

EDN: HTMBYS

УДК 528.8

## Dynamics of NDVI Trends for Vegetation in Western Siberia Under the Conditions of Climate Change (According to Satellite Data)

Irina Y. Botvich\*,  
Galina S. Vysotskaya, Sergej A. Ivanov,  
Tamara I. Pisman and Anatolij P. Shevyrnogov  
*Institute of Biophysics SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 23.01.2023, received in revised form 04.02.2023, accepted 03.03.2023

**Abstract.** A study was made of the response of NDVI trends for various types of vegetation in Western Siberia to climate change (biotemperature and precipitation). MODIS satellite data, Land Cover Type for 2001 and climate change data for the periods (2000–2010) and (2010–2020) were used. It was found that NDVI trends for all types of vegetation were positive for the studied periods. However, with regard to the vegetation of the tundra and southern shrub tundra, the NDVI trends for the period (2010–2020) significantly exceed the NDVI trends for the previous decade (2000–2010). The average annual biotemperature for the period (2011–2018) compared with the period (2001–2008) increased throughout the study area, with the exception of the areas with deciduous-coniferous forests. As a result of the analysis of humidity dynamics for the period (2011–2018) compared with the period (2001–2008), a slight increase in average annual precipitation was revealed almost throughout the entire territory of Western Siberia. The exceptions were tundra and cropland/natural vegetation mosaics, where a decrease in moisture was found.

**Keywords:** MODIS, Land Cover Type, Western Siberia, NDVI trends, biotemperature, precipitation.

Citation: Botvich, I.Y., Vysotskaya, G.S., Ivanov, S.A., Pisman, T.I., Shevyrnogov, A.P. Dynamics of NDVI trends for vegetation in western Siberia under the conditions of climate change (according to satellite data). J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(2), 244–251. EDN: HTMBYS



# Динамика трендов NDVI растительности Западной Сибири в условиях климатических изменений (по спутниковым данным)

И. Ю. Ботвич, Г. С. Высоцкая,  
С. А. Иванов, Т. И. Письман, А. П. Шевырнов  
*Институт биофизики СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Проведено исследование отклика трендов NDVI различных типов растительности Западной Сибири на изменение климата (биотемпературы и осадков). Используются спутниковые данные MODIS, карты земного покрова (Land Cover Type) за 2001 г. и данные климатических изменений за периоды 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. Выявлено, что тренды NDVI всех типов растительности положительны для исследованных периодов. При этом для растительности тундры и южной кустарниковой тундры тренды NDVI за период 2010–2020 гг. значительно превышают тренды NDVI за предыдущее десятилетие (2000–2010 гг.). Среднегодовая биотемпература за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. возросла на всей исследуемой территории, за исключением участков с лиственно-хвойными лесами. В результате анализа динамики влажности за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. выявлено небольшое увеличение среднегодовых осадков почти на всей территории Западной Сибири. Исключение составляют территория тундры и залежные земли, на которых обнаружено уменьшение влажности.

**Ключевые слова:** MODIS, Land Cover Type, Западная Сибирь, тренды NDVI, биотемпература, осадки.

Цитирование: Ботвич И. Ю. Динамика трендов NDVI растительности Западной Сибири в условиях климатических изменений (по спутниковым данным) / И. Ю. Ботвич, Г. С. Высоцкая, С. А. Иванов, Т. И. Письман, А. П. Шевырнов. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(2). С. 244–251. EDN: HTMBYS

## Введение

На фоне наблюдаемых климатических изменений во многих регионах мира отмечают процессы трансформации природных экосистем [1]. Влияние климатических изменений на экосистемы в большей степени проявляется в северных районах – тайге и тундре, где растительность реагирует преимущественно на температурные изменения [2]. Так, в результате потепления в тундре Евразии и Северной Америки наблюдается увеличение продуктивности растительных систем, «позеленение» тундры отмечается на территории Российской Арктики [3]. В разных районах зоны бореальных лесов имеет место как увеличение продуктивности экосистем, так и ее снижение [4]. Рост температуры воздуха приводит к расширению ареалов и массовому размножению насекомых-вредителей, а также к увеличению числа лесных пожаров, что влечет за собой потери биомассы [5].

Ландшафты Западной Сибири изменяются от тундровых на севере региона до степных на юге, однако преобладающую часть территории в среднем и нижнем течении Оби занимают лесоболотные комплексы. Поглощая из атмосферы углекислый газ и депонируя его в почве, торфе и растительной биомассе, лесные и болотные экосистемы Западной Сибири играют важ-

ную климаторегулирующую роль и являются одним из самых значительных пулов углерода в мире [6]. Однако трансформация ландшафтов и изменение продуктивности растительных систем ведут к изменениям углеродного баланса территории. Имеющиеся оценки изменений растительного покрова северных районов Западно-Сибирской равнины указывают на рост продуктивности растительности тундр [7]. Территория Западно-Сибирской равнины в последние десятилетия характеризуется в основном положительными трендами температуры воздуха и атмосферных осадков в теплый период года. Тем не менее анализ изменений продуктивности растительного покрова и оценка их связи с климатическими параметрами для большей части территории отсутствуют. Поэтому возникает необходимость в проведении исследований отклика растительного покрова Западной Сибири на климатические изменения последних десятилетий.

Целью работы является проведение исследований отклика трендов NDVI различных типов растительности Западной Сибири на изменение климата (биотемпературы и осадков) с использованием спутниковых данных MODIS, карты земного покрова (Land Cover Type) за 2001 г. и данных климатических изменений за периоды 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг.

### **Объект и методы исследования**

Объектом исследования является территория Западной Сибири, которая расположена в пределах  $48^{\circ}$ – $75^{\circ}$  с.ш. и  $60^{\circ}$ – $92^{\circ}$  в.д. и охватывает лесоболотную (таежную) и тундровую зоны Западно-Сибирской равнины.

Западная Сибирь – часть Сибири, расположенная между Уральскими горами на западе и руслом Енисея на востоке. Север Западной Сибири омывается Карским морем, с юга она ограничена северной частью Казахстана. Площадь региона – 2 451 100 км<sup>2</sup> (14 % территории России). Около 80 % площади Западной Сибири расположено в пределах Западно-Сибирской равнины.

Климат Западной Сибири континентальный. Для северных районов характерны холодная продолжительная зима и прохладное дождливое лето. В южных районах зима менее суровая, а лето тёплое и сухое. Большая часть Западной Сибири отличается повышенным увлажнением и сильной заболоченностью. Средняя температура января колеблется от  $-15^{\circ}\text{C}$  на юге до  $-40^{\circ}\text{C}$  на севере региона.

Исследование основывается на карте земного покрова (The MODIS Land Cover Type), полученной по спутниковым данным MODIS/Terra+Aqua – (продукт MCD12C1) за 2001 г. Пространственное разрешение составляет 5600 м. Легенда карты содержит 15 тематических классов.

В работе использованы данные по среднемесячным температурам и осадкам с сайта Climatic Research Unit с разрешением  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ . Были вычислены средние значения годовых биотемператур и годовых сумм осадков за периоды 2001–2008 гг. и 2011–2018 гг. При выборе временных интервалов опущены годы резких климатических изменений, которые сопровождаются аномально высокими и низкими значениями климатических параметров. При вычислении биотемпературы принимаются во внимание только температуры выше нуля, температуры ниже нуля при суммировании учитываются как  $0^{\circ}\text{C}$ .

Для расчета тренда NDVI в качестве исходного материала использованы данные MODIS/Terra (продукт MOD13C2) за периоды 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. MOD13C2 представляет со-

бой ежемесячные индексы растительности, получаемые с помощью спектрорадиометра. Глобальные данные MOD13C2 представляют собой безоблачные пространственные композиты и предоставляются как продукт Level 3, спроецированный на географическую сетку климатического моделирования (CMG) – 0,05 градуса.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1. представлена карта растительности на территории Западной Сибири за 2001 г.

На карте достаточно четко отображается широтная зональность растительности, так как территория Западной Сибири имеет значительную протяженность от побережья Северного Ледовитого океана вглубь материка. Зональность представлена сменой зон и подзон по широте. В пределах равнины располагаются тундровая, лесотундровая, лесная (лесоболотная), лесостепная и степная зоны.

Тундровая зона разделяется на три подзоны: арктическая (пятнистая), мохово-лишайниковая (типичная) и кустарниковая (южная) тундры.

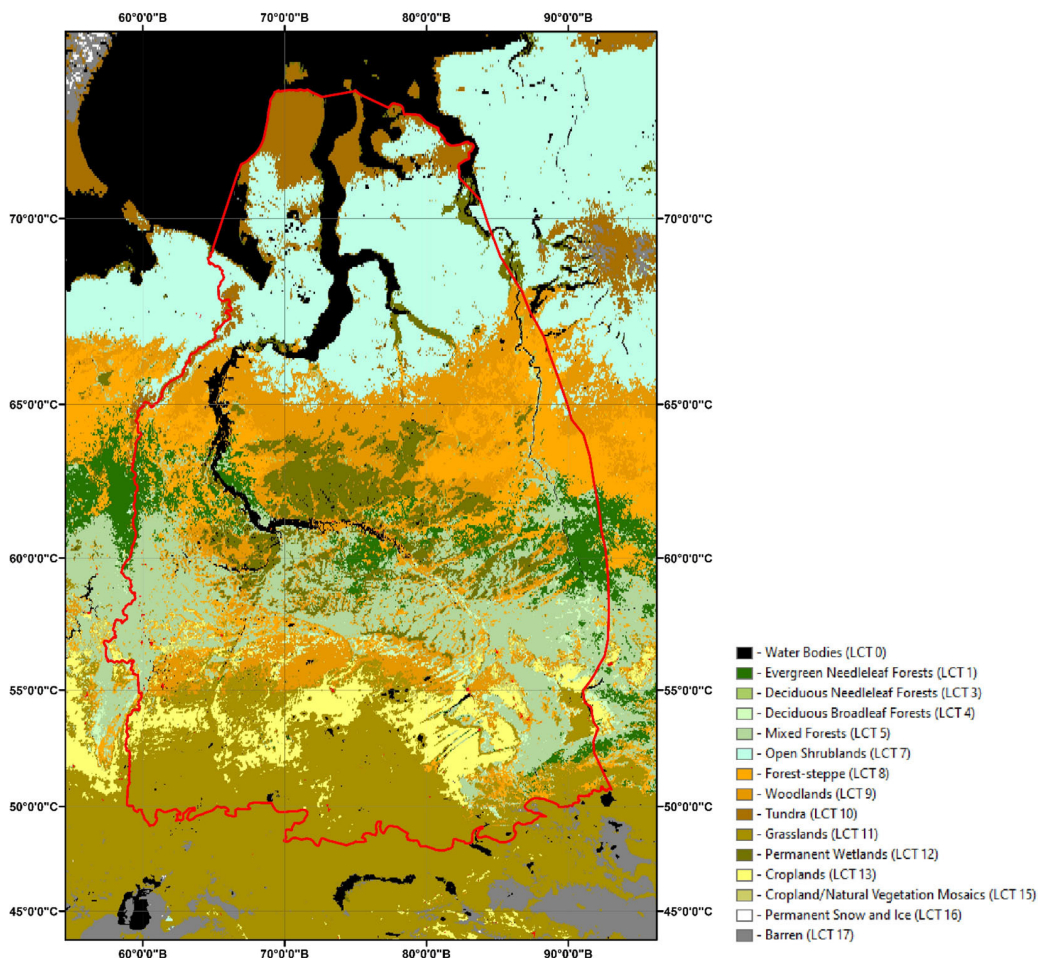


Рис. 1. Карта растительности на территории Западной Сибири за 2001 г. по спутниковым данным

Fig. 1. Vegetation map of Western Siberia for 2001 according to satellite data

Арктическая (северная) тундра занимает самые северные районы. Здесь сплошной растительный покров практически отсутствует. Южнее расположена подзона средней (мохово-лишайниковой тундры). На карте (рис. 1) северная и средняя тундры объединены и представлены как «тундра» (выделено коричневым цветом).

Растительный покров южной (кустарниковой) тундры (выделено голубым цветом) представлен в основном березой и ольхой высотой до 0,5–1,5 м. В заболоченных понижениях типичны кустарниковые ивы, багульник, голубика, брусника.

В южной части тундры находится переходная зона – область лесотундры. На карте ей соответствует тип растительности, называемый «редколесье». В лесотундре растительный мир богаче. Встречаются участки редколесья, различные кустарники.

Лесная (лесоболотная) зона разделяется на 3 подзоны (северотаежная подзона, среднетаежная подзона, южнотаежная подзона). Тайга Западно-Сибирской равнины является самой обширной областью и занимает чуть больше 60 % всей территории. Из древесной растительности здесь преобладают темнохвойные вечнозеленые леса, лиственнно-хвойные, лиственные широколиственные и смешанные леса. Тайга Западной Сибири считается самой заболоченной зоной на всей Земле.

На юге расположены лесостепи и степи. Лесостепь – переходная зона между лесными участками и степью. В основном здесь преобладает разнотравье. Деревья встречаются в виде небольших островков. Самые частые представители – береза и осина. Степи имеют континентальный климат. На карте степи выделены коричневым цветом. Снег здесь лежит около полугода. Почва плодородная и годится для ведения сельского хозяйства. В основном выращиваются злаковые культуры.

Всем типам растительности, представленным на карте (рис. 1), присвоены обозначения (LCT – Land Cover Type) с различной нумерацией: LCT 1 – темнохвойные вечнозеленые леса, LCT 3 – лиственнно-хвойные леса, LCT 4 – лиственные широколиственные леса, LCT 5 – смешанные леса, LCT 7 – кустарники, LCT 8 – лесостепь, LCT 9 – редколесье, LCT 10 – тундра, LCT 11 – степи, LCT 12 – постоянные водно-болотные угодья, LCT 13 – пахотные угодья, LCT 15 – залежи, LCT 17 – бесплодные или с редкой растительностью.

Для оценки влияния климатических изменений на продуктивность различных типов растительности Западной Сибири проведен анализ связи трендов индекса NDVI (рис. 2) и климатических параметров – среднегодовой биотемпературы (рис. 3) и осадков (рис. 4) за различные периоды.

Как видно из рис. 2, тренды NDVI всех типов растительности положительные для периодов 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. Однако нетрудно заметить, что для растительности тундры (LCT 10) и южной кустарниковой тундры (LCT 7) тренды NDVI за период 2010–2020 гг. значительно превышают тренды NDVI за предыдущее десятилетие (2000–2010 гг.).

«Позеленение» тундры (и, соответственно, повышение запасов надземной фитомассы) связано в основном а) с формированием кустарниковых тундр на месте кустарничковых, моховых и мохово-лишайниковых и б) превращением стелющихся кустарников в пряморастущие. В результате эти процессы дают эффект повышения проективного покрытия кустарников и сравнительно быстрого роста фитомассы.

Проведенный анализ спутниковых данных по территории тундры подтвердил выявленные тренды роста продуктивности растительности. За последние десятилетия выросло усред-

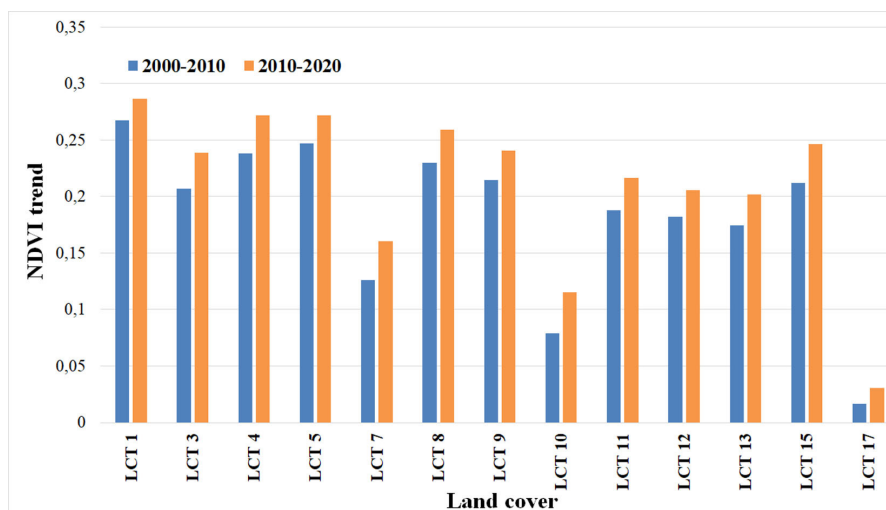


Рис. 2. Динамика трендов NDVI разных типов растительности на территории Западной Сибири за периоды 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. LCT 1 – темнохвойные вечнозеленые леса, LCT 3 – лиственно-хвойные леса, LCT 4 – лиственные широколиственные леса, LCT 5 – смешанные леса, LCT 7 – кустарники, LCT 8 – лесостепь, LCT 9 – редколесье, LCT 10 – тундра, LCT 11 – степи, LCT 12 – постоянные водно-болотные угодья, LCT 13 – пахотные угодья, LCT 15 – залежи, LCT 17 – бесплодные или с редкой растительностью

Fig. 2. Dynamics of NDVI trends for different types of vegetation on the territory of Western Siberia for the periods (2000–2010) and (2010–2020) LCT 1 – evergreen needle leaf forests, LCT 3 – deciduous needleleaf forests, LCT 4 – deciduous broadleaf forests, LCT 5 – mixed forests, LCT 7 – shrublands, LCT 8 – forest – steppe, LCT 9 – woodlands, LCT 10 – tundra, LCT 11 – grasslands, LCT 12 – permanent wetlands, LCT 13 – crop lands, LCT 15 – cropland/natural vegetation mosaics, LCT 17 – barren

ненное значение вегетационного индекса NDVI, отражающего «позеленение» тундр, в диапазоне от 15 до 30 % [3].

Одним из основных факторов, определяющих продуктивность растительных систем, является температура воздуха. Как видно из рис. 3, среднегодовая биотемпература за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. возросла на всей территории Западной Сибири, за исключением участков с лиственно-хвойными лесами (LCT 3).

Наблюдаемое потепление климата на большей части нашей планеты приводит к изменениям в составе, структуре и функционировании растительных экосистем, особенно в тех областях, где тепло и влага являются лимитирующими факторами существования растительности. В этих наиболее уязвимых переходных природных ландшафтах возможно смещение границ растительных сообществ. Изменения в составе растительности смогут проявиться прежде всего в составе трав и подроста деревьев, так как реальные сдвиги границ лесов и их ареалов за период в 20 лет достаточно малы [8].

В результате анализа динамики влажности за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. выявлено небольшое увеличение среднегодовых осадков почти на всей территории Западной Сибири, за исключением тундры (LCT 10) (рис. 4). При этом наибольшее увеличение количества осадков отмечено на территории лиственно-хвойных лесов LCT 3.

Неоднородность изменений климата предопределяет сложную и неоднозначную реакцию на них наземной растительности. Тенденция к повышению температуры и изменению количе-

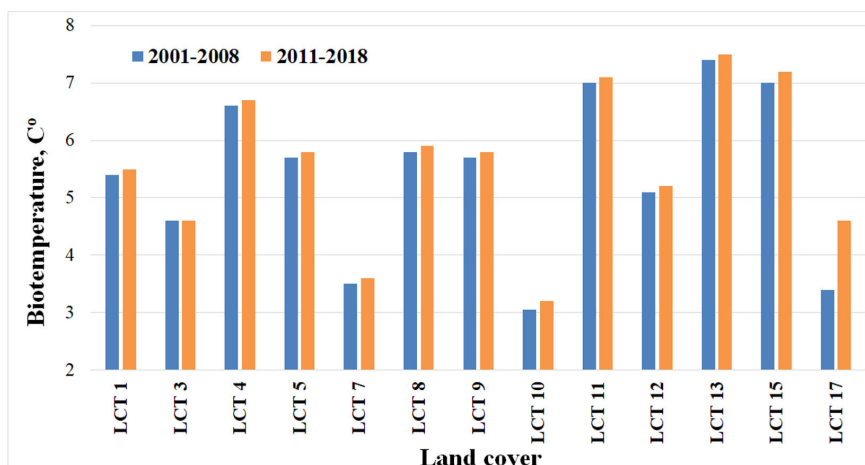


Рис. 3. Динамика среднегодовой биотемпературы на территории Западной Сибири за периоды 2001–2008 гг. и 2011–2018 гг. Названия типов растительности (LCT) представлены в подписи к рис. 2

Fig. 3. Dynamics of the average annual biotemperature on the territory of Western Siberia for the periods (2001–2008) and (2011–2018). Vegetation type names (LCTs) are provided in the caption to Fig. 2

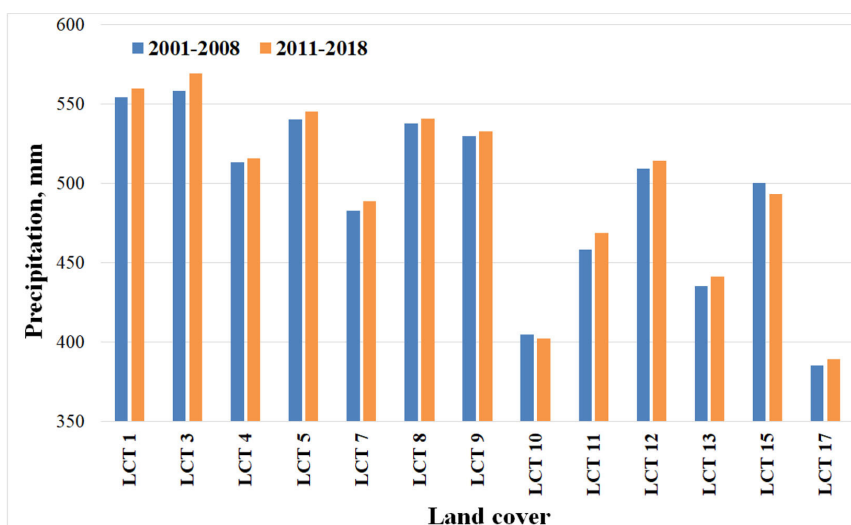


Рис. 4. Динамика среднегодовых осадков на территории Западной Сибири за периоды 2001–2008 гг. и 2011–2018 гг. Названия типов растительности (LCT) представлены в подписи к рис. 2

Fig. 4. Dynamics of average annual precipitation on the territory of Western Siberia for the periods (2001–2008) and (2011–2018). Vegetation type names (LCTs) are provided in the caption to Fig. 2

ства осадков может вызвать серьёзные изменения в структуре и видовом составе растительного покрова. Климатические изменения могут существенно отразиться на сроках сезонного развития растительности. Под воздействием повышения глобальной приземной температуры, изменения количества осадков, увеличения продолжительности безморозного периода и других климатических характеристик может произойти сокращение и фрагментация ареалов многих видов растений с возникновением новых условий существования для отдельных растительных сообществ и экосистем [7].

### Заключение

На основе карты земного покрова (Land Cover Type) Западной Сибири за 2001 г. проведено исследование отклика трендов NDVI различных типов растительности в зависимости от изменений климата (биотемпературы и осадков) за периоды 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. по спутниковым данным MODIS. В результате сделаны следующие выводы:

– Тренды NDVI всех типов растительности положительны для периодов 2000–2010 гг. и 2010–2020 гг. При этом для растительности тундры и южной кустарниковой тундры тренды NDVI за период 2010–2020 гг. значительно превышают тренды NDVI за предыдущее десятилетие (2000–2010 гг.).

– Среднегодовая биотемпература за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. возросла на всей территории Западной Сибири, за исключением участков с лиственно-хвойными лесами.

– В результате анализа динамики влажности за период 2011–2018 гг. по сравнению с периодом 2001–2008 гг. выявлено небольшое увеличение среднегодовых осадков почти на всей территории, за исключением тундры и залежных земель.

### Список литературы / References

[1] Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecol. Manag.*, 2010, 259(4), 660–684. (DOI:10.1016/j.foreco.2009.09.001)

[2] Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D. et. al. Forest disturbances under climate change, *Nat. Clim. Change*, 2017, 7(6), 395–402. (DOI: doi.org/10.1038/nclimate3303)

[3] Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P. Russian Arctic warming and “greening” are closely tracked by tundra shrub willows, *Global Change Biology*, 2010, 16, 1542–1554.

[4] Beck P.S.A., Goetz S.J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences, *Environ. Res. Lett.*, 2011, 6(6).(DOI:10.1088/1748–9326/6/4/045501)

[5] Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change, *Science*, 2015, 349(6250), 819–822. (DOI:10.1126/science.aaa9092)

[6] Ma K., Liu J., Zhang Y., Parry L.E., Holden J., Ciais P. Refining soil organic carbon stock estimates for Chinas palustrine wetlands, *Environ. Res. Lett.*, 2015, 10(12), 124016.

[7] Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability, *Nature*, 2016, 531(7593), 229–232. (DOI:10.1038/nature16986)

[8] Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change, *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19, 755–768.