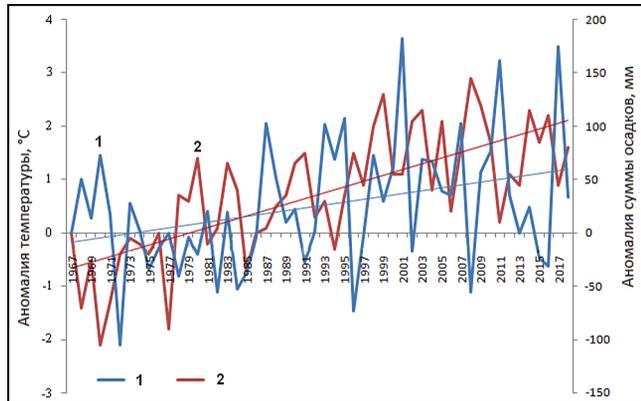


Рис. 1. Динамика аномалии среднегодовых осадков (мм) (1) и температуры (°C) (2) за 1967–2016 гг.

Fig. 1. Dynamics of the anomalies of average annual precipitation (mm) (1) and temperature (°C) (2) for 1967–2016

Кедр сибирский является основной лесообразующей породой региона, произрастает только в местах с повышенной относительной влажностью воздуха и встречается в качестве примеси в темнохвойной и светлохвойной тайге смешанного состава. В западной части республики на северных макросклонах хребтов кедр располагается обычно в средней и верхней частях лесного пояса (1300–2100 м над ур. моря) [Кедровые леса..., 1985]. Специфика его реакции на изменение метеорологических условий представляется достаточно информативной и важной для понимания влияния изменения климата на исследуемом хребте.

Ключевые участки исследования расположены в горах и соответствуют трем высотным уровням среднегорья: нижняя полоса, граничащая со степью и покрытая лиственничными лесами с березой (1100–1300 м над ур. моря); средняя полоса, покрытая лиственничными и кедровыми лесами (1300–1800 м над ур. моря); верхняя полоса, покрытая лиственничными и кедровыми лесами (1800–2120 м над ур. моря).

Здесь преобладают следующие типы леса: рододендрово-брусничный, разнотравно-брусничный, зеленомошно-багульниковый, ирисово-разнотравный, бруснично-зеленомошный, голубично-брусничный, мохово-багульниковый, бруснично-зеленомошно-

ерниковые, зеленомошно-разнотравные, бруснично-голубично-разнотравные, бруснично-разнотравные.

Цель данной работы – оценка динамики границ и состояния лесов с преобладанием кедр сибирского и хода роста естественного подроста кедр на ключевых участках хребта Западный Танну-Ола в связи с наблюдаемыми изменениями климата с использованием полевых данных и архива космоснимков Landsat.

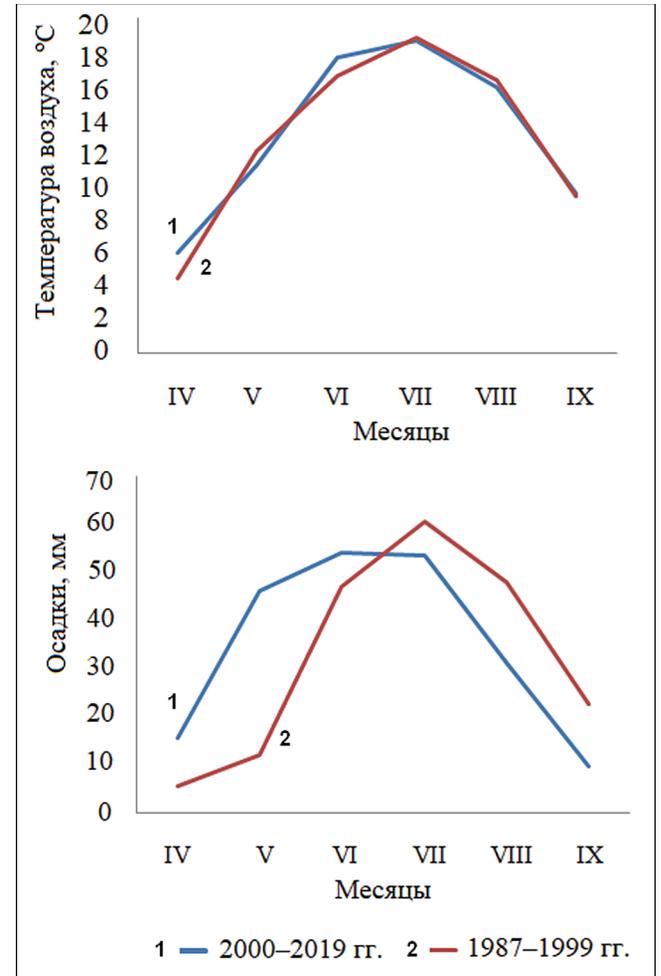


Рис. 2. Динамика температуры и осадков вегетационного периода

Fig. 2. Dynamics of temperature and precipitation of the growing season

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования выбран хр. Танну-Ола, поскольку он доступен для сбора полевых данных. Сбор, обработка полевых данных и дешифровка снимков выполнены автором традиционными методами. Полевые данные собраны вдоль трансекта через северный макросклон в различных типах леса (1000–2200 м над ур. моря). Ключевые участки исследования расположены в пределах 50°55'–51°15' с. ш. и 91°30'–92°20' в. д., что соответствует

трем высотным уровням: нижняя полоса среднегорья (1100–1300 м над ур. моря), граничащая со степью и покрытая лиственничными лесами с березой; средняя полоса среднегорья (1300–1800 м над ур. моря), покрытая лиственничными и кедровыми лесами; лиственничные и кедровые леса в верхней полосе среднегорья (1800–2120 м над ур. моря). Вдоль трансекта заложено 100 временных площадок размером 100 м² – по 4–8 площадок через 50–200 м в каждом высотном интервале на различных экспозициях. В ходе полевых работ определяли прирост вершинного побега, высоту, возраст и общее количество подроста кедра. Собранные таким образом данные, статистически обработанные, дают усредненную информацию о динамике подроста кедра сибирского за определенный интервал времени.

Мы исходили из того, что кедры, произрастающие в одном климатическом районе, сходно реагируют величиной прироста на изменение климата [Харук и др., 2018]. Показателем отклика подроста кедра на климатические факторы является степень вариабельности хода роста приростов. Изучению вершинного прироста деревьев посвящено много работ [Kuular, 2016; Kueppers et al., 2017; Харук и др., 2018; Misi et al., 2019]. На каждой площадке были выбраны по пять экземпляров подроста кедра. Измерение вершинного роста побегов (прироста) проводилось замером длины верхушечного побега линейкой с точностью до 1 мм. Длина приростов измерялась от основания побега до точки роста (по мутовкам). На изменчивость прироста хвойных деревьев в регионе наибольшее влияние оказывают климатические переменные [Власенко, 2002; Кухта, 2003].

Имея данные по динамике подроста кедра на горном профиле, была поставлена задача сравнить ее с динамикой климатических показателей, которые признаны в лесной экологии наиболее значимыми при работах географического плана. Для анализа погодных данных привлекались данные близлежащей метеостанции Чадан, которая имеет многолетний ряд наблюдений, а значит, отражает колебания и возможные тренды погодно-климатической обстановки не только в степи, но и в ближайших горах на ключевых участках. Такое допущение возможно, учитывая синхронные колебания термических показателей на крупных территориях со сложным рельефом.

Прирост рассматривался в связи со следующими климатическими показателями: плювиотермический коэффициент, относительная влажность воздуха, температура воздуха с апреля по сентябрь месяцы. Связь прироста и показателей климата оценивалась с помощью корреляционного анализа.

Оценка условия увлажнения вегетационного периода получена с помощью плювиотермического коэффициента (PT_{l-m}):

$$PT_{l-m} = \sum_{i=1}^m R_i / t_i, \quad (1)$$

где PT_{l-m} – значения плювиотермического коэффициента (l – с апреля, m – по июль); R_i – количество осадков в i -м месяце (мм); t_i – сумма средних температур в i -м месяце.

В качестве показателя, по которому осуществлялась оценка изменений растительного покрова, взят вегетационный индекс $NDVI$. Вегетационный индекс $NDVI$ рассчитывали по формуле [Rouse, 1973]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2)$$

где NIR и RED – спектральные значения каналов в диапазонах отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра соответственно.

Для оценки влажности лесного покрова был использован нормализованный разностный индекс влажности $NDWI$ [Gao, 1996]:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR 1}{NIR + SWIR 1}, \quad (3)$$

где NIR , $SWIR 1$ – спектральные значения каналов в диапазонах отражения в ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной области спектра, соответственно.

Тренды индексов $NDVI$ и $NDWI$ определены по коэффициентам корреляции с использованием их значений с апреля по август с номером года. Вырезаны из снимков три высотных уровня (нижняя, средняя и верхняя полосы среднегорья) с площадями 203, 187 и 222 км² соответственно. Были рассчитаны значения индексов $NDVI$ и $NDWI$. Рассчитывали максимальные значения индексов для каждого высотного уровня. Темнохвойным лесным участкам соответствуют максимальные значения вегетационного индекса.

Значения p показывают, были ли статистически значимыми тренды в развитии растительности. Положительные и высокие значения указывают на увеличение прироста, а отрицательные означают негативный тренд. Тренды считались статистически значимыми при $p < 0,1$.

Для анализа динамики вегетационных индексов лесов были отобраны безоблачные снимки Landsat-TM/ETM+/OLI за даты 31.01.1989, 19.02.1993, 10.03.1994, 10.04.1991, 24.05.1998, 18.06.1998, 03.07.1989, 31.08.1990, 26.09.1991, 20.11.1996, 20.12.1987, 23.01.2018, 20.02.2019, 04.03.2019, 04.04.2019, 17.05.2018, 04.06.2019, 04.07.2019, 04.08.2019, 29.09.2019, 04.10.2019, 09.11.2013,

25.12.2018, которые разделены на два периода (1987–1999 и 2000–2019).

Для выявления изменений площади лесов построены карты ключевых участков на основе комбинаций каналов 5, 4 и 3 для Landsat TM/ETM+ и каналов 6, 5 и 4 для Landsat OLI. Обработка снимков выполнена в геоинформационной системе Quantum GIS 3.12.3. Для проведения контролируемой классификации использован модуль Zdetsaka. Данный модуль позволяет получить качественную классификацию с обучением земной поверхности с методом GMM (Gaussian Mixture Model). Для обучения нами созданы shp-файлы основных классов растительного покрова: 1 – темнохвойные с преобладанием кедра сибирского, 2 – светлохвойные с преобладанием лиственницы сибирской, 3 – темнохвойные с преобладанием ели сибирской, 4 – мелколиственные с преобладанием мелколиственной и карликовой березы, 5 – участки без леса, 6 – луга, 7 – увлажненные участки и тундры, 8 – редколесье, 9 – кустарники, 10 – новые лесные участки и восстановленные леса. Точность данных, полученных в результате контролируемой классификации, оценена используя Каппа-статистику и общую точность. Оценка точности осуществлена в инструменте анализов «г. карра» (расчитывает матрицу ошибок и параметр каппа для оценки результатов классификации) программного пакета Quantum GIS 3.12.3. В качестве тестовых участков использовались наборы пикселей с классами легенды, определенных по материалам лесоустройства Министерства лесного хозяйства и природопользования Республики Тыва и полевых данных. Процедура оценки состоит из наложения слоев (карта лесов и полевых данных) на классифицированные изображения. В результате была получена общая точность классификации, включающая основные показатели статистики при оценке точности тематических карт, коэффициент Каппа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате полевых работ выявлено большое количество крупного подроста (1,0–2,0 м) и молодого поколения кедр (3–5 м) в нижней и верхней полосах среднегорья хребта Западный Танну-Ола (рис. 3). На рис. 4 представлена динамика прироста подроста кедр на всех высотных уровнях среднегорья. По графику видно, что увеличение темпов прироста у кедрового подроста идет на всех высотных уровнях за весь период исследования с 2000 по 2016 г.

Согласно полученным результатам, отклик на воздействие климатических факторов на разных склонах неодинаков. Благоприятными для роста



Рис. 3. Точки полевых наблюдений:

А – лиственничный лес с подростом кедр на нижней полосе среднегорья, 18.04.2016; Б – кедрово-лиственничный лес с подростом кедр на верхней полосе среднегорья, 18.10.2015

Fig. 3. Points of field observations:

A – larch forest with cedar undergrowth at the lower band of the middle mountains, 18.04.2016; B – cedar-larch forest with cedar undergrowth at the upper band of the middle mountains, 18.10.2015

подроста кедр были зеленомошно-разнотравные, бруснично-зеленомошно-ерниковые типы леса с составом древостоя 8К2Л, 6К2Е2Л, 10К в 2000 и 2007 гг., при аномалии температуры апреля 2,9 и 4,5°C. Для склона западной экспозиции благоприятными для роста подроста кедр были бруснично-голубично-разнотравные, бруснично-разнотравные типы леса с составом древостоя 8Л2К, 10Л, 5К4Л1Е в 2007 г., при аномалии температуры за теплый период 2°C.

На склонах северо-восточной экспозиции нижней полосы среднегорья благоприятными по увлажнению для роста подроста кедр были условия увлажнения в бруснично-разнотравных лесах с составом древостоя 6Е3Л1К и 5К3Е2Л в 2006 г., при аномалии суммы осадков с апреля по июль 53,7 мм. Благоприятными по теплу были 2009 и 2012 гг., при аномалии температуры апреля 3,8 и 2,7°C соответственно.

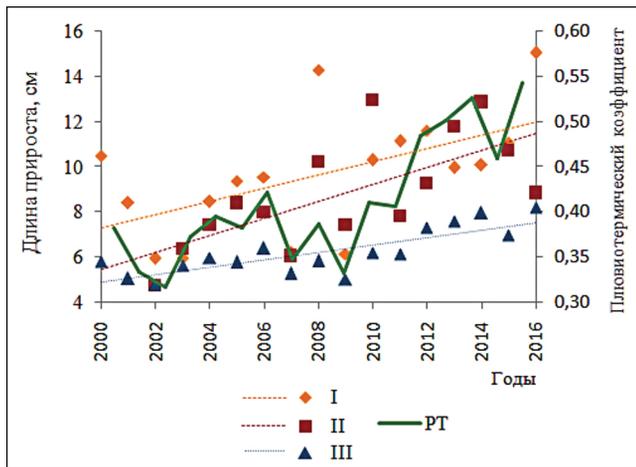


Рис. 4. Динамика вершинного прироста хр. Западный Танну-Ола: I – на нижней полосе среднегорья; II – на средней полосе среднегорья; III – на верхней полосе среднегорья; PT – плювиотермический коэффициент

Fig. 4. Dynamics of the top growth in the Western Tannu-Ola Range: I – at the lower band of the middle mountains; II – at the middle band of the middle mountains; III – at the upper band of the middle mountains; PT – pluviothermal coefficient

На склонах северной экспозиции нижней полосы среднегорья благоприятными для роста подростка кедра были условия в бруснично-зеленомошных лесах с составом древостоя 7КЗЕ1Л, 7Е2Л1К в 2008, 2010 и 2014 гг. с достаточными и большими осадками. В эти годы с апреля по июль сумма осадков на метеостанции Чадан составила 107, 245 и 109 мм (норма 107 мм). В горах, соответственно, логично ожидать еще больший рост увлажнения.

Для корреляционного анализа прироста подростка кедра с показателями климата выбраны: годовая относительная влажность, температура апреля и температура сентября, которые показали наиболее существенную корреляцию по срав-

нению с другими характеристиками (табл. 1). По таблице видно, что на склонах юго-западной экспозиции верхней полосы среднегорья приросты имеют значимую положительную корреляцию с температурой апреля ($r = 0,533$), а на склонах восточной экспозиции – с температурой сентября ($r = 0,504$).

Приросты нижней полосы среднегорья имеют положительную корреляцию с условиями влагообеспеченности. На склонах северо-восточной экспозиции нижней полосы среднегорья приросты имеют значимую положительную корреляцию с относительной влажностью ($r = 0,693$) и отрицательную корреляцию с температурой апреля и сентября. На склонах северо-восточной и северо-западной экспозиций значимая отрицательная корреляция прироста с температурой ($r = -0,907... -0,434$), возможно, связана с водным стрессом в результате испарения в апреле и отсутствия осадков в сентябре.

В табл. 2 представлены обобщенные характеристики подростка кедра на склонах разной экспозиции верхней и нижней полос среднегорья. Видно, что на склонах восточной экспозиции верхней полосы среднегорья и северо-восточной экспозиции нижней полосы среднегорья встречается наибольшее количество подростка кедра – 540 и 460 экз./га соответственно. Возможно, восточные склоны реже подвергаются низовым пожарам, как это отмечается в литературе [Типы лесов..., 1980; Поликарпов и др., 1986].

В табл. 3 представлены средние из максимальных значений индекса $NDVI$ за все сезоны года (зима, весна, лето и осень), которые подтверждают зарастание исследуемых участков подростом темнохвойных пород.

Таблица 1

Корреляция прироста подростка кедра с климатическими данными

Показатель	Верхняя полоса среднегорья				Нижняя полоса среднегорья			
	ЮЗ	З	СВ	В	С	СЗ	СВ	В
Относительная влажность	-0,724	-0,422	-0,269	-0,312	0,480	0,396	0,693	0,480
Температура апреля	0,533	0,125	0,127	0,186	-0,211	-0,568	-0,627	-0,169
Температура сентября	0,115	-0,169	0,372	0,504	-0,393	-0,434	-0,907	0,163

Примечание. Коэффициенты корреляции выше 0,3 являются значимыми на 5%-м уровне.

Значения индексов $NDVI$ и $NDWI$ используются как источники косвенных данных для оценки изменения продуктивности лесов. В табл. 4 представлены средние значения индексов $NDVI$ и $NDWI$. Важным изменением становится рост средних максимальных

значений индексов $NDVI$ и $NDWI$ в период 2000–2019 гг. на трех высотных уровнях по сравнению с периодом 1987–1999 гг. По таблице видно, что в период 2000–2019 гг. в нижней полосе среднегорья среднее значение индекса $NDVI$ увеличилось в 1,3

раза по сравнению с периодом 1987–1999 гг., а в верхней полосе среднегорья – в 1,2 раза. Между температурой воздуха и значениями индекса *NDVI* выявлены сильные положительные корреляции по Пирсону: от 0,84 до 0,87 в 1987–1999 гг. и от 0,87 до 0,91 в период 2000–2019 гг. на всех ключевых участках. Наибольшее значение корреляций отмечено в нижней полосе среднегорья (0,91). Также значения индекса *NDWI* показывают рост влажности на всех высотных уровнях в период 2000–2019 гг. Наибольший рост значений индекса *NDWI* отмечен в верхней полосе среднегорья (в 1,3 раза). Между температурой

воздуха и значениями индекса *NDWI* выявлены сильные отрицательные корреляции по Пирсону (–0,8) за 1987–1999 гг. в верхней полосе среднегорья, а также в период 2000–2019 гг. на всех высотных уровнях.

Следующим важным моментом становится изменение площади лесов. На основе снимков за даты 25.06.1992, 03.07.1995, 18.06.1998, 05.07.2010, 24.06.2015, 30.07.2019 в результате классификации построены карты наземного покрова и рассчитана площадь полученных классов. Общая точность классификации по летним снимкам составила 71%, а точность по Каппа-статистике – 63%.

Таблица 2

Характеристика подроста кедров по высотным уровням

Показатель	Верхняя полоса среднегорья				Нижняя полоса среднегорья			
	ЮЗ	З	СВ	В	С	СЗ	СВ	В
Количество подроста, экз./га	443,3	400,0	300,0	540,0	306,7	200,0	460,0	368,3
Высота подроста, см	137,0	101,5	104,3	164,0	136,1	158,7	142	139,3
Возраст, лет	26,5	17,4	21,8	26,0	13,9	14,0	17	14,7

Таблица 3

Максимальные значения *NDVI*

Зима		Весна		Лето		Осень	
Дата снимка	Макс. зн. <i>NDVI</i>	Дата снимка	Макс. зн. <i>NDVI</i>	Дата снимка	Макс. зн. <i>NDVI</i>	Дата снимка	Макс. зн. <i>NDVI</i>
<i>Нижняя полоса среднегорья</i>							
10.03.1994	0,385	24.05.1998	0,562	18.06.1998	0,785	26.09.1997	0,532
08.03.2019	0,621	11.05.2019	0,678	08.06.2021	0,817	23.09.2019	0,688
<i>Средняя полоса среднегорья</i>							
10.03.1994	0,393	24.05.1998	0,593	18.06.1998	0,750	26.09.1997	0,540
08.03.2019	0,622	11.05.2019	0,695	08.06.2021	0,760	23.09.2019	0,678
<i>Верхняя полоса среднегорья</i>							
10.03.1994	0,284	24.05.1998	0,593	18.06.1998	0,709	26.09.1997	0,593
08.03.2019	0,509	11.05.2019	0,676	08.06.2021	0,731	23.09.2019	0,654

Таблица 4

Значения вегетационных индексов по высотным уровням

Показатель	<i>NDVI</i>						<i>NDWI</i>					
	1987–1999 гг.			2000–2019 гг.			1987–1999 гг.			2000–2019 гг.		
	I	II	III									
Среднее значение	0,335	0,351	0,266	0,428	0,440	0,328	0,223	0,228	0,235	0,233	0,234	0,304
Стандартное отклонение	0,184	0,173	0,151	0,180	0,176	0,152	0,149	0,122	0,191	0,124	0,113	0,197

Примечание. Полосы среднегорья: I – нижняя, II – средняя, III – верхняя.

В табл. 5 представлены значения занимаемой площади лесов с участием темнохвойных пород в пределах исследуемых высотных уровней. При классификации кедр попадает в класс ели, поэтому приведены леса с участием кедра и ели. Видно, что площадь темнохвойных лесов увеличивается на всех высотных уровнях по сравнению с предыдущими снимками леса, в том числе площадь лесов с участием кедра сибирского и ели сибирской.

Площадь темнохвойных лесов (с преобладанием кедра и ели) нижней полосы среднегорья по данным снимка за 30.07.2019 увеличилась на 2,4 тыс. га, в верхней полосе среднегорья – на 1,3 тыс. га, а в средней полосе среднегорья уменьшилась на 1,9 тыс. га по сравнению с данными за 25.06.1992. На территории исследуемых участков не было крупных вывалов, появились леса возрастом до 30 лет. Чтобы исключить

попадание зеленой фитомассы других классов, были обработаны снимки с января по декабрь. В таблице 5 приведены значения *NDVI* за каждый сезон.

Таким образом, анализ показывает, что индикация положительной динамики границ и состояния лесов хребта Западный Танну-Ола на разных высотных уровнях, где растет кедр, сомнений не вызывает.

В последние годы наблюдается общий тренд – возрастание прироста и расширение ареала темнохвойных лесов, особенно кедра: в нижней полосе среднегорья, которое четко связано с главным лимитирующим фактором роста – недостаточной увлажненностью; в верхней полосе среднегорья с главным лимитирующим фактором роста – температурой. Полученные результаты совпадают с данными, представленными в работах [Mantgem et al., 2009; Vicente-Serrano et al., 2010] по границам лесного пояса в горах.

Таблица 5

**Площадь темнохвойных лесов (тыс. га) по летним снимкам по высотным уровням
хр. Западный Танну-Ола**

Класс	Дата					
	25.06.1992	03.07.1995	18.06.1998	07.05.2010	24.06.2015	30.07.2019
<i>Нижняя полоса среднегорья</i>						
I	1,46	1,29	1,00	3,12	1,74	0,06
II	6,74	6,56	6,62	6,28	7,72	7,76
<i>Средняя полоса среднегорья</i>						
I	1,18	0,79	0,45	1,90	0,60	7,77
II	8,09	8,61	7,61	6,13	10,11	12,78
<i>Верхняя полоса среднегорья</i>						
I	1,45	0,76	0,27	1,47	1,74	5,68
II	6,20	7,79	6,31	5,05	7,72	11,75

Примечание. Типы классов: I – темнохвойные леса с преобладанием кедра сибирского; II – темнохвойные леса с преобладанием ели сибирской.

С известной долей вероятности при потеплении и увлажнении климата можно ожидать усиления роли темнохвойных пород – кедра и ели – на нижней границе лесного пояса, и кедра – на верхней границе леса в горах Западного Танну-Ола и других районах Республики Тыва.

На южном пределе распространения кедра в ряде других высокогорных районов Азии в начале XXI в. отмечается такая же тенденция [Власенко, 2001; Cazzolla et al., 2019; Tchebakova et al., 2022].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Кедр является чутким индикатором климатических изменений на южной границе произрастания в горах Западного Танну-Ола. Отме-

чен положительный рост подроста кедра и расширение ареала распространения кедра на территории северного макросклона хр. Западный Танну-Ола по данным полевых наблюдений и снимков Landsat. Увеличение площади хвойных лесов, отраженное в данных *NDVI*, максимально для участков с ростом температуры в верхней полосе среднегорья и ростом увлажнения в нижней полосе среднегорья. Реакция подроста кедра на климатические изменения дает понимание происходящих процессов под пологом леса и выделяет основные лимитирующие факторы внешней среды.

Полученные результаты показывают, что продвижение темнохвойных лесов вниз, в зону доминирования лиственницы, свидетельствует о пространственном расширении темнохвойных лесов

на фоне потепления климата в регионе. Эту тенденцию, проявившуюся в Западном Танну-Ола, могут сильно сдерживать пожары, активно действующие в Республике Тыва. Дальнейшее увеличение площадей с преобладанием кедра на нижней границе леса будет зависеть от увеличения количества осадков и снижения пожарной опасности. Расширение кедровников вблизи верхней границы леса будет зависеть также от ряда таких природных факторов, как пожары, ветер и морозы, которые также ограничивают распространение кедра на верхней границе леса.

Благодарности. Автор благодарит д-ра физ.-мат. наук Ю.Л. Гуревича, канд. физ.-мат. наук В.П. Ладыгину (ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск), за советы и помощь на разных этапах подготовки рукописи. Работа выполнена в рамках базового проекта ТуВИКОПР СО РАН № 121030200250-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В., Ойдунаа О.Ч., Вазанов Е.А. Экстремальные климатические события в Республике Тыва по дендрохронологическим данным // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2014. № 13. С. 279–280.
- Бочарников М.В. Связь фитоценоотического разнообразия северо-восточно-забайкальского оробиума с биоклиматическими показателями // Ботанический журнал. 2022. Т. 107. № 3. С. 211–236.
- Власенко В.И. Динамика лесных биогеоценозов охраняемых территорий гор Южной Сибири на их верхнем и нижнем пределах распространения // Krylovia. Т. 3. № 2. 2001. С. 21–34.
- Гайсин И.К., Моисеев П.А., Махмутова И.И., Низаметдинов Н.Ф., Моисеева О.О. Экспансия древесной растительности в экотоне лес – горная степь на Южном Урале в связи с изменениями климата и влажности местообитаний // Экология. 2020. № 4. С. 251–264.
- Кедровые леса Сибири / И.В. Семечкин, Н.П. Поликарпов, А.И. Ирошников и др. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
- Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л., Назимова Д.И. Многовековые климатические тренды трансформации кедровников в разных лесорастительных зонах гор Западного Саяна // Сибирский лесной журнал. 2021. № 2. С. 3–16.
- Кухта А.Е. Линейный прирост деревьев как индикатор состояния среды // Сибирский экологический журнал. 2003. № 6. С. 767–771.
- Петров И.А., Шушпанов А.С., Голуков А.С., Харук В.И. Воздействие изменений климата на радиальный прирост *Pinus sibirica* Du Tour в горных лесах Кузнецкого Алатау // Сибирский лесной журнал. 2019. № 5. С. 43–53.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
- Приходько В.Е., Бляхарчук Т.А., Килуновская М.Е. Реконструкция климата, почв и растительности начала субатлантического периода голоцена Турано-Уюкской котловины Южной Сибири // Почвоведение. 2018. № 8. С. 927–942.
- Тайник А.В., Мыглан В.С., Баринов В.В., Ойдунаа О.Ч., Назаров А.Н. Прирост лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на верхней границе леса в Республике Тыва // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 91–99.
- Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В.Н. Смагина, С.А. Ильиной, Д.И. Назимовой, И.Ф. Новосельцевой, Ю.С. Чередниковой. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- Тельнова Н.О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 97–107.
- Харук В.И., Петров И.А., Двинская М.Л., Им С.Т., Шушпанов А.С. Сравнительная реакция прироста лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) на изменения климата в лесостепи и высокогорьях Южной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2018. № 25(4). С. 438–448.
- Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В., Циммерманн Н.Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С. 243–248.
- Babushkina E., Belokopytova L., Zhirnova D., Barabantsova A., Vaganov E. Divergent growth trends and climatic response of *Picea obovata* along elevational gradient in Western Sayan Mountains, Siberia, *Journal of Mountain Science*, 2018, vol. 15, no. 11, p. 2378–2397.
- Camarretta N., Harrison P.A., Bailey T., Potts B., Hunt M., Lucieer A., Davidson N. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches, *New Forests*, 2020, vol. 51, no. 4, p. 573–596.
- Fang S., He Z. Fifty years of change in a coniferous forest in the Gilian mountains, China – advantages of high-definition remote sensing, *Forests*, 2020, vol. 11, p. 1–16.
- Gao B. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote sensing of Environment*, 1996, vol. 58, p. 257–266.
- Kueppers L.M., Conlisk E., Castanha C., Moyes A., Germino M.J., Valpine de P., Mitton J. Warming and provenance limit tree recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest, *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, p. 2383–2395.
- Kuular Kh. Application of remote sensing data for the assessment of the Ujuk mountain boreal forests (the Tyva Republic, Russia), *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, no. 1(9), p. 87–93, DOI: 10.15356/2071-9388_01v09_2016_07.

- Misi D., Puchalka R., Pearson C., Robertson I., Koprowski M. Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine: A Case Study from Poland and Hungary, *Forests*, 2019, vol. 243(10), p. 1–12.
- Park S.J., Lee D.K., Jeong S.G., Jang D.S., Park K.M., Park Y., Kim S.H., Mo Y.W. Phenological analysis of sub-alpine forest on Jeju Island, South Korea, using data fusion of Landsat and Modis products, *Forests*, 2021, vol. 12(3), p. 1–12.
- Rouse J.W., Haas R.H., Shell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (10–14 December 1973, Washington, DC), 1973, vol. 1, p. 309–317.
- Vicente-Serrano S.M., Lasanta T., Gracia C. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, vol. 150(4), p. 614–628.
- Электронные ресурсы
- Cazzolla R.G., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A. Fabbio L., Battipaglia G., Liang J. Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last century climate change, *Scientific Reports*, 2019, no. 9, p. 7678, DOI: 10.1038/s41598-019-44188-1.
- Ivanova Y., Soukhovolsky V. Modeling the Boundaries of Plant Ecotones of Mountain, *Ecosystems Forests*, 2016, vol. 7(11), 271, DOI: 10.3390/f7110271.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains, *Forest*, 2022, vol. 13, 1378, DOI: 10.3390/f13091378.
- Mantgem van P.J., Stephenson N.L., Byrne J.C., Daniels L.D., Franklin J.F., Fulé P.Z., Harmon M.E., Larson A.J., Smith J.M., Taylor A.H., Veblen T.T. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States, *Science*, 2009, vol. 323, 521–524. URL: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1165000> (дата обращения 21.03.2022).
- Zhang Y., Liu L.Y., Liu Y., Zhang M., An C.B. Response of altitudinal vegetation belts of the Tianshan mountains in northwestern china to climate change during 1989–2015, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, 4870, DOI: 10.1038/s41598-021-84399-z.

Поступила в редакцию 29.04.2022

После доработки 05.11.2022

Принята к публикации 22.02.2023

THE STATE AND DYNAMICS OF THE BORDERS OF CEDAR FORESTS AT THE WESTERN TANNU-OLA RANGE IN THE TYVA REPUBLIC

Kh.B. Kuular

Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Geoinformatics and Process Modeling Laboratory, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: khbkr@list.ru

The paper presents the recent response of dark coniferous forest and cedar undergrowth in the forests of the Western Tannu-Ola Range to the observed climate change in the region. According to the nearby Chadan meteorological station, the anomaly of the average annual air temperature was $1,6 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$, the anomaly of the growing season was $1,0 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$. Key study areas are located in the Tyva Republic within $50^{\circ}55' - 51^{\circ}15' \text{N}$ and $91^{\circ}30' - 92^{\circ}20' \text{E}$, which corresponds to three altitudinal levels: the lower belt of the middle mountains (1100–1300 m a.s.l.) bordering the steppe and covered with larch forests with birch; the middle belt of the middle mountains (1300–1800 m a.s.l.) covered with larch and cedar forests; larch and cedar forests of the upper belt of the middle mountains (1800–2120 m a.s.l.). In the course of field work, the increment of the top shoot of cedar sapling (*Pinus sibirica* Du Tour) was measured, as well as its height, age and total number. Correlations between the increment, air temperature and relative humidity were quantitatively determined using data from the Chadan weather station for a number of years. The results indicate a positive correlation with humidity in the lower zone of the middle mountains and with air temperature in the upper zone of the middle mountains. Higher amounts of cedar sapling in the lower zone of the middle mountains and in the upper zone of the middle mountains confirm the shift of dark coniferous forests down and up the ridge under the regional climate warming. Space images of Landsat TM/ETM+/OLI show the increasing values of NDVI and NDWI vegetation indices. According to satellite images, an increase in the area of dark coniferous forests over the past decades was calculated for the territory of key areas; however, the reliability of these data was not evaluated statistically. The work needs to be continued in the field.

Keywords: cedar sapling, key areas, climate warming, Landsat images, correlations

Acknowledgements. The author thanks Yu.L. Gurevich, D.Sc. in Physics and Mathematics, and V.P. Ladygina, Ph.D. in Physics and Mathematics, from the FRC KSC of the SB RAS, Krasnoyarsk, for their recommendations and assistance at different stages of paper preparation. The work was carried out within the framework of the basic project of the TuvIENR of the SB RAS no. 121030200250-4.

REFERENCES

- Babushkina E., Belokopytova L., Zhirnova D., Barabantsova A., Vaganov E. Divergent growth trends and climatic response of *Picea obovata* along elevational gradient in Western Sayan Mountains, Siberia, *Journal of Mountain Science*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 2378–2397.
- Barinov V.V., Myglan V.S., Tainik A.V., Oidupaa O.C., Vaganov E.A. [Extreme climatic events in the Republic of Tyva on dendrochronological data], *Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii* [Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia], 2014, no. 13, p. 279–280. (In Russian)
- Bocharnikov M.V. Svyaz' fitocenoticheskogo raznoobraziya severovostochno-zabajkal'skogo orobioma s bioklimaticheskimi pokazatelyami [Relationship of phytocenotic diversity of the North-Eastern Transbaikal orobiome with bioclimatic parameters], *Botanicheskii Zhurnal*, 2022, vol. 107, no. 3, p. 211–236. (In Russian)
- Camarretta N., Harrison P.A., Bailey T., Potts B., Hunt M., Lucieer A., Davidson N. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches, *New Forests*, 2020, vol. 51, no. 4, p. 573–596.
- Fang S., He Z. Fifty years of change in a coniferous forest in the Gilian mountains, China – advantages of high-definition remote sensing, *Forests*, 2020, vol. 11, p. 1–16.
- Gaisin I.K., Moiseev P.A., Makhmutova I.I., Nizametdinov N.F., Moiseeva O.O. Expansion of tree vegetation in the forest-steppe ecotone on the Southern Urals in relation to changes in climate and habitat moisture, *Russian Journal of Ecology*, 2020, no. 4, p. 306–318.
- Gao B. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vega liquid water from space, *Remote sensing of Environment*, 1996, vol. 58, p. 257–266.
- Kedrovye lesa Sibiri* [Cedar forests of Siberia], I.V. Semechkin, N.P. Polikarpov, A.I. Novosibirsk et al. (auth.), Science Publ., 1985, 256 p. (In Russian)
- Kharuk V.I., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Shushpanov A.S. Comparative reaction of larch (*Larix sibirica* Ledeb.) radial increment on climate change in the forest steppe and highlands of Southern Siberia, *Sibirskiy Ekologicheskij zhurnal*, 2018, no. 4, p. 388–395.
- Koshkarov A.D., Koshkarova V.L., Nazimova D.I. Mnogovekovye klimaticheskie trendy transformacii kedrovnikov v raznyh lesorastitel'nyh zonah gor Zapadnogo Sayana [Centuries-old climatic trends of transformation of the Siberian stone pine forests in different forest vegetation zones of the Western Sayan Mountains], *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2021, no. 2, p. 3–16. (In Russian)
- Kueppers L.M., Conlisk E., Castanha C., Moyes A., Germino M.J., Valpine de P., Mitton J. Warming and provenance limit tree recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest, *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, p. 2383–2395.
- Kukhta A.E. Linejnyj prirost derev'ev kak indikator sostoyaniya sredey [Linear growth of trees as an indicator of the state of environment], *Sibirskiy Ekologicheskij zhurnal*, 2003, no. 6, p. 767–771. (In Russian)
- Kuular Kh. Application of remote sensing data for the assessment of the Ujuk mountaun boreal forests (the Tyva Republic, Russia), *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, no. 1(9), p. 87–93.
- Misi D., Puchalka R., Pearson C., Robertson I., Koprowski M. Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine: A Case Study from Poland and Hungary, *Forests*, 2019, vol. 243(10), p. 1–12.
- Park S.J., Lee D.K., Jeong S.G., Jang D.S., Park K.M., Park Y., Kim S.H., Mo Y.W. Phenological analysis of sub-alpine forest on Jeju island, South Korea, using data fusion of Landsat and Modis products, *Forests*, 2021, vol. 12(3), p. 1–12.
- Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S., Kharuk V.I. Vozdeistvie izmenenii klimata na radial'nyi prirost Pinus sibirica Du Tour v gornyx lesakh Kuznetskogo Alatau [*Pinus sibirica* Du Tour response to climate change in the forests of the Kuznetsk Alatau Mountains], *Sibirskiy lesnoj zhurnal*, 2019, no. 5, p. 43–53. (In Russian)
- Polikarpov N.P., Tchebakova N.M., Nazimova D.I. *Klimat i gornye lesa Yuzhnoj Sibiri*, Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 226 p. (In Russian)
- Prikhodko V.E., Blyakharchuk T.A., Kilunovskaya M.E. Reconstruction of climate, soils and vegetation in the Turan-Uyuk basin at the beginning of the Sub-Atlantic period of the Holocene, *Eurasian Soil Science*, 2018, no. 8, p. 865–879.
- Rouse J.W., Haas R.H., Shell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (10–14 December 1973, Washington, DC), 1973, vol. 1, p. 309–317.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E. *Vertikal'nyy i gorizontol'nyy sdvigi verkhney granitsy redkolesiy i somknutykh lesov v XX stoletii na Polyarnom Urale* [Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century], *Ekologiya*, 2007, no. 4, p. 223–227. (In Russian)
- Tajnik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Oidupaa O.C., Nazarov A.N. Prirost listvenitsy sibirskoj (*Larix sibirica* Ledeb.) na verhnej granitsy lesa v Respublike Tyva [Growth of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) at the upper border of forests in the Republic of Tyva], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, no. 2, p. 91–99. (In Russian)
- Telnova N.O. Vyyavlenie i kartografirovaniye mnogoletnih trendov NDVI dlya ocenki vkladu izmenenij klimata v dinamiku biologicheskoy produktivnosti agroekosistem lesostepnoj i stepnoj zon Severnoj Evrazii [Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasian forest-steppe and steppe], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 6, p. 97–107. (In Russian)
- Tipy lesov gor Yuzhnoj Sibiri*, V.N. Smagin, S.A. Il'inskaya, D.I. Nazimova, I.F. Novosel'ceva, Yu.S. Tcherednikova (eds.), Novosibirsk, Nauka Publ., 1980, 336 p. (In Russian)
- Vicente-Serrano S.M., Lasanta T., Gracia C. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, vol. 150(4), p. 614–628.
- Vlasenko V.I. Dinamika lesnykh biogeocenofov ohranyayemykh territorij gor Yuzhnoj Sibiri na ih verhnem i nizhnem

- nem predelah rasprostraneniya [The dynamics of forest ecosystems along the upper and lower limits of their extent in protected mountain regions of Southern Siberia], *Krylovia*, 2001, vol. 3, no. 2, p. 21–34. (In Russian)
- Web sources*
- Cazzolla R.G., Callaghan T., Velichevskaya A., Dudko A., Fabbio L., Battipaglia G., Liang J. Accelerating upward treeline shift in the Altai Mountains under last century climate change, *Scientific Reports*, 2019, no. 9, p. 7678, DOI: 10.1038/s41598-019-44188-1.
- Ivanova Y., Soukhovolsky V. Modeling the Boundaries of Plant Ecotones of Mountain, *Ecosystems Forests*, 2016, no. 7(11), p. 271, DOI: 10.3390/f7110271.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains, *Forest*, 2022, vol. 13, p. 1378, DOI: 10.3390/f13091378.
- Mantgem van P.J., Stephenson N.L., Byrne J.C., Daniels L.D., Franklin J.F., Fulé P.Z., Harmon M.E., Larson A.J., Smith J.M., Taylor A.H., Veblen T.T. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States, *Science*, 2009, vol. 323, p. 521–524, DOI: pdf/10.1126/science.1165000 (access date 21.03.2022).
- Zhang Y., Liu L.-Y., Liu Y., Zhang M., An C.-B. Response of altitudinal vegetation belts of the Tianshan mountains in northwestern china to climate change during 1989–2015, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, p. 4870, DOI: 10.1038/s41598-021-84399-z.

Received 29.04.2022

Revised 05.11.2022

Accepted 22.02.2023