НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РУССКОГО БОТАНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

Проблемы изучения растительного покрова Сибири

Труды VII Международной научной конференции,
посвященной 135-летию Гербария им. П.Н. Крылова
Томского государственного университета
и 170-летию со дня рождения П.Н. Крылова

(Томск, 28–30 сентября 2020 г.)

Томск
Издательство ТГУ
2020

Пространственно-временная динамика верхней границы леса в горах Южной Сибири

А.С. Голуков^{1,2}, А.С. Шушпанов^{1,3}, И.А. Петров¹

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия; institute_forest@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; office@sfu-kras.ru

³ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия; info@sibsau.ru

Аннотация. В последнее десятилетие на всей территории бореальных лесов отмечается продвижение верхней границы леса, связанное с климатическими изменениями. В данной работе исследована динамика верхней границы и площади сомкнутых древостоев в высокогорьях Южной Сибири. На всех объектах исследования наблюдается продвижение верхней границы леса со средней скоростью продвижения $\sim 0,6\text{--}0,9$ м/год. Выявлена значимая связь продвижения верхней границы леса с температурой воздуха.

Ключевые слова: изменение климата, горные леса, съемка Landsat.

Spatial-temporal dynamics of tree line in the Southern Siberia Mountains

A.S. Golyukov^{1,2}, A.S. Shushpanov^{1,3}, I.A. Petrov¹

¹ V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia; institute_forest@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; office@sfu-kras.ru

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia; info@sibsau.ru

Abstract. In recent decades, the tree line has been moving along the entire territory of the boreal forests due to climatic changes. In this work, the dynamics of the tree line and the area of closed stands in the Southern Siberian Mountains are analyzed. At all objects of the study, the advancement of the tree line is observed with an average advance rate of $\sim 0.6 - 0.9$ m per year. A significant relationship was found between the advancement of the tree line and the air temperature.

Key words: Climate change, mountain forest, Landsat satellite image.

С середины XX в. по всему миру наблюдаются климатические изменения, оказывающие существенное влияние на лесные фитоценозы. Наиболее чувствительными к изменениям климата являются деревья, растущие в экотонах (в частности, в экотоне горной лесотундры). Продвижение верхней границы леса в зону горной лесотундры, вызванное увеличением температуры воздуха, отмечается в горах Северной Америки (Klasner and Fage, 2002; Munroe, 2003), Евразии (Моисеев, 2004; Baker and Moseley, 2007; Kullman, 2007), в горах Северного Урала (Дэви и др., 2018).

Целью работы явилось исследование динамики верхней границы и площади сомкнутых древостоев в высокогорьях Кузнецкого Алатау (КА), Западного и Восточного Саяна (ЗС и ВС, соответственно) (Булочные гольцы: $54^{\circ}05'$ ш., $89^{\circ}30'$ в. д.; Саянский перевал: $51^{\circ}42'$ ш., $89^{\circ}55'$ в. д.; Идарское Белогорье: $54^{\circ}22'$ ш., $95^{\circ}30'$ в. д.). Площади объектов исследования: $\sim 65\ 000$ га, $\sim 90\ 000$ га, $\sim 1,5$ млн га. соответственно (рис. 1).

Задачи:

1. Оценка пространственно-временной динамики сомкнутых древостоев в экотоне горной лесотундры.
2. Анализ динамики эколого-климатических переменных.

Материалы и методы

В работе использовались материалы дистанционного зондирования Земли, представленные снимками Landsat (60 и 30 м), съемкой сверхвысокого пространственного разрешения (WorldView, GeoEye; 0,41–0,46 м.) и цифровой моделью рельефа (ЦМР) SRTMGL1 (разрешение 30 м).

Для анализа были подобраны следующие снимки (за летний период, с облачностью $<10\%$): 1976 (Landsat 2), 2015 гг. (Landsat 8) для Кузнецкого Алатау; 1977 (Landsat-2), 2014 гг. (Landsat 8) для Западного Саяна; 1989 (Landsat 5), 2018 гг. (Landsat 8) для Восточного Саяна. Все снимки подвергались предварительной обработке и топографической нормализации методом C-коррекции (Riano et al., 2003).

Классификация снимков проводилась методом наибольшего правдоподобия с использованием пороговой функции (threshold). Обучающие выборки создавались по данным топографических карт,

наземных исследований, съемки сверхвысокого пространственного разрешения из открытых источников методом наращивания областей. Для всех полученных снимков была сформирована маска сомкнутых насаждений (сомкнутость > 0,3). Общая точность классификации составила от 65–85 %; величина $kappa = 0,6–0,8$.

Рис. 1. Пространственное положение объектов исследования (1). Водные объекты (2)

Далее проводился анализ пространственного распределения сомкнутых древостоев по элементам рельефа с использованием полученных масок и ЦМР. Для оценки продвижения верхней границы сомкнутых древостоев по высоте над уровнем моря рассчитывались изменения значений медиан высот.

Для анализа связи с климатическими переменными использовались среднемесячные данные о температуре и сумме осадков CRU TS 4.03 (пространственное разрешение $0.5^\circ \times 0.5^\circ$).

Статистический анализ полученных данных проводился в программных пакетах – Microsoft Excel и StatSoft Statistica.

Результаты

Для сомкнутых древостоев ВС продвижение по высоте составило $17 \pm 0,5$ м ($\sim 0,6$ м/год) соответственно. Возрастание площади темнохвойных наблюдалось преимущественно на склонах южной экспозиции. Площадь сомкнутых древостоев в 1989 и 2018 г. составила 448,3 тыс. га и 505 тыс. га соответственно. Общее увеличение площади сомкнутых древостоев составило 57 тыс. га (+12,7 %).

В зоне альпийской лесотундры ЗС в период с 1977 по 2014 г. наблюдалось увеличение площади сомкнутых древостоев в 1,3 раза (с 29,5 тыс. га до 38,5 тыс. га, ~ 1 %/год). Наряду с возрастанием сомкнутости древостоев наблюдалось их продвижение по градиенту высоты (в среднем за весь период на $\sim 0,9$ м/год). Величина продвижения была неоднородна по элементам рельефа и составила 0,7 м/год для склонов южной экспозиции и $\sim 1,1$ м/год для склонов северной.

На территории КА площадь сомкнутых древостоев с 1976 по 2015 гг. увеличилась с 26,4 тыс. га до 28,7 тыс. га общее увеличение площади сомкнутых древостоев на исследуемой территории составило $\sim 8,3$ % (2,3 тыс. га). Изменение медианных значений составило $19 \pm 0,3$ м по высоте за период с 1976 по 2015 г., скорость продвижения по градиенту высоты $\sim 0,5$ м/год.

На всех объектах исследования выявлено значимое увеличение среднегодовой температуры воздуха на $\sim 2^\circ\text{C}$ для периода 1950–2018 гг. ($r^2 = 0,3–0,43$, при $p < 0,05$). Значимых трендов суммы осадков не выявлено.

Продвижение древостоев по градиенту высоты, выявленное с помощью методов ДЗЗ, подтверждаются результатами анализа данных полевых исследований. На объекте исследования Восточный Саян наблюдается прямая зависимость между увеличением количества деревьев в экотоне горной лесотундры и температурой воздуха ($r = 0,44$, при $p < 0,05$; рис. 2).

Рис. 2. Сравнение динамики хода температур мая–августа и появления деревьев *Pinussibirica* Du Tour (N = 244) в экотоне горной лесотундры Восточного Саяна (Идарское Белогорье)

Выводы

Зафиксировано увеличение среднегодовой температуры воздуха на ~ 2 °C для периода 1950–2018 гг. ($r^2=0.39–0.43$, при $p<0.05$).

Потепление климата в последние ~ 70 лет способствует возрастанию сомкнутости и продвижению границ древостоев по градиенту высоты на всех объектах исследования. Средние скорости продвижения на объектах исследования: Кузнецкий Алатау $\sim 0,5$ м/год с 1976 по 2015 г., Восточный Саян $\sim 0,6$ м/год с 1989 по 2018 г. и Западный Саян $\sim 0,9$ м/год с 1977 по 2014 г.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-45-240003 «Пространственно-временная динамика, раннее обнаружение и картографирование усыхающих темнохвойных древостоев Средней Сибири на основе материалов дистанционного зондирования» и проект № 18-05-00432 «Воздействие изменений климата на леса Сибири: анализ горимости лесных территорий, величины прироста хвойных пород, жизненного состояния и продуктивности древостоев».

ЛИТЕРАТУРА

- Дэви Н.М., Кукарских В.В., Галимова А.А., Бубнов М.О., Зыков С.В. Современная динамика высокогорных лесов на Северном Урале: основные тенденции // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2018. Т. 11, № 3. Р. 248–259.
- 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.
- Baker B.B., Moseley R.K. Advancing treeline and retreating glaciers: implications for conservation in Yunnan, P. R. China // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2007. Vol. 39, No 2. P. 200–209.
- Klasner F.L., Fagre D.B. A half century of change in alpine treeline patterns at Glacier National Park, Montana, U.S.A. // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2002. Vol. 34. P. 49–56.
- Kullman L. Treeline population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for treeline theory and climate change ecology // Journal of Ecology. 2007. Vol. 95. P. 41–52.
- Munroe J.S. Estimates of Little Ice Age climate inferred through historical rephotography, Northern Uinta Mountains, USA // Arctic, Antarctic and Alpine research. 2003. Vol. 35, No 4. P. 489–498.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41, No 5. P. 1056–1061. URL: <http://www.cstars.ucdavis.edu/~driano/Riano2003b.pdf>