

NDVI темнохвойных лесов как функция климата в Волжском бассейне

П. А. Шарый¹, Л. С. Шарая²

¹ *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Пущино, 142290, Московская обл., Россия
E-mail: p_shary@mail.ru*

² *Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, 445003, Россия
E-mail: l_sharaya@mail.ru*

Вегетационный индекс NDVI темнохвойных лесов лета 2005 г. статистически сравнивается с характеристиками климата в Волжском бассейне. Для этого выделяются две части данного региона, представляемые двумя выборками по 200 точек (площадок 1 км²) каждая: северо-восточной (выборка NE) и западной (выборка W). Средняя температура зимы в выборке W на 3,5° больше, чем в NE. Построены две модели множественной регрессии, связывающие NDVI с климатом: для NE и для W. При этом связь NDVI с зимней температурой или температурой февраля в выборке NE положительная, а в выборке W — отрицательная. Связь NDVI с осадками холодного периода (ноябрь — март) отрицательная в выборке NE и положительная в W. Аргументируется, что такое нелинейное для региона в целом поведение NDVI темнохвойных лесов с противоположными знаками связей для выборок NE и W можно объяснить как поурождением деревьев морозами, так и известными эффектами зимней засухи. Это дополнительно усиливается влиянием осадков. Зимняя засуха состоит в том, что в конце зимы, когда корни ещё заморожены, усиливающаяся транспирация приводит к обезвоживанию ветвей деревьев, что проявляется летом в снижении NDVI.

Ключевые слова: темнохвойные леса, характеристики климата, зимняя засуха, множественная регрессия

Одобрена к печати: 26.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-178-185

Фотосинтетическую активность лесов принято оценивать количеством хлорофилла в зелёных листьях (иголках) растений. В спутниковых данных эта активность оценивается с помощью индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), основанного на отражении в ближнем инфракрасном (*англ.* near infrared — NIR) и красном (RED) участках спектра: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Зависимость NDVI от времени года напоминает синусоиду с летним максимумом для хвойных лесов (Zhou et al., 2001), но для лиственных обычно имеет плоскую вершину в тёплый период (Hwang et al., 2011). Специфика временного хода в NIR и RED позволяет выделять ведущие древесные породы; на подобной основе классификационными методами также выделяются тематические классы наземного покрова. В России с помощью спутниковых данных с 2000 г. ежегодно составляются матрицы разрешения 250 м и карты этих классов, ведущих пород, а также запасов стволовой древесины (Барталев и др., 2016). По кривым зависимости NDVI(t) оценивают фенологические даты, такие как срединные дни зеленения (весны) и увядания лесов определённого типа, а также продолжительность вегетационного периода (Fisher et al., 2006). Изменение таких дат и периодов со временем могло бы помочь в оценке влияния глобального потепления на леса, оценённого до 2100 г. как весьма тревожное (Швиденко, 2012), однако зависимость NDVI от климата изучена недостаточно. Ситуация осложняется тем, что фенологические даты и периоды лесов в гористых областях, таких как восток США, зависят также от создающего микроклимат рельефа (Fisher et al., 2006), одним из выражений чего является «закон Хопкинса» (Hwang et al., 2011), согласно которому срединный день зеленения (весны) наступает на сутки позже при увеличении высоты на 30 м. Хотя зависимость от рельефа (высоты, солнечной радиации и водосборной площади) фенологических дат и периодов в горной области США, полученных с помощью кривых NDVI(t) разрешения 250 м,

изучалась в работе (Hwang et al., 2011), её нельзя преобразовать в зависимость от меняющегося климата, так как за десятки лет климат меняется, а рельеф — нет.

Поскольку глобальное потепление определяется изменением климата, важна информация о связи фотосинтетической активности (NDVI) различных типов леса именно с климатом, для чего естественно использовать не горную, а равнинную местность, на которой рельеф играет меньшую роль. Как показано ранее (Шарый и др., 2020), в Волжском бассейне индексы NDVI лета 2005 г. для каждого типа леса (темнохвойные, светлохвойные, смешанные и лиственные) нелинейно менялись с климатом, причём особенно тесные связи наблюдались для темнохвойных лесов. Для них на северо-востоке региона отмечалось резкое уменьшение NDVI из-за возрастания здесь индекса континентальности (*англ.* index of continentality — IC) климата, так что при $IC > 43,7$ °C темнохвойные леса в регионе не росли. Если в направлении на северо-восток были важны термические факторы, то в направлении на юго-восток были важнее гидротермические, так что при дефиците воды (*англ.* water deficit, WD) больше 251 мм/год темнохвойные леса не росли. Было также показано, что в Волжском бассейне летнее NDVI 2005 г. более тесно связано со среднемесячной температурой зимних месяцев, чем летних (Шарый и др., 2020). Найденные критические значения IC и WD относятся к определённым границам Волжского бассейна. В работе (Шарый и др., 2020) с помощью кубических трендов изучалась также теснота связи NDVI для разных типов леса с отдельными характеристиками климата, взятыми порознь. Ясно, однако, что внутри региона NDVI лесов связан не только с температурой, но и с другими характеристиками климата. Для изучения этого используют методы множественной регрессии (Шарый и др., 2019; Moser et al., 2005; Richerson, Lum, 1980). Цель данной работы — анализ влияния ряда факторов климата на NDVI темнохвойных лесов Волжского бассейна с помощью множественной регрессии.

Материалы и методы

Матрица лесного покрова России с разрешением 1035 м была создана на основе данных прибора Vegetation спутника наблюдения за Землёй SPOT (*фр.* Satellite Pour L'Observation de la Terre) 2001–2010 гг. в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2016), данные взяты с сайта ИКИ РАН <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317>. В настоящей работе используется только один класс лесного покрова: темнохвойные леса. Южная часть Волжского бассейна была исключена из анализа, поскольку там нет темнохвойных лесов. Непосредственно западные склоны Урала также исключались из анализа. Размер прямоугольника, обрамляющего участок исследования, — 1145 км по долготе и 700 км по широте. Значения NDVI для лета 2005 г. были получены и скорректированы в ИКИ РАН по данным сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутника Terra. Для темнохвойных лесов мы сформировали векторные точечные данные с соответствующими значениями NDVI. Данные того же разрешения 1 км об осадках и температуре каждого месяца взяты нами из базы данных WorldClim (Hijmans et al., 2005), где они усреднены за 50 лет (1950–2000). Цифровая модель рельефа взята из данных SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topographic Mission — радиолокационная топографическая миссия шаттла) (Rodriguez et al., 2005) того же разрешения 1 км. Все эти данные преобразованы нами в проекцию Каврайского для европейской части России с разрешением 1 км.

Для расчёта среднегодовых значений испаряемости PET (*англ.* potential evapotranspiration, потенциальная эвапотранспирация), испарения АЕТ (*англ.* actual evapotranspiration, актуальная эвапотранспирация), дефицита воды $WD = PET - АЕТ$, коэффициента увлажнения (*англ.* moisture index — MI) $MI = MAP/PET$ (MAP — среднегодовая сумма осадков), индекса континентальности IC (амплитуды среднемесячной температуры: $T_{max} - T_{min}$), индекса Де Мартона (*фр.* Emmanuel de Martonne) $IDM = MAP/(MAT + 10)$ (MAT — среднегодовая температура) использовались методики, описанные в работе (Шарый и др., 2020). Поскольку MAT может менять знак, в IDM к ней добавляют 10 °C, что делает этот индекс положительным.

При выделении двух географических районов, западного W (от *англ.* western) и северо-восточного NE (от *англ.* northeastern), по зимней температуре для раздельного анализа темныхвойные леса изучаемого региона Волжского бассейна разделились, как показано на *рис. 1*.

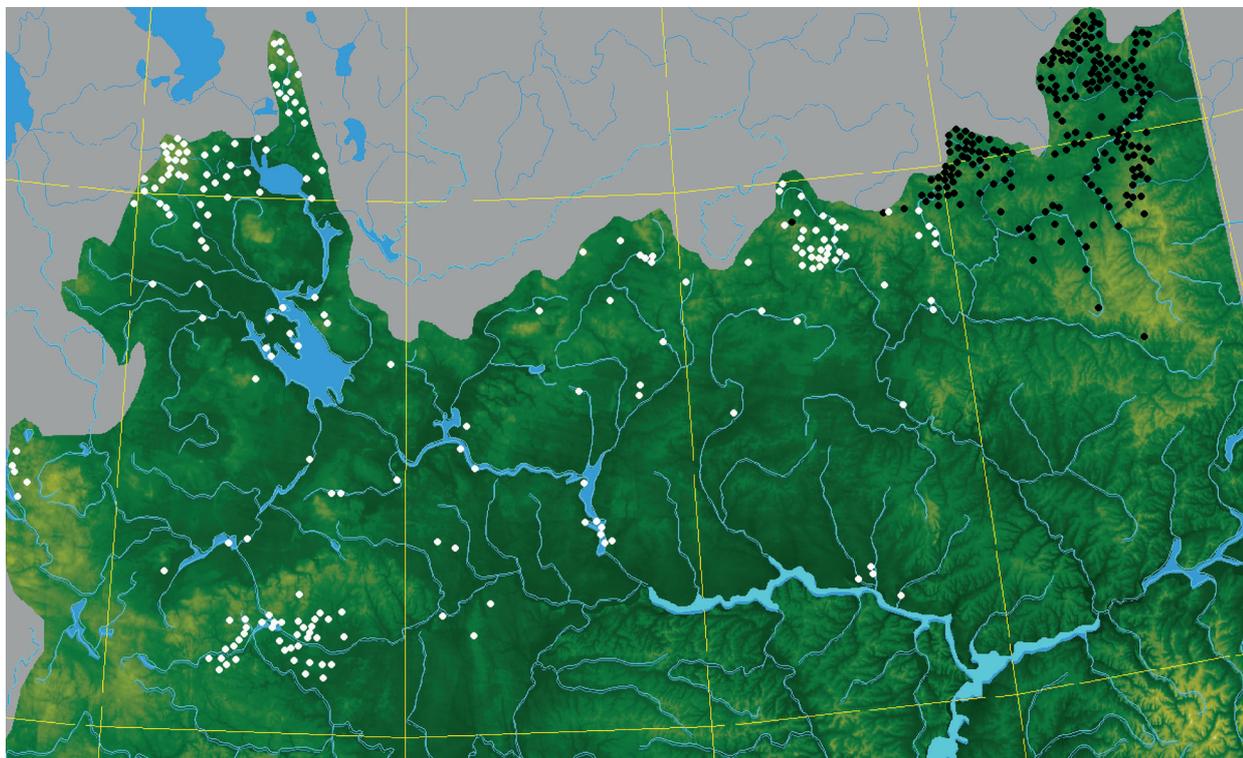


Рис. 1. Расположение точек западной (белого цвета) и северо-восточной (чёрного) выборок на фоне карты высоты (светлее — больше). Показана также пятиградусная сетка

На севере западной части вблизи Онежского озера леса представлены среднетаёжными еловыми зеленомошными кустарничковыми и еловыми долгомошными сфагновыми заболоченными. Южнее, в зоне смешанных лесов, еловые леса встречаются островками внутри берёзовых, осиновых, сероольховых и в осиновых и берёзовых с широколиственными породами лесов. Восточнее г. Вологды располагаются южнотаёжные еловые леса с несомкнутым покровом зелёных мхов кустарничково-травяные. На северо-востоке Волжского бассейна присутствуют те же среднетаёжные еловые леса, что и на западе, за исключением сфагновых заболоченных, дополненные также пихто-еловыми зеленомошными травяно-кустарничковыми предуральскими (Грибова и др., 1980).

Зависимость индекса NDVI от климата обычно была немонотонной, часто меняя возрастание на убывание в северо-восточной и западной частях региона исследования — Волжского бассейна. В северо-восточной части региона NDVI темныхвойных лесов возрастал с ростом температуры зимы, а в западной убывал. В западной части региона NDVI темныхвойных лесов убывал с ростом дефицита воды WD, а в северо-восточной возрастал. Поэтому набор точечных данных NDVI был разделён на непересекающиеся северо-восточную и западную части. Затем эти выборки были разрежены по критерию минимального расстояния между точками больше некоторого заданного значения, которое в любой выборке было больше 7 км. Как известно, автокорреляция уменьшается с ростом расстояния между точками наблюдения, так что уже при расстоянии между ними 250 м для характеристик лесов Австрийских Альп она была незначимой (Lischke et al., 1998). Каждая выборка содержит 200 точек наблюдения. Мы обозначаем полученные выборки как W для западной части региона и NE — для северо-восточной.

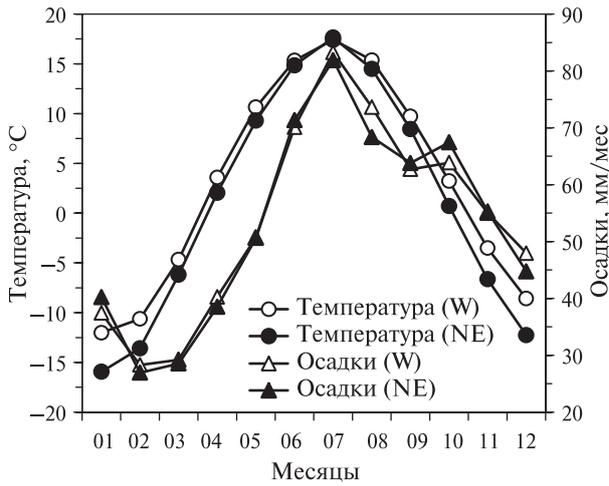


Рис. 2. Распределение температуры и осадков по месяцам для западной (W) и северо-восточной (NE) частей региона

Среднемесячные температуры и осадки (средние за 50 лет), усреднённые также по точкам W и NE, показаны на рис. 2.

Отсюда видно, что зимой на северо-востоке региона средняя температура заметно ниже, чем на западе (в январе — на 3,9 °С). Осадки не демонстрируют таких различий.

В настоящей работе используется линейная множественная регрессия с решением по методу наименьших квадратов OLS (англ. ordinary least squares). Подход

OLS представляется сравнительно простым и наиболее популярным. В качестве зависимой переменной мы брали NDVI, а в качестве независимых переменных (предикторов) — характеристики климата и высоту земной поверхности. Мы фиксировали число предикторов как равное четырём, поскольку пятый предиктор часто незначим в модели. Независимость предикторов проверялась с помощью факторов вспухания дисперсии VIF_i (англ. variance inflation factors) (Montgomery, Peck, 1982) по критерию $\max\{VIF_i\} \leq 5,15$ (Шарый, Пинский, 2013). Любые комбинации предикторов, для которых этот критерий не выполнялся, исключались из рассмотрения. Из оставшихся наборов четырёх (независимых) предикторов выбирался тот, для которого коэффициент детерминации R^2 был наибольшим. Поэтому выбор предикторов в финальной модели не зависел от предпочтений авторов. Значимость предикторов в модели оценивалась по t -статистикам Стьюдента (Montgomery, Peck, 1982), и в уравнении регрессии предикторы располагали в порядке убывания значимости. В приведённых ниже моделях все предикторы значимы. Автокорреляция остатков считалась пренебрежимо малой, так как точки наблюдения были расположены далеко (более 7 км) друг от друга.

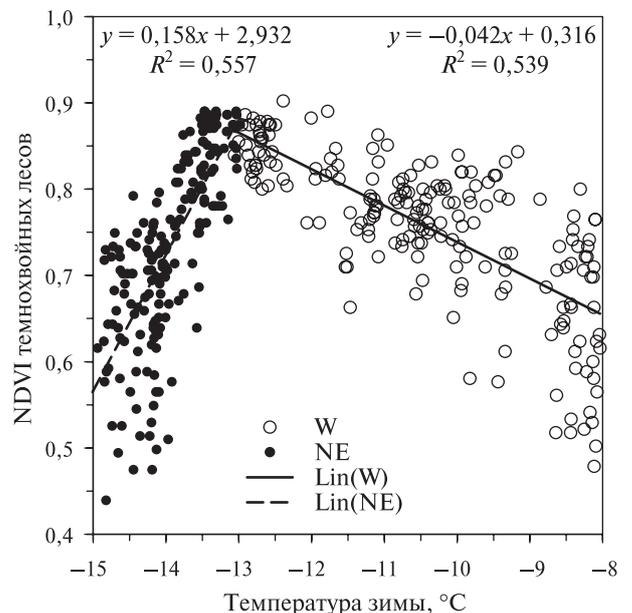
Расчёты проводились с помощью программы «Аналитическая ГИС Эко» (Wood, 2009) версии 1.08r, разработанной одним из авторов.

Результаты и их обсуждение

Связь NDVI с зимней температурой показана на рис. 3.

В северо-восточной части региона NDVI темныхвойных лесов возрастает с ростом температуры зимы, а в западной — снижается (см. рис. 3). Дело в том, что общее правило в экологии заключается в существовании экологического оптимума, т. е. таких климатических условий, при которых показатели обилия лесов (такие как запасы стволовой древесины) или фотосинтетической активности (NDVI) максимальны при некоторых климатических условиях, уменьшаясь вдали от оптимума.

Рис. 3. Зависимость NDVI темныхвойных лесов от температуры зимы в западной (выборка W, светлые кружки справа) и северо-восточной (NE, чёрные кружки слева) частях региона



Это следует уже из существования области распространения темныхвойных лесов, которые не растут за границами этой области, а близ границы естественно ждать уменьшения NDVI, что и наблюдается на *рис. 3*. Поэтому, если есть положительная динамика (возрастание NDVI с ростом температуры, как на северо-востоке, где лимитирующим фактором выступают морозы), то должна быть и отрицательная (как на западе, где температура повышена, и лимитирующим фактором на южной границе становится дефицит воды WD, возрастающий с ростом температуры). Границы области распространения определяются критическими условиями: большой континентальностью IC на северо-востоке (при $IC > 42,7$ °C темныхвойные леса в регионе не растут) и дефицитом воды WD на юге, где они не растут при $WD > 251$ мм/год (Шарый и др., 2020). Ясно, что на своей южной границе (западная выборка) темныхвойные леса должны усыхать и гибнуть из-за сухости, формируя тем самым эту границу, как они должны гибнуть и на северо-восточной границе, но здесь — из-за сильных морозов. Мы разделили всю выборку на два подмножества, отвечающих восходящей и нисходящей ветвям зависимости NDVI от температуры, поскольку связи с ведущими климатическими факторами в них должны различаться. Ясно, например, что связь с зимней температурой будет положительна на северо-востоке и отрицательна на западе, отвечая известной кривой в форме колокола вокруг экологического оптимума, схематически показанной ломаной линейных трендов на *рис. 3*.

Из всех тематических классов леса в Волжском бассейне наиболее тесно был связан с климатом NDVI темныхвойных лесов (Шарый и др., 2020). Для их северо-восточной выборки NE находим следующее уравнение множественной регрессии:

$$\text{NDVI}_{\text{NE}} = 0,1411T_{\text{win}} - 0,09825T_{\text{jul}} - 0,004982P_{\text{cold}} + 0,00002756\text{IDM} + 5,905; \\ R^2 = 0,702, P < 10^{-6}. \quad (1)$$

Здесь T_{win} — средняя температура зимы; P_{cold} — сумма осадков холодного периода; T_{jul} — максимальная (дневная) температура июля; IDM — индекс Де Мартона. Эта модель объясняет 70 % дисперсии NDVI. Главный фактор среды — зимняя температура, связь с которой в NE положительна (в согласии с *рис. 3*). Негативное влияние зимних морозов на летнее NDVI темныхвойных пород может быть обусловлено как влиянием морозов на них, так и эффектами зимней засухи (Шарый и др., 2020). Этот эффект в NE усиливается тем, что здесь морозы особенно сильны. Отметим, что, хотя самый холодный месяц в NE — это январь, основную роль в T_{win} играет температура февраля T_{feb} : замена T_{win} на T_{feb} в модели (1) не меняет R^2 с точностью до трёх значащих цифр.

Связь с максимальной температурой июля, самого жаркого месяца года, также отрицательна, что указывает на негативное влияние июльского тепла на фотосинтетическую активность темныхвойных пород. Третий предиктор — сумма осадков холодного периода (с ноября по март), связь с которой отрицательна. Увеличенные осадки P_{cold} могут усиливать эффекты зимней засухи (Вальтер, 1982), при которой корни елей ещё скованы морозом, но усиливающаяся транспирация приводит к обезвоживанию ветвей елей, что позднее, летом, приводит к уменьшению NDVI. Положительная связь с индексом Де Мартона IDM отвечает позитивному влиянию среднегодовых осадков при сравнительно низких среднегодовых температурах.

Если в северо-восточной части региона (в точках выборки NE) средняя температура зимы составляла $-13,9$ °C, то в западной его части она выше и равна $-10,4$ °C. Из-за меньшего влияния морозов как главного климатического фактора здесь можно ожидать менее тесной связи с климатом. Для западной выборки W находим следующее уравнение множественной регрессии:

$$\text{NDVI}_{\text{W}} = -0,06086T_{\text{feb}} - 0,0005384Z + 0,001959P_{\text{win}} + 0,01119T_{\text{sum}} - 0,1988; \\ R^2 = 0,594, P < 10^{-6}. \quad (2)$$

Здесь T_{feb} — температура февраля; Z — высота земной поверхности; P_{win} — осадки зимы; T_{sum} — температура лета. Модель (2) объясняет 59 % дисперсии NDVI — действительно меньше, чем (1). Связь NDVI с температурой февраля в западной части региона отрицательна,

в противоположность модели (1). Это значит, что с возрастанием температуры февраля NDVI темнохвойных лесов на западе снижается. При температурах, близких к наибольшим на северо-востоке региона, NDVI лесов на западе имеют максимальные значения (см. *рис. 3*), т. е. леса находятся вблизи экологического оптимума по T_{feb} .

Связь со вторым фактором среды, высотой Z , отрицательна. Индекс NDVI увеличивается в более низких по рельефу положениях (в долинах и т.п.), которым нередко отвечают «убежища», характеризующиеся увеличенным содержанием влаги в почвах (Hoylman et al., 2019). Вопрос о влиянии рельефа требует специальных исследований с более высоким разрешением (см. работы (Hoylman et al., 2019; Hwang et al., 2011)). Третий предиктор — сумма осадков зимы. Связь с ним в модели (2) положительная в противоположность модели (1) для северо-восточной части региона. По-видимому, в более тёплых условиях запада эффекты зимней засухи уже не столь существенны, и благоприятное влияние зимних осадков на темнохвойные породы преобладает над эффектами зимней засухи, наиболее заметными вблизи северной (в горах — верхней) границы их произрастания (Вальтер, 1982). Четвёртый предиктор есть температура лета. Связь NDVI с ней в модели (2) положительная в противоположность модели (1). По-видимому, в более тёплых условиях западной части региона, описываемой моделью (2), темнохвойные породы меньше повреждаются морозами и зимней засухой и в результате лучше переносят летнюю жару. Этому способствует и то, что наибольшее количество осадков выпадает летом (см. *рис. 2*).

Сравнение моделей (1) и (2) показывает, что в северо-восточной части региона наиболее сильное воздействие на NDVI темнохвойных пород оказывает температура зимы, особенно февраля. Положительный знак связи NDVI с температурой зимы или февраля на северо-востоке региона указывает на возможное влияние зимней засухи на темнохвойные леса. Найденная на северо-востоке отрицательная связь с осадками холодного периода потенциально усиливает влияние зимней засухи. Обратная ситуация наблюдается на более тёплом зиме западе региона, где связь с температурой февраля отрицательна, а связь с зимними осадками положительна, то и другое в противоположность северо-востоку региона. Здесь, в западной части региона, возрастание зимней температуры в среднем на $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ делает эффекты зимней засухи более слабыми, поэтому зимние морозы позитивно влияют на NDVI темнохвойных пород вследствие, по-видимому, закалки деревьев в условиях, которые не оказываются критическими. Зимние осадки на западе региона, напротив, позитивно влияют на NDVI темнохвойных пород, защищая корни от вымерзания в условиях сравнительно слабой зимней засухи. На верхней границе елей в горных регионах отмечалось особенно сильное влияние зимней засухи, приводящее в конечном счёте к их исчезновению выше по склонам (Вальтер, 1982). Отметим, что, хотя зимняя температура играет при этом главную роль, климатические факторы действуют совместно и также важны осадки зимы. В более холодной северо-восточной части региона ослабленные темнохвойные породы оказывались также более чувствительными к летней температуре, связь NDVI с которой становилась отрицательной, в отличие от положительной связи на западе региона.

Эти явления вызывают существенно нелинейную связь NDVI с температурой зимы для всего изучаемого региона, как отмечено нами ранее (Шарый и др., 2020), что также видно (для обеих выборок) на *рис. 3*.

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Вальтер Г. Общая геоботаника: пер. с нем.; пер. А. Г. Еленевского. М.: Мир, 1982. 264 с.
3. Грибова С. А., Исаченко Т. И., Лавренко Е. М. Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 430 с.
4. Шарый П. А., Пинский Д. Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1344–1356. DOI: 10.7868/S0032180X13090104.

5. Шарый П. А., Шарая Л. С., Иванова А. В., Костина Н. В., Розенберг Г. С. Сравнительный анализ видо-вого богатства жизненных форм сосудистых растений в Среднем Поволжье // Сибирский экологич. журн. 2019. № 4. С. 383–396. DOI: 10.15372/SEJ20190402.
6. Шарый П. А., Шарая Л. С., Сидякина Л. В. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 154–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
7. Швиденко А. З. Глобальные изменения и Российская лесная таксация // Лесная таксация и лесо-устройство. 2012. № 1(47). С. 52–75.
8. Fisher J. I., Mustard J. F., Vadeboncoeur M. A. Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 100. P. 265–279. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.022>.
9. Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Intern. J. Climatology. 2005. V. 25. P. 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>.
10. Hoyleman Z. H., Jencso K. G., Hu J., Holden Z. A., Allred B., Dobrowski S., Robinson N., Martin J. T., Affleck D., Seielstad C. The topographic signature of ecosystem climate sensitivity in the western United States // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 14508–14520. doi.org/10.1029/2019GL085546.
11. Hwang T., Song C., Vose J. M., Band L. E. Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index // Landscape Ecology. 2011. V. 26. P. 541–556. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9580-8>.
12. Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H. Vegetation responses to climate change in the Alps — Modeling studies // A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change / eds. Cebon P., Dahinden U., Davies H., Imboden D., Jaeger C. Boston: MIT Press, 1998. Ch. 6. P. 309–350.
13. Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to Linear Regression Analysis. N. Y.: John Wiley and Sons, 1982. 504 p.
14. Moser D., Dullinger S., Englisch T., Niklfeld H., Plutzer C., Sauberer N., Zechmeister H. G., Grabherr G. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps // J. Biogeography. 2005. V. 32. P. 1117–1127. doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01265.x.
15. Richerson P. J., Lum K.-L. Patterns of plant species diversity in California: relation to weather and topography // The American Naturalist. 1980. V. 116. P. 504–536.
16. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products: Technical Report JPL D-31639. Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Lab., 2005. 143 p.
17. Wood J. Overview of Software Packages Used in Geomorphometry // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / eds. Hengl T., Reuter H. I. Ser. Developments in Soil Science. Amsterdam, etc.: Elsevier, 2009. V. 33. Ch. 10. P. 257–267. [doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00010-X).
18. Zhou L., Tucker C. J., Kaufmann R. K., Slayback D., Shabanov N. V., Myneni R. B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 20069–20083. <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>.

Dark conifer forests NDVI as a function of climate in the Volga basin

P. A. Shary¹, L. S. Sharaya²

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS
Pushchino 142290, Moscow Region, Russia
E-mail: p_shary@mail.ru

² Institute of Volga Basin Ecology RAS, Togliatti 445003, Russia
E-mail: l_sharaya@mail.ru

Vegetation index NDVI of dark-conifer forests for summer of 2005 is statistically compared with climate in the Volga basin. We separate two portions of the region that are represented by two samples each of 200 points (plots 1 km²): north-eastern (NE) and western (W) ones. Average winter temperature in W is 3.5 degrees greater than in NE. Two models of multiple regression are constructed that link NDVI with climate: for NE and for W. The relation of NDVI to winter or February temperature is positive in NE, but negative in W. The link of NDVI with precipitation in the cold period (November–March) is negative in NE and positive in W. We suggest that such non-linear behavior of dark-conifer forest NDVI for the whole region may be explained by both frost damages and known effects of winter

drought. This was additionally strengthened by the influence of precipitation. Winter drought consists in that, at the end of winter, when roots are still frozen increasing transpiration results in water loss of branches and this leads to diminished NDVI later in summer.

Keywords: dark conifer forests, climate, winter drought, multiple regression

Accepted: 26.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-178-185

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using satellite data), Moscow: IKI, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Walter H., *Allgemeine Geobotanik*, Stuttgart: Eugen Ulmer, 1979, 260 p.
3. Gribova S.A., Isachenko T.I., Lavrenko E.M., *Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR* (Vegetation of the European Part of the USSR), Leningrad: Nauka, 1980, 430 p. (in Russian).
4. Shary P.A., Pinskiy D.L., Statistical evaluation of the relationships between spatial variability in the organic carbon content in gray forest soils, soil density, concentrations of heavy metals, and topography, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 11, pp. 1076–1087, DOI: 10.7868/S0032180X13090104.
5. Shary P.A., Ivanova A.V., Sharaya L.S., Kostina N.V., Rozenberg G.S., Comparative analysis of the species richness of life forms of vascular plants in the Middle Volga, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, pp. 310–320, DOI: 10.15372/SEJ20190402.
6. Shary P.A., Sharaya L.S., Sidiyakina L.V., The relation of forest NDVI to climate in Volga basin, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 154–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
7. Shvidenko A.Z., Global changes and forest taxation, *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, 2012, No. 1(47), pp. 52–75 (in Russian).
8. Fisher J.I., Mustard J.F., Vadeboncoeur M.A., Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 100, pp. 265–279, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.022>.
9. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A., Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Intern. J. Climatology*, 2005, Vol. 25, pp. 1965–1978, <https://doi.org/10.1002/joc.1276>.
10. Hoylman Z.H., Jencso K.G., Hu J., Holden Z.A., Allred B., Dobrowski S., Robinson N., Martin J.T., Affleck D., Seielstad C., The topographic signature of ecosystem climate sensitivity in the western United States, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, pp. 14508–14520, <https://doi.org/10.1029/2019GL085546>.
11. Hwang T., Song C., Vose J.M., Band L.E., Topography-mediated controls on local vegetation phenology estimated from MODIS vegetation index, *Landscape Ecology*, 2011, Vol. 26, pp. 541–556, <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9580-8>.
12. Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H., Vegetation responses to climate change in the Alps — Modeling studies, In: *A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change*, Cebon P., Dahinden U., Davies H., Imboden D., Jaeger C. (eds.), Boston: MIT Press, 1998, Chapter 6, pp. 309–350.
13. Montgomery D.C., Peck E.A., *Introduction to Linear Regression Analysis*, New York: John Wiley and Sons, 1982, 504 p.
14. Moser D., Dullinger S., Englisch T., Niklfeld H., Plutzer C., Sauberer N., Zechmeister H.G., Grabherr G., Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps, *J. Biogeography*, 2005, Vol. 32, pp. 1117–1127, doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01265.x.
15. Richerson P.J., Lum K.-L., Patterns of plant species diversity in California: relation to weather and topography, *The American Naturalist*, 1980, Vol. 116, pp. 504–536.
16. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S., *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPL D-31639, Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Lab., 2005, 143 p.
17. Wood J., Overview of software packages used in geomorphometry, In: *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, Hengl T., Reuter H.I. (eds.), Ser. Developments in Soil Science, Vol. 33, Amsterdam, etc.: Elsevier, 2009, Chapter 10, pp. 257–267, [doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00010-X).
18. Zhou L., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Slayback D., Shabanov N.V., Myneni R.B., Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, pp. 20069–20083, <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>.