

Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии

С. Т. Им^{1,2,3}, В. И. Харук^{1,2}, В. Г. Ли⁴

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН Красноярского
научного центра СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: stim@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, 660037, Россия

⁴ Красноярский государственный аграрный университет
Красноярск, 660049, Россия
E-mail: viktorya.g.lee@gmail.com

Проведён анализ смещения северной границы сомкнутых вечнозелёных хвойных (ВЗХ) древостоев в Сибири на основе временной серии карт растительного покрова (2001–2016), полученных по данным спутниковой съёмки MODIS. Выделены северные границы ВЗХ-древостоев для двух исследуемых периодов (2001–2003, 2014–2016). Выявлено преимущественное смещение их границы в северном направлении (на $\sim 26 \pm 2$ км). Возрастание площади сомкнутых ВЗХ-древостоев (на 15–50 %) способствовало расширению их границы и являлось неоднородным в зависимости от рельефа. В Западной Сибири основной прирост наблюдался на высотах 100–130 м над уровнем моря, на Среднесибирском плоскогорье — на 350–500 м. Граница ВЗХ-лесов располагалась в зоне средних летних температур 12–15 °С. На исследуемой территории в 1970–2000-е гг. наблюдался период потепления (температуры возросли на $\sim 0,5$ – $1,5$ °С, $p < 0,05$). Сформированные температурные условия способствовали росту сомкнутости ВЗХ-древостоев (на ~ 1 – 3 % в год), их экспансии на север и вверх по градиенту высоты. В зоне интенсивного антропогенного воздействия (нефтегазовые месторождения Ванкорского кластера и Ямало-Ненецкого АО) наблюдалось смещение их границы в южном направлении.

Ключевые слова: вечнозелёные хвойные леса, Сибирь, северная граница древостоев, MODIS, климат, рельеф местности

Одобрена к печати: 11.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-176-187

Введение

В последние десятилетия в Сибири отмечается рост сомкнутости хвойных вечнозелёных (ВЗХ) лесов (с доминированием кедра (*Pinus sibirica*), пихты (*Abies sibirica*), сосны (*Pinus sylvestris*) и ели (*Picea obovata*)), что связывают с изменениями климата (He et al., 2017; Kharuk et al., 2007, 2018). Наряду с этим наблюдается продвижение темнохвойных лесов (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, *Picea obovata*) в зону доминирования лиственницы (Kharuk et al., 2007), а также в экотоны полярной и альпийской лесотундры (Kharuk et al., 2006, 2007, 2010; Mamet et al., 2019; Myers-Smith, Hik, 2018; Shiyatov et al., 2007). В пределах самого северного лесного массива Ары-Мас возрастала сомкнутость лиственничных древостоев (+65 %) и происходило их продвижение в зону тундры (Харук и др., 2004). В исследовании (Shiyatov et al., 2007) установлено продвижение сомкнутых лиственничников на Полярном Урале: на 35 м по высоте и 52 м по горизонтали за период с 1910 по 2000 г. Наиболее значимые изменения произошли с начала XXI в., когда количество деревьев в горной лесотундре возросло почти в два раза по сравнению с концом XX в. (Shiyatov, Mazepa, 2015). На Анабарском плато потепление способствовало продвижению лиственницы по градиенту высоты ($\sim 0,35$ м/год) (Kharuk et al., 2013). На плато Путорана в конце XX в. наблюдалось увеличение площади лиственничных редколесий (+60 %) и продвижение древесной растительности по градиенту высоты (0,5 м/год) (Им,

Харук, 2013). Аналогичные явления были отмечены и в Северной Америке (Mamet et al., 2019; Myers-Smith, Hik, 2018; Olthof, Pouliot, 2010). В целом, согласно данным анализа космосьёмки, в пан-арктической зоне в настоящее время происходит возрастание биомассы растительного покрова (Gonsamo, Chen, 2016; Ju, Masek, 2016; Olthof, Pouliot, 2010). Вместе с тем вопрос о смещении северных границ древостоев на обширных территориях Сибири является малоизученным. Современные вычислительные технологии и ресурсы позволяют создавать временные серии глобальных картографических материалов со средним и высоким пространственным разрешением, например продукты MCD12Q1 на основе съёмки MODIS (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>), серия карт наземного покрова GlobeCover (http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php), карты преобладающих пород древостоев с сервиса VEGA-PRO, созданные Институтом космических исследований Российской академии наук (<http://pro-vega.ru>). В частности, карты MCD12Q1 успешно применялись для создания производных продуктов, таких как LAI/FPAR (Yan et al., 2016) и GPP/NPP (Running et al., 2004), проведения исследований и моделирования динамики наземного покрова (см., например, работы (Hu et al., 2016; Liu et al., 2015)). Разработка указанных ресурсов открывает возможности анализа природной и антропогенной динамики лесных территорий.

Цель работы — анализ динамики северной границы сомкнутых ВЗХ-древостоев в западной и центральной частях Сибири в начале XXI в. (2001–2016) на основе временных рядов космосьёмки и ГИС-технологий (геоинформационные системы).

Объект исследования

Анализировались вечнозелёные хвойные леса Сибири, сформированные кедром (*Pinus sibirica*), сосной (*Pinus silvestris*), пихтой (*Abies sibirica*) и елью (*Picea obovata*) (Леса..., 1990). Исследуемая территория покрывает более 2 млн км² (62–100° в. д., 58–70° с. ш.; *рис. 1*). На северном пределе произрастания ВЗХ-древостоев сосна практически отсутствует. Площадь сомкнутых ВЗХ-древостоев составляет ~180 тыс. км² (7,2 % анализируемой территории по данным карт IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) MCD12Q1). На севере они граничат с лесотундрой и лиственничными древостоями (*Larix sibirica*, *Larix gmelinii*). В долине р. Енисей отдельные участки ельников достигают 69° с. ш.

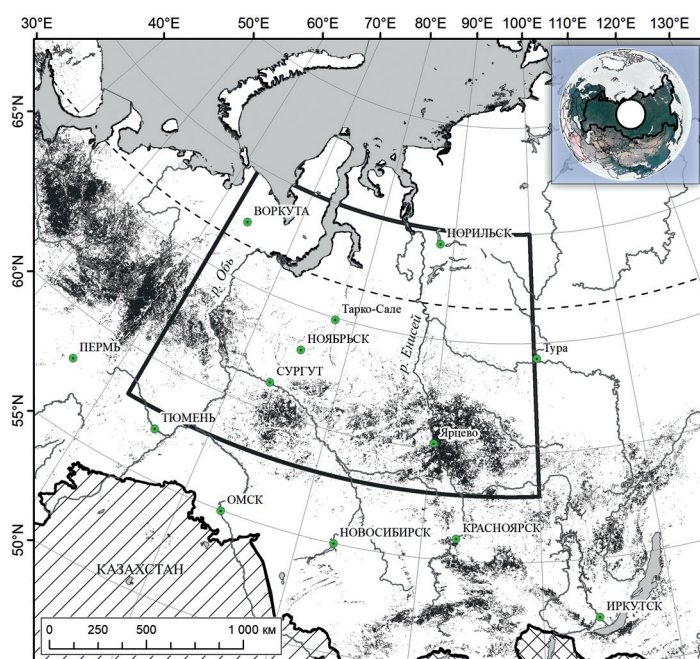


Рис. 1. Исследуемая территория (обозначена трапецией). Вечнозелёные хвойные древостои показаны чёрными пятнами

Высота рельефа варьируется от 0 до 270 м над уровнем моря (н.у.м.) в Западной Сибири и до 1580 м — на правобережье Енисея. Средние летние температуры изменяются в широких пределах и составляют от +20 °С на юге до +8...+10 °С на севере; среднегодовые — от –8 до –40 °С, зимние — от –20 до –45 °С. Количество осадков за год выпадает 200–1200 мм (80–250 мм — летом, 70–120 мм — зимой).

Материалы и методы

Выделение северной границы сомкнутых ВЗХ-древостоев основано на временной серии карт растительного покрова IGBP MCD12Q1, полученной по данным съёмки MODIS (Friedl et al., 2010). Пространственное разрешение карт — 500 м, период — 2001–2016 гг. В анализе применялся продукт MCD12Q1 версии C6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>) (Sulla-Menashe et al., 2019). Согласно классификации IGBP, класс ВЗХ представляет собой участки земли с преобладанием вечнозелёных хвойных древостоев с покрытием >60 %. Точность классификации составляет ~67–74 % (<https://landval.gsfc.nasa.gov/ProductStatus.php?ProductID=MOD12>) (Pflugmacher et al., 2011; Sulla-Menashe et al., 2019). Сомкнутые ВЗХ-древостои формируют условную границу сомкнутых лесов. Гари на исследуемой территории устранялись из анализа маской, составленной на основе данных MCD64A1 (<http://modis-fire.umd.edu>). Связь изменения площади ВЗХ-древостоев с топографией (высотой над уровнем моря, крутизной, кривизной и азимутальным направлением склонов) анализировалась с использованием цифровой модели рельефа GMTED2010 (https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/viewer.htm) с пространственным разрешением 7,5 с (~250 м) и точностью по вертикали 26–30 м (Danielson, Gesch, 2011). Данные о температуре воздуха и осадках извлекались из набора CRU TS 4.02 (<https://crudata.uea.ac.uk>; пространственное разрешение 0,5°, период 1920–2016 гг.). Суммы положительных температур ($t > 0$ °С) рассчитывались по данным из базы MERRA-2 (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>; пространственное разрешение 0,625×0,5°, период 1980–2016 гг.) (Gelaro et al., 2017).

Алгоритм выделения северной границы сомкнутых ВЗХ-древостоев

Разработана методика автоматизированного выделения северной границы ВЗХ-древостоев по временной серии карт лесов на основе ГИС. Алгоритм состоял из следующих этапов:

1. Формирование маски гарей по данным MCD64A1 за период наблюдений (2001–2016).
2. Исключение из временной серии классификационных картосхем MCD12Q1 гарей по ранее созданной маске.
3. Уточнение картосхем. На классификационных картосхемах соседних годов присутствовали пиксели одной и той же локализации с непостоянной принадлежностью к классу ВЗХ, связанной с ошибками классификаций (например, пиксель в классификации за 2001 г. принадлежит к классу ВЗХ, в 2002 г. пиксель на том же местоположении не принадлежит к классу ВЗХ, а в 2003 г. — снова принадлежит). Поэтому для картосхем начального (2001–2003) и конечного (2014–2016) периодов создавались уточнённые картосхемы путём кодирования единицей пикселей, соответствующих классу ВЗХ-древостоев и присутствовавших одновременно во всех картосхемах начального (или конечного) периода, а нулём — всех остальных пикселей.
4. Вычисление векторной линии границы ВЗХ-древостоев соединением самых северных пикселей вдоль параллели.
5. Фильтрация выбросов из линии границы ВЗХ-древостоев методом стандартных отклонений. Из линии границы ВЗХ-древостоев устранялись точки, выходящие за пределы трёх стандартных отклонений от среднего значения широты в пределах заданного скользящего окна. Стандартное отклонение в пределах скользящего окна варьировалось от 68 до 253 км. Размер окна подбирался экспериментально на основе экспертного анализа выделяемых линий границ и составил 50 км.

6. Усреднение линии границы ВЗХ-древостоев в пределах скользящего окна размером 50 км по долготе. Создание полигональных областей доверительного интервала ($p > 0,95$) для средней линии.
7. Вычисление смещения границы ВЗХ-древостоев как разности между усреднёнными векторными линиями границ начального и конечного периодов. Зоны значимых смещений границы определялись по участкам, где доверительные интервалы средних линий границ ВЗХ-древостоев начального и конечного периодов не пересекались на протяжении более 100 км. В зонах значимых смещений границы проводился анализ динамики климатических переменных и связи с топографическими характеристиками местности. Рассчитывалась динамика площади ВЗХ-древостоев за 2001–2016 гг. При расчётах проводилось нормирование площадей на представленность элементов рельефа по методике, описанной в работе (Kharuk et al., 2010).

Реализация алгоритма расчёта границ леса и обработка пространственных данных производились в программном пакете ESRI ArcGIS (<https://www.arcgis.com>) с применением скриптов на языке Python. Статистическая обработка выполнялась в программах Microsoft Excel и Statsoft Statistica.

На *рис. 2* показан фрагмент анализируемой территории с выделенными северными границами на 4–6-м этапах алгоритма по классификационным картосхемам IGBP MCD12Q1 2014–2016 гг.

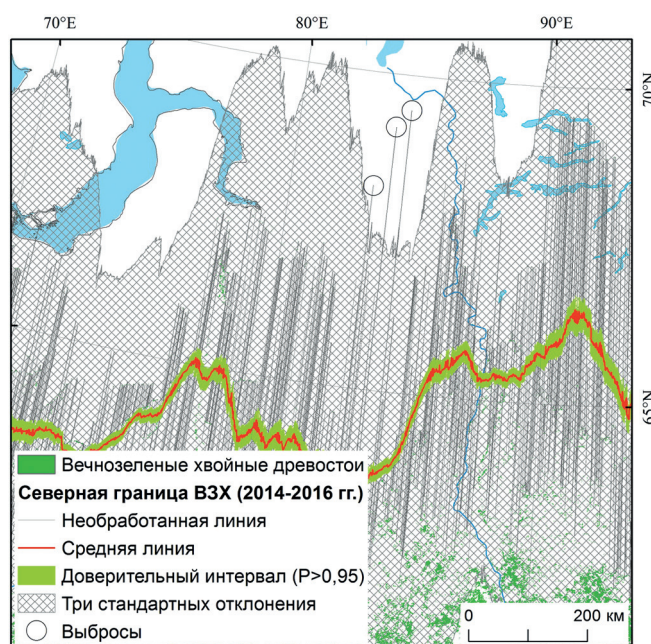


Рис. 2. Расположение северной границы ВЗХ-древостоев (2014–2016), выделенной на 4–6-м этапах разработанного алгоритма

Результаты

Миграция северной границы ВЗХ-древостоев

Протяжённость выделенной границы составила ~10 тыс. км (*рис. 3*, см. с. 180). За 2001–2016 гг. северная граница сомкнутых ВЗХ-древостоев в средней и западной частях Сибири сместилась на север на $\sim 26 \pm 2$ км ($\sim 1,6$ км/год). В 2014–2016 гг. она находилась в интервале широт $61,7$ – $66,6^\circ$ с.ш. (в среднем $64,5 \pm 0,1^\circ$ с.ш.), тогда как в 2001–2004 гг. — на $64,2 \pm 0,1^\circ$ с.ш. Единичные кластеры древостоев расположились значительно севернее выделенных границ (на ~ 300 км в долине р. Енисей — до 69° с.ш.; $\sim 0,015\%$ от общей площади ВЗХ-древостоев).

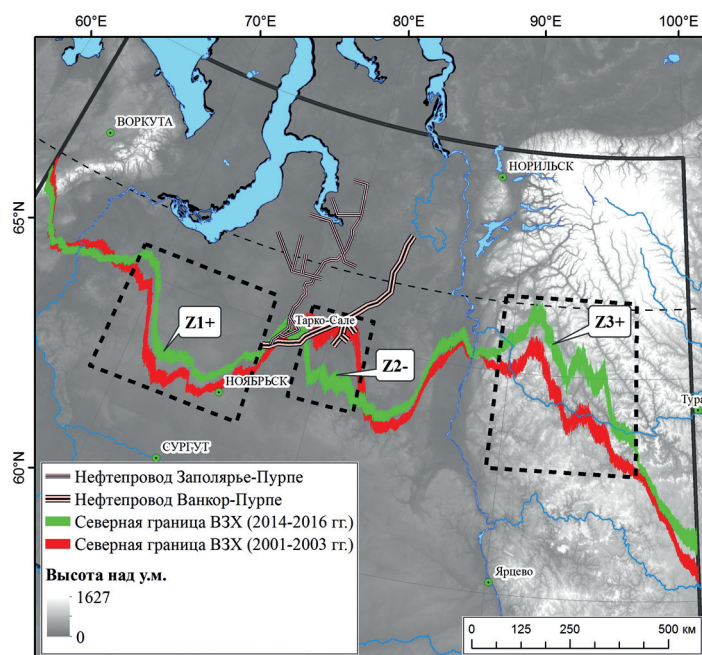


Рис. 3. Миграция северной границы сомкнутых ВЗХ-древостоев за 2001–2016 гг. (красный цвет — 2001–2003 гг., зелёный — 2014–2016 гг.) Полигональные полосы — доверительные интервалы ($p > 0,95$) средних линий северных границ ВЗХ-древостоев. Пунктирными линиями обозначены зоны значимых сдвигов границы сомкнутых ВЗХ-древостоев

Выделились две зоны значимого смещения границы ВЗХ-древостоев на север (Z1+: $\sim 54 \pm 1$ км, Z3+: $\sim 94 \pm 2$ км; см. рис. 1) и одна зона отступления границы (Z2–: 9 ± 3 км; см. рис. 3). Зоны Z1+ и Z2– локализованы на Западносибирской равнине, зона Z3+ располагается в гористой части Среднесибирского плоскогорья. Среднеквадратичная ошибка меридионального расположения границ ВЗХ-древостоев, связанная с неточностью использованных классификационных картосхем IGBP MCD12Q1 (точность ~ 67 – 74 %) (Pflugmacher et al., 2011; Sulla-Menashe et al., 2019), была оценена на основе метода Монте-Карло и составила $\sim 0,06$ км.

Граница ВЗХ-древостоев и орография местности

Средняя высота над уровнем моря в зоне Z1+ составляет 82 м ($\sigma = 28$ м), в Z3+ — 430 м ($\sigma = 155$ м). В целом во всех выделенных зонах отмечается рост площади ВЗХ-древостоев (на ~ 15 – 50 %). На Западносибирской равнине в зоне продвижения их границы на север на высотах более 50 м н.у.м. наблюдался рост площади сомкнутых древостоев (~ 28 км²/год, +49 % за 2001–2013 гг.), а ниже происходили незначительные изменения. На Среднесибирском плоскогорье площадь сомкнутых ВЗХ-древостоев росла до 2010 г., а после стала быстро сокращаться, и в итоге в нижнем поясе (< 300 м н.у.м.) прирост площади стал отрицательным в 2016 г. по сравнению с 2001 г.

Основной прирост площади ВЗХ-древостоев происходил на относительно больших высотах. На Западносибирской равнине это 100–130 м н.у.м. (+45%), а на Среднесибирском плоскогорье — 350–500 м (+26 %). В низовьях на пологих склонах наблюдалось сокращение площади ВЗХ-древостоев (-6 %). В зоне Z3+ прирост их площади меняет знак на высоте 300 м н.у.м. Во всех зонах наибольший абсолютный прирост площади ВЗХ-древостоев соответствует пологим склонам (3 – 4°) восточной и северо-восточной экспозиций. Нормирование площадей на представленность элементов рельефа показало преимущественный прирост площади ВЗХ-древостоев на относительно крутых склонах ($> 5^\circ$) северной экспозиции. В горной местности (зона Z3+) прирост площади преобладал на вогнутых поверхностях.

Смещение северной границы ВЗХ-древостоев и эколого-климатические переменные

Выделенные северные границы ВЗХ-древостоев соответствуют зоне средних летних температур 12–15 °С. На Среднесибирском плоскогорье их граница (Z3+) соответствует более холодному климату, чем на Западносибирской равнине (Z1+), где среднегодовые температуры выше на 4,6 °С и на 22 больше дней с положительными температурами. При этом в анализируемых зонах количество осадков примерно одинаковое.

Во всех зонах наблюдался период потепления (1970–2000), когда значительно возросли весенние, летние и годовые температуры (на ~0,5–1,5 °С, $p < 0,05$). В целом летние температуры продолжали увеличиваться до 2016 г. Летние и годовые осадки изменились незначительно. В 1920–1980 гг. наблюдался значимый рост количества зимних осадков.

На Западносибирской равнине динамика площади ВЗХ-древостоев имеет прямую связь с весенней температурой ($r = 0,51$; $p < 0,05$) и дефицитом давления водяного пара ($r = 0,52$; $p < 0,05$). Для Среднесибирского плоскогорья такой связи не обнаружено.

Обсуждение

Рост древесной растительности на северном пределе произрастания лимитируется преимущественно летними температурами (Hellmann et al., 2016; Holtmeier, 2013; Kharuk et al., 2007; Kirdyanov et al., 2012). На исследуемой территории в 1970–2000-е гг. наблюдался период потепления (температуры возросли на ~0,5–1,5 °С, $p < 0,05$). Сформированные температурные условия способствовали росту сомкнутости ВЗХ-древостоев (на ~1–3 % в год) и их экспансии на север (на ~1,6 км/год). Наблюдаемое смещение границы ВЗХ-древостоев на север происходило на фоне замедления роста температуры (~1995–2015). Граница расположилась в пределах зоны летней температуры 12–15 °С. На Западносибирской равнине рост площади сомкнутых ВЗХ-древостоев определялся весенней температурой ($r = 0,51$; $p < 0,05$). В целом выявленные процессы согласуются с ранее полученными результатами других исследований. В этот же период наблюдался рост площади ВЗХ-древостоев в западной части Сибири (на ~10 %) и сокращение площади лиственничников (~40 %) (He et al., 2017). Отмечалась экспансия темнохвойных древостоев в зону доминирования лиственницы (Kharuk et al., 2007). На северных широтах Сибири в 1981–2012 гг. наблюдались возрастающие тренды вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Urban et al., 2014).

Рельеф местности оказывает существенное влияние на выживаемость деревьев в экстремальных условиях на северном пределе их произрастания (Им, Харук, 2013; Харук и др., 2004; Holtmeier, 2013; Kharuk et al., 2013). На северной границе ВЗХ-древостоев основной прирост площади происходил на относительно больших высотах (на Западносибирской равнине — 100–130 м н. у. м., на Среднесибирском плоскогорье — 350–500 м) на крутых склонах (>5°). На таких участках присутствуют складки рельефа, в которых образуются благоприятные условия для возможности роста деревьев. Смягчение условий окружающей среды способствовало увеличению сомкнутости ВЗХ-древостоев на северных склонах и вверх по градиенту высоты. Их распространение на восточные и северо-восточные склоны связано с особенностями рельефа. Так, прирост площади сомкнутых ВЗХ-древостоев возрастал с увеличением градиента высоты. На Среднесибирском плоскогорье градиент высоты рос преимущественно в восточном и северо-восточном направлениях (см. рис. 3). Однако в низинах Среднесибирского плоскогорья (<300 м н. у. м.) площадь ВЗХ-древостоев уменьшилась. Похожий эффект отмечался в горах Алтае-Саянского региона в начале XXI в. В высокогорьях (>1000 м н. у. м.) площадь ВЗХ-древостоев возросла на 30 %, в низкогорьях — уменьшилась на 7 %. На высотах 800–1200 м наблюдалось значимое уменьшение индекса прироста годичных колец у кедровых древостоев, тогда как выше 1200 м прирост возрастал (Kharuk et al., 2018). На Среднесибирском плоскогорье площадь преимущественно увеличивалась на вогнутых поверхностях, на которых формируются более благоприятные условия влагонакопления.

Смещение на юг северной границы ВЗХ-древостоев на Западносибирской равнине (Z2—, см. рис. 3) связано с разработкой и эксплуатацией нефтегазовых месторождений Ванкорского кластера (нефтепровод Ванкор-Пурпе, ввод в эксплуатацию с 2009 г.) и новых месторождений Ямало-Ненецкого АО (нефтепровод Заполяр-Пурпе, ввод в эксплуатацию с 2017 г.). Ранее проведённый анализ показал, что используемые в начале XXI в. технологии добычи нефти в Западной Сибири могут привести к значительным нарушениям окружающей среды на этих территориях, включая дефорестацию (Им, 2010).

Заключение

В начале XXI в. выявлено продвижение северной границы сомкнутых ВЗХ-древостоев на север (в среднем на $\sim 26 \pm 2$ км; $\sim 1,6$ км/год) из-за возрастания сомкнутости и инвазии в зону доминирования лиственницы. В период потепления (1970–2000) весенние, летние и годовые температуры воздуха возросли на $\sim 0,5$ – $1,5$ °C ($p < 0,05$) и в дальнейшем позволили расшириться ареалу сомкнутых ВЗХ-древостоев на север. Северная граница ВЗХ-древостоев расположилась в зоне средних летних температур 12–15 °C (2001–2016). Известно, что реакция лесных сообществ на климатические изменения является постепенной. Достигнутый к началу XXI в. уровень летних температур способствовал росту ВЗХ-деревьев в течение последующих лет. Однако этот фактор являлся необходимым, но недостаточным для повсеместного распространения ВЗХ-древостоев на север. Неравномерное смещение их северной границы связано с влиянием других факторов, таких как микро- и мезорельеф, ветровой режим, водный баланс, конкуренция с другими растительными сообществами. Негативное воздействие этих факторов могло замедлить рост ВЗХ-деревьев или привести к их деградации. В зонах значимого продвижения границы ВЗХ-древостоев на север в Западной Сибири основной прирост наблюдался на высотах 100–130 м н.у.м. (+45 %), на Среднесибирском плоскогорье — на 350–500 м (+26 %). Прирост был относительно выше на вогнутых склонах (3–7°) северной экспозиции (площадь увеличилась на ~ 15 –50 %). На Западносибирской равнине рост площади ВЗХ-древостоев обусловлен на ~ 26 % повышением температуры ($p < 0,05$). Отступление ВЗХ-лесов в южном направлении связано с разработкой нефтегазовых месторождений Ванкорского кластера и Ямало-Ненецкого АО.

Таким образом, на северной границе ВЗХ-древостоев наблюдается рост сомкнутости и экспансия на ранее климатически неблагоприятные для существования территории. В последующие десятилетия прогнозируется дальнейший рост температур в бореальной зоне (Climate..., 2014). С одной стороны, это даст возможность для более интенсивного роста древостоев и будет способствовать расширению ареала темнохвойных лесов в зону доминирования лиственницы и лесотундру. Так, согласно нашим данным, в зоне границы ВЗХ-древостоев 2001–2003 гг. (в пределах области трёх стандартных отклонений) за 2001–2016 гг. класс лесотундры трансформировался в класс ВЗХ (с учётом прямых и обратных трансформаций) на площади 9840 км² ($\sim 7,3$ % ВЗХ; ~ 656 км²/год), класс лиственничных древостоев — на площади 587 км² ($\sim 0,4$ % ВЗХ; ~ 39 км²/год). Однако, с другой стороны, рост температуры может привести к увеличению засушливости климата и дефициту влаги в зонах с умеренным количеством осадков, а также к развитию различных патогенов, приводящих к гибели деревьев. Это уже наблюдается в средней и южной тайге в Сибири (Kharuk et al., 2017), в хвойных лесах Европейской части России (Крылов, 2018; Малахова, Лямцев, 2014), на Дальнем Востоке (Манько, Гладкова, 2003), в Беларуси (Сазонов и др., 2013), в Латвии (Arhipova et al., 2011), в Украине (Мешкова, 2019) и других частях мира (Allen et al., 2010; Martínez-Vilalta et al., 2012).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-05-00432 и 18-45-240003).

Литература

1. Им С. Т. Влияние разработки Ванкорского нефтегазового месторождения на окружающую среду по данным дистанционного зондирования и ГИС // Материалы 6-го Международ. науч. конгресса ГЕО-Сибирь-2010. Новосибирск, 2010. Т. 4. Ч. 1. С. 168–170.
2. Им С. Т., Харук В. И. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры плато Путорана // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 32–44.
3. Крылов А. М. Пространственно-временные закономерности массового усыхания еловых насаждений Московской области. Ставрополь: ЦНЗ Логос, 2018. 170 с.
4. Леса СССР: карта. 1:2 500 000 / ред. М. Г. Гарсия, Союзгипролесхоз. Москва: ГУГК, 1990.
5. Малахова Е. Г., Лямцев Н. И. Распространение и структура очагов усыхания еловых лесов Подмоскovie в 2010–2012 годах // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад. 2014. № 207. С. 193–201.
6. Манько Ю. И., Гладкова Г. А. Массовое усыхание пихтово-еловых лесов на российском Дальнем востоке: основные итоги изучения // Комаровские чтения. 2003. № 3. С. 131–171.
7. Мешкова В. Л. Усыхание сосновых лесов Украины с участием короедов: причины и тенденции // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад. 2019. № 228. С. 312–335.
8. Сазонов А. А., Кухта В. Н., Блинов А. И., Звягинцев В. Б., Ермохин М. В. Проблема массового усыхания ельников Беларуси и пути ее решения // Лесное и охотничье хоз-во. 2013. № 7. С. 10–15.
9. Харук В. И., Им С. Т., Рэнсон К. Дж., Наурзбаев М. М. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры // Докл. Акад. наук. 2004. Т. 398. № 3. С. 1–5.
10. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J. H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management. 2010. V. 259. P. 660–684.
11. Arhipova N., Gaitnieks T., Donis J., Stenlid J., Vasaitis R. Butt rot incidence, causal fungi, and related yield loss in Picea abies stands of Latvia // Canadian J. Forest Research. 2011. V. 41. P. 2337–2345.
12. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. IPCC Report. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. Field C. B., Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D., Bilir T. E., Chatterjee M., Ebi K. L., Estrada Y. O., Genova R. C., Girma B., Kissel E. S., Levy A. N., MacCracken S., Mastrandrea P. R., White L. L. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2014, 190 p.
13. Danielson J., Gesch D. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED'2010). Open-File Report. U. S. Geological Survey 2011–1073. 2011. 26 p.
14. Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 168–182.
15. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30. P. 5419–5454.
16. Gonsamo A., Chen J. M. Circumpolar vegetation dynamics product for global change study // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 182. No. 1. P. 13–26.
17. He Y., Huang J., Shugart H. H., Guan X. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus // J. Climate. 2017. V. 30. No. 13. P. 5021–5039.
18. Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F. C., Churakova (Sidorova) O., Dühorn E., Esper J., Hülsmann L., Kirdyanov A. V., Moiseev P., Myglan V. S. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest // Environmental Research Letters. 2016. V. 11. No. 7. P. 074021.
19. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. London, Boston, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2013. 384 p.
20. Hu T., Su Y., Xue B., Liu J., Zhao X., Fang J., Guo Q. Mapping global forest aboveground biomass with spaceborne LiDAR, optical imagery, and forest inventory data // Remote Sensing. 2016. V. 8(7). 565.
21. Ju J., Masek J. G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 176. P. 1–16.
22. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Naursbaev M. M. Forest-tundra larch forests and climatic trends // Russian J. Ecology. 2006. V. 37. P. 291–298.
23. Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // Eurasian J. Forest Research. 2007. V. 10. P. 163–171.

24. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Vdovin A. S. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. P. 822–830.
25. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Oskorbin P. A., Dvinskaya M. L., Ovchinnikov D. V. Tree-Line Structure and Dynamics at the Northern Limit of the Larch Forest: Anabar Plateau, Siberia, Russia // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2013. V. 45. No. 4. P. 526–537.
26. Kharuk V., Im S., Petrov I., Dvinskaya M., Fedotova E., Ranson K. Fir Decline and Mortality in the Southern Siberian Mountains // *Regional Environmental Change*. 2017. V. 17(3). P. 803–812.
27. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Warming hiatus and evergreen conifers in Altay-Sayan Region, Siberia // *J. Mountain Science*. 2018. V. 15(12). P. 2579–2589.
28. Kirdyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A., Fedotova E. V., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Moiseev P. A., Rigling A. 20th century treeline advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia // *Boreas*. 2012. V. 41. No. 1. P. 56–67.
29. Liu Y. Y., Van Dijk A. I., De Jeu R. A., Canadell J. G., McCabe M. F., Evans J., Wang G. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // *Nature Climate Change*. 2015. V. 5(5). P. 470–474.
30. Mamet S. D., Brown C. D., Trant A. J., Laroque C. P. Shifting global *Larix* distributions: Northern expansion and southern retraction as species respond to changing climate // *J. Biogeography*. 2019. V. 46(1). P. 30–44.
31. Martínez-Vilalta J., Lloret F., Breshears D. D. Drought-induced forest decline: causes, scope and implications // *Biology Letters*. 2012. V. 8(5). P. 689–691.
32. Myers-Smith I., Hik D. S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance // *J. Ecology*. 2018. V. 106(2). P. 547–560.
33. Olthof I., Pouliot D. Treeline vegetation composition and change in Canada's western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 14(4). P. 805–815.
34. Pflugmacher D., Krankina O. N., Cohen W. B., Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Kennedy R. E., Nelson P., Loboda T. V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V. I. Comparison and Assessment of Coarse Resolution Land Cover Maps for Northern Eurasia // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. P. 3539–3553.
35. Running S. W., Nemani R. R., Heinsch F. A., Zhao M., Reeves M. C., Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production // *BioScience*. 2004. V. 54(6). P. 547–560.
36. Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals // *Russian J. Ecology*. 2015. V. 46. P. 495–502.
37. Shiyatov S. G., Terent'ev M. M., Fomin V. V., Zimmermann N. E. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century // *Russian J. Ecology*. 2007. V. 38. No. 4. P. 223–227.
38. Sulla-Menashe D., Gray J. M., Abercrombie S. P., Friedl M. A. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 222. P. 183–194.
39. Urban M., Forkel M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M. Pan-Arctic Climate and Land Cover Trends Derived from Multi-Variate and Multi-Scale Analyses (1981–2012) // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 2296–2316.
40. Yan K., Park T., Yan G., Chen C., Yang B., Liu Z., Nemani R. R., Knyazikhin Y., Myneni R. B. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Pt. 1: consistency and improvements // *Remote Sensing*. 2016. V. 8(5). P. 359.

Migration of the northern evergreen needleleaf timberline in Siberia in the 21st century

S. T. Im^{1,2,3}, V. I. Kharuk^{1,2}, V. G. Lee⁴

¹ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS
Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: stim@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Krasnoyarsk 660037, Russia

⁴ Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk 660049, Russia
E-mail: viktorya.g.lee@gmail.com

An analysis of the shift of the northern boundaries of closed evergreen coniferous (EGC) stands in Siberia was carried out based on the time series of vegetation cover maps (2001–2016) obtained from MODIS satellite imagery data. The northern boundaries of the EGC for two studied periods (2001–2003 and 2014–2016) were identified. Mostly, a shift of the EGC boundary in the north direction (by $\sim 26 \pm 2$ km) was revealed. An increase in the area of the closed EGC stands (by 15–50 %) contributed to the expansion of their boundaries was not uniform depending on the relief. In Western Siberia, the increase mainly was observed at altitudes of 100–130 m above sea level, and on the Central Siberian plateau — at 350–500 m. The EGC boundary locates in the zone of mean summer temperatures 12–15 °C. In the study area in 1970–2000s, a warming period was observed (temperatures increased by ~ 0.5 – 1.5 °C, $p < 0.05$). The given temperature regimes facilitated an increase of closure of the EGC stands (by ~ 1 – 3 %/year), their expansion to the north, and upward along the elevation gradient. In the zone of intensive anthropogenic impact (oil and gas fields of the Vankor cluster and the Yamalo-Nenets Autonomous Area), a shift of the EGC boundary to the south was observed.

Keywords: evergreen coniferous stands, Siberia, northern forest boundary, MODIS, climate, relief

Accepted: 11.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-176-187

References

1. Im S. T., Vliyanie razrabotki Vankorskogo neftegazovogo mestorozhdeniya na okruzhayushchuyu sredu po dannym dstantsionnogo zondirovaniya i GIS (Effects of Vankor oil-gas field exploitation on the environment based on the remote sensing data and GIS), *Materialy 6-go Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa GEO-Sibir'-2010* (Proc. 6th Intern. Scientific Congress GEO-Siberia-2010), Novosibirsk, 2010, Vol. 4, Part 1, pp. 168–170.
2. Im S. T., Kharuk V. I., Klimaticheskie indutsirovannye izmeneniya v ekotone al'piiskoi lesotundry plato Putorana (Climate-induced changes in the alpine forest-tundra ecotone in Putorana Plateau), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 32–44.
3. Krylov A. M., *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti massovogo usykhaniya elovykh nasazhdenii Moskovskoi oblasti* (Spatio-temporal patterns of mortality of spruce stands in Moscow region), Stavropol: TsNZ Logos, 2018, 170 p.
4. *Lesy SSSR: Karta, 1:2 500 000* (Forests of USSR: Map. 1:2 500 000), M. G. Garsia (ed.), Soyuzgiproleskhoz, Moscow: GUGK, 1990.
5. Malakhova E. G., Lyamtsev N. I., Rasprostraneniye i struktura ochagov usykhaniya elovykh lesov Podmoskov'ya v 2010–2012 godakh (An expansion and structure of spruce forest mortality hot spots in the vicinities of Moscow during 2010–2012 years), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2014, No. 207, pp. 193–201.
6. Manko Yu. I., Gladkova G. A., Massovoye usykhanie pikhtovo-elovykh lesov na rossiiskom Dal'nem vosto-ke: osnovnye itogi izucheniya (Mass mortality of fir-spruce stands in Far East: main conclusions of investigation), *Komarovskie chteniya*, 2003, No. 3, pp. 131–171.
7. Meshkova V. L., Usykhanie sosnovykh lesov Ukrainy s uchastiem koroedov: prichiny i tendentsii (Pine forest mortality in Ukraine with participation of bark-beetles: causes and tendencies), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2019, No. 228, pp. 312–335.

8. Sazonov A. A., Kukhta V. N., Blintsov A. I., Zvyagintsev V. B., Ermokhin M. V., Problema massovogo usykhaniya el'nikov Belarusi i puti ee resheniya (Problem of mass mortality of spruce in Belarus and ways to solve it), *Lesnoe i okhotnich'e khozyaistvo*, 2013, No. 7, pp. 10–15.
9. Kharuk V. I., Im S. T., Ranson K. J., Naurzbaev M. M., Vremennaya dinamika listvennitsi v ekotone leso-tundri (Temporal dynamics of larch in the forest-tundra ecotone), *Doklady Akademii nauk*, 2004, Vol. 398, No. 3, pp. 1–5.
10. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J. H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N., A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, pp. 660–684.
11. Arhipova N., Gaitnieks T., Donis J., Stenlid J., Vasaitis R., Butt rot incidence, causal fungi, and related yield loss in *Picea abies* stands of Latvia, *Canadian J. Forest Research*, 2011, Vol. 41, pp. 2337–2345.
12. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, IPCC, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field C. B., Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D., Bilir T. E., Chatterjee M., Ebi K. L., Estrada Y. O., Genova R. C., Girma B., Kissel E. S., Levy A. N., MacCracken S., Mastrandrea P. R., White L. L. (eds.), Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2014, 190 p.
13. Danielson J., Gesch D., *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED'2010)*, *Open-File Report 2011–1073*, U.S. Geological Survey, 2011, 26 p.
14. Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X., MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 168–182.
15. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B., The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *J. Climate*, 2017, Vol. 30, pp. 5419–5454.
16. Gonsamo A., Chen J. M., Circumpolar vegetation dynamics product for global change study, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 182, No. 1, pp. 13–26.
17. He Y., Huang J., Shugart H. H., Guan X., Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus, *J. Climate*, 2017, Vol. 30, No. 13, pp. 5021–5039.
18. Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F. C., Churakova (Sidorova) O., Dühorn E., Esper J., Hülsmann L., Kirdyanov A. V., Moiseev P., Myglan V. S., Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11, No. 7, pp. 074021.
19. Holtmeier F.-K., *Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics*, London, Boston, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2013, 384 p.
20. Hu T., Su Y., Xue B., Liu J., Zhao X., Fang J., Guo Q., Mapping global forest aboveground biomass with spaceborne LiDAR, optical imagery, and forest inventory data, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(7), p. 565.
21. Ju J., Masek J. G., The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 1–16.
22. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Naurzbaev M. M., Forest-tundra larch forests and climatic trends, *Russian J. Ecology*, 2006, Vol. 37, pp. 291–298.
23. Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L., Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia, *Eurasian J. Forest Research*, 2007, Vol. 10, pp. 163–171.
24. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Vdovin A. S., Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia, *Global Ecology and Biogeography*, 2010, Vol. 19, pp. 822–830.
25. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Oskorbin P. A., Dvinskaya M. L., Ovchinnikov D. V., Tree-Line Structure and Dynamics at the Northern Limit of the Larch Forest: Anabar Plateau, Siberia, Russia, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, Vol. 45, No. 4, pp. 526–537.
26. Kharuk V., Im S., Petrov I., Dvinskaya M., Fedotova E., Ranson K., Fir Decline and Mortality in the Southern Siberian Mountains, *Regional Environmental Change*, 2017, Vol. 17(3), pp. 803–812.
27. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Warming hiatus and evergreen conifers in Altay-Sayan Region, Siberia, *J. Mountain Science*, 2018, Vol. 15(12), pp. 2579–2589.
28. Kirdyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A., Fedotova E. V., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Moiseev P. A., Rigling A., 20th century treeline advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia, *Boreas*, 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 56–67.
29. Liu Y. Y., Van Dijk A. I., De Jeu R. A., Canadell J. G., McCabe M. F., Evans J., Wang G., Recent reversal in loss of global terrestrial biomass, *Nature Climate Change*, 2015, Vol. 5(5), pp. 470–474.

30. Mamet S. D., Brown C. D., Trant A. J., Laroque C. P., Shifting global *Larix* distributions: Northern expansion and southern retraction as species respond to changing climate, *J. Biogeography*, 2019, Vol. 46(1), pp. 30–44.
31. Martínez-Vilalta J., Lloret F., Breshears D. D., Drought-induced forest decline: causes, scope and implication, *Biology Letters*, 2012, Vol. 8(5), pp. 689–691.
32. Myers-Smith I., Hik D. S., Climate warming as a driver of tundra shrubline advance, *J. Ecology*, 2018, Vol. 106(2), pp. 547–560.
33. Olthof I., Pouliot D., Treeline vegetation composition and change in Canada's western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 14(4), pp. 805–815.
34. Pflugmacher D., Krankina O. N., Cohen W. B., Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Kennedy R. E., Nelson P., Loboda T. V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V. I., Comparison and Assessment of Coarse Resolution Land Cover Maps for Northern Eurasia, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 3539–3553.
35. Running S. W., Nemani R. R., Heinsch F. A., Zhao M., Reeves M. C., Hashimoto H., A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, *BioScience*, 2004, Vol. 54(6), pp. 547–560.
36. Shiyatov S. G., Mazepa V. S., Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals, *Russian J. Ecology*, 2015, Vol. 46, pp. 495–502.
37. Shiyatov S. G., Terent'ev M. M., Fomin V. V., Zimmermann N. E., Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century, *Russian J. Ecology*, 2007, Vol. 38, No. 4, pp. 223–227.
38. Sulla-Menashe D., Gray J. M., Abercrombie S. P., Friedl M. A., Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 222, pp. 183–194.
39. Urban M., Forkel M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M., Pan-Arctic Climate and Land Cover Trends Derived from Multi-Variate and Multi-Scale Analyses (1981–2012), *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 2296–2316.
40. Yan K., Park T., Yan G., Chen C., Yang B., Liu Z., Nemani R. R., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Part 1: consistency and improvements, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(5), p. 359.