

NDVI светлохвойных лесов как функция климата в Волжском бассейне

П. А. Шарый^{1,2}, О. В. Пикуленко², Л. С. Шарая³, В. И. Степанова²

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

² *Институт биологического приборостроения РАН
Пушино, 142290, Московская обл., Россия
E-mail: agroecology@inbox.ru*

³ *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
им. Д. Н. Прянишникова, Москва, 127550, Россия
E-mail: l_sharaya@mail.ru*

Вегетационный индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) светлохвойных лесов статистически сравнивается с характеристиками климата в Волжском бассейне. NDVI этих лесов немонотонно зависит от температуры и осадков, что выделяет две области, для которых знаки связей NDVI с климатом противоположны. Изменение характера связей с положительной на отрицательную у светлохвойных лесов в бассейне происходит при температуре зимы $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. По этой причине в области исследования выделены две выборки по 200 точек каждая (площадки 1 км^2), которые отвечают указанным двум частям с разными знаками связей: северо-восточная и западная. Связь NDVI светлохвойных лесов с температурой зимы в первой выборке положительна, во второй — отрицательна. Для северо-восточной выборки температура зимы на $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем для западной, а сумма годовых осадков больше на 40 мм . В соответствии с этим среднее значение NDVI светлохвойных лесов для северо-восточной области составляет $0,732$, для западной — $0,760$. Построены две модели множественной регрессии для северо-восточной и западной области, связывающие NDVI с климатом. Самым влиятельным фактором для областей является расстояние на северо-восток, с ростом которого средняя температура зимы уменьшается на $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а сумма годовых осадков возрастает. Соответственно, для западной части связь NDVI с расстоянием на северо-восток положительна, для северо-восточной — отрицательна. Для NDVI лесов в северо-восточной части характерны более тесные связи с осадками холодного периода. При сравнении западной и северо-восточной частей бассейна р. Волги выявлено возрастание влияния климата на NDVI светлохвойных лесов в более холодной и увлажнённой северо-восточной части региона.

Ключевые слова: Волжский бассейн, светлохвойные леса, характеристики климата, множественная регрессия

Одобрена к печати: 23.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-210-219

Введение

Светлохвойные (с преобладанием сосны) леса в европейской части Российской Федерации встречаются от северотаёжной полосы на севере до лесостепи и степи на юге. Средне- и южнотаёжные сосновые леса, местами с елью (*Picea abies*, *P. obovata*), зеленомошные и лишайниковые кустарничковые располагаются как в западной, так и в восточной части Волжского бассейна. На юге в западной части встречаются также лесостепные сосновые и широколиственно-сосновые леса разнотравно-злаковые остепнённые, на севере — сосновые долгомошные и сфагновые (Грибова, Исаченко, 1979). Светлохвойные леса легко загораются, но после пожара сравнительно быстро вырастают. В отличие от них темнохвойные (с преобладанием ели) леса растут медленно, но, вырастая, затеняют сосняки, и те с течением времени гибнут из-за недостатка света. Этому способствует то, что сосна — одна из наиболее светолюбивых древесных пород (Рысин, Савельева, 2008) и относится к породам-пионерам, часто успевающим занять «чужие» местообитания, но в дальнейшем уступающим свои позиции

елям (Рысин, 2012). Поэтому пожары, наряду с антропогенным воздействием и климатом, играют важную роль в пространственном распределении типов леса (Грибова и др., 1980). Однако влияние пожаров и антропогенного воздействия трудно оценивать количественно, поэтому есть смысл сосредоточиться на оценке влияния климата. Для темнохвойных лесов Волжского бассейна это сделано нами ранее (Шарый, Шарая, 2022), здесь рассмотрим светлохвойные леса.

Общее состояние лесов характеризуется их фотосинтетической активностью, которая оценивается по количеству хлорофилла, связанному с индексом NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), основанным на отражении в ближнем инфракрасном (NIR — *англ.* near infrared) и красном (*англ.* red) участках спектра: $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$. Начиная с общих принципов (Tucker, Sellers, 1986), эти вопросы изучались во многих работах, в которых вначале анализировали зависимость NDVI от времени при низком разрешении 8 км (Zhou et al., 2001), затем в связи с усовершенствованием спутниковых данных перешли к более высокому разрешению 250 и 30 м с оценкой таких параметров, как срединные дни весны и осени и, что важно, — их зависимости от климата и рельефа (Fisher et al., 2006). Например, в США был подтверждён «закон Хопкинса» о том, что дата начала весны увеличивается на 1 сут с возрастанием высоты местности на 30 м (Hwang et al., 2011). Для запада США с использованием дистанционных данных, рельефа и описывающих гидрологический баланс характеристик погоды за каждый год из 30 лет с разрешением 30 м была оценена чувствительность лесных экосистем к глобальному потеплению (Hoyleman et al., 2019). Это улучшило бы оценки изменения лесов в связи с глобальным потеплением, чему, однако, препятствовали существенные различия таких зависимостей (Шарый и др., 2020) в лесах разного типа (еловые, сосновые, различные типы лиственных). Вопрос о связи NDVI с климатом для разных типов леса стал, таким образом, центральным. Для темнохвойных лесов Волжского бассейна он отражён в публикации (Шарый, Шарая, 2022), в настоящей работе он исследуется для светлохвойных лесов.

Временной ход NIR и RED позволяет выделять тематические классы наземного покрова; в России с 2000 г. ежегодно составляются карты (матрицы) этих классов разрешения 250 м. Это позволяет идентифицировать, например, темнохвойные и светлохвойные леса, отличая соответствующие им пиксели от других классов наземного покрова (Барталев и др., 2016).

Влияние глобального потепления на леса оценивается к концу столетия как весьма тревожное (Швиденко, 2012), однако зависимость NDVI от климата изучена недостаточно. 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 NDVI лета 2005 г. для каждого типа леса (темнохвойные, светлохвойные, смешанные и лиственные) нелинейно менялся с климатом. Для светлохвойных лесов на северо-востоке региона наблюдается существенное уменьшение NDVI из-за возрастания здесь индекса континентальности IC (*англ.* Index of Continentality) климата, так что при $IC > 34,2$ °C светлохвойные леса в регионе не растут. В направлении на юго-восток важнее гидротермические факторы: при дефиците воды WD (*англ.* Water Deficit) больше 282 мм/год светлохвойные леса тоже не растут. Было также показано, что в Волжском бассейне летнее NDVI 2005 г. более тесно связано со средней температурой зимних месяцев, чем летних (Шарый и др., 2020). С помощью кубических трендов в работе (Шарый и др., 2020) изучалась также теснота связи NDVI для разных типов леса с отдельными характеристиками климата, взятыми порознь. Однако NDVI лесов связан одновременно с различными климатическими факторами. Для анализа таких связей используют методы множественной регрессии (Шарый и др., 2019, 2020; Moser et al., 2005; Richerson, Lum, 1980). Цель настоящей работы — анализ влияния ряда климатических факторов на NDVI светлохвойных лесов Волжского бассейна с помощью множественной регрессии.

Материалы и методы

Матрица наземного покрова России разрешения 1035 м создана на основе спутниковых данных SPOT-Vegetation (*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 наземного покрова: светлохвойные леса. Предгорье Урала и западные склоны Урала исключались из анализа. Исследуемая территория представляла прямоугольную область размером 1145 км по долготе и 700 км по широте. Значения NDVI для лета 2005 г. получены и скорректированы в ИКИ РАН по данным спутниковой системы Terra-MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) разрешения 250 м, но они преобразованы нами к разрешению 1 км для сопоставимости с климатическими данными. Для светлохвойных лесов мы сформировали векторные точечные данные с соответствующими значениями NDVI. Данные разрешения 1 км об осадках и температуре каждого месяца получены 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 Topography Mission) (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 ПЕТ (*англ.* Potential Evapotranspiration) и испарения АЕТ (*англ.* Actual Evapotranspiration) применены методики, описанные в работе (Шарый и др., 2020). В анализе использовали также дефицит воды $WD = PET - AET$, коэффициент увлажнения $MI = MAP/PET$ (MI — *англ.* Moisture Index; MAP — *англ.* Mean Annual Precipitation, среднегодовая сумма осадков), индекс континентальности IC (амплитуда среднемесячной температуры: $T_{max} - T_{min}$) и индекс Де Мартона (*англ.* Index of De Martonne) $IDM = MAP/(MAT + 10)$ (MAT — *англ.* Mean Annual Temperature, среднегодовая температура). Поскольку MAT может менять знак, в IDM к ней добавляют 10 °С, что делает этот индекс положительным. Измерения мощности снежного покрова редко доступны во многих регионах, поэтому вместо этого показателя используют сумму осадков холодного периода (с ноября по март), называемую индексом снежности (Шарый и др., 2020).

При выделении двух географических районов, западного W (от *англ.* western) и северо-восточного NE (от *англ.* northeastern), использовали зимнюю температуру, с которой NDVI светлохвойных лесов в изучаемом регионе Волжского бассейна связан наиболее тесно. В результате выборки разделились, как показано на *рис. 1*.

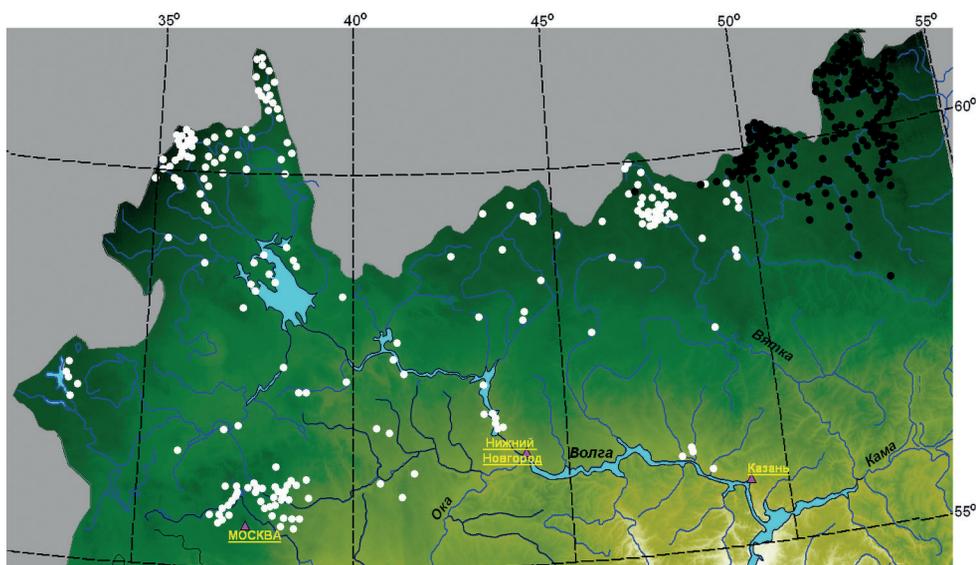
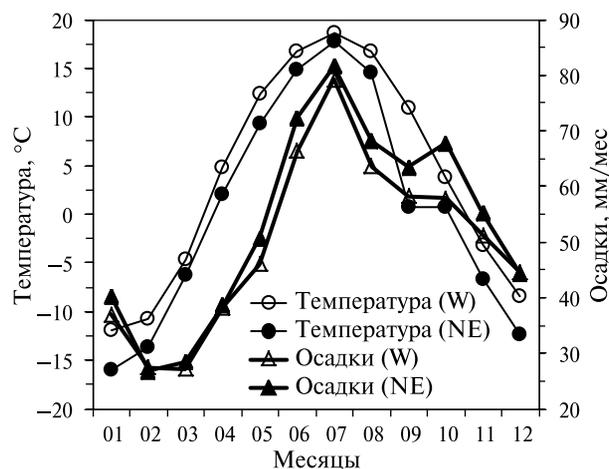


Рис. 1. Расположение точек западной (белые) и северо-восточной (чёрные) выборки на фоне карты высоты (чем светлее, тем высота больше)

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



В западной части бассейна среднее значение NDVI светлохвойных лесов (0,760) заметно выше, чем в восточной (0,732). Среднегодовая температура на западе (+3,7 °C) на 2,6 °C выше, чем на северо-востоке. Наибольшее различие средних значений температуры в зимний сезон — 4,3 °C. На северо-востоке сумма среднегодовых осадков (638 мм) на 40 мм больше, чем на западе. На западе светлохвойные леса встречаются на высотах от 63 м, на северо-востоке минимальные высоты — 114 м.

Зависимость летнего NDVI от климата обычно была немонотонной (Шарый и др., 2020), часто меняя возрастание на убывание в северо-восточной и западной части региона исследования — Волжского бассейна. В северо-восточной части региона летний NDVI светлохвойных лесов возрастал с увеличением средней температуры зимы, а в западной — убывал (рис. 3). В западной части региона NDVI светлохвойных лесов уменьшался с ростом дефицита воды WD, а в северо-восточной — возрастал (Шарый и др., 2020). 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 превышало 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.

Среднемесячные температура и осадки (средние за 50 лет), усреднённые также по точкам выборок 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 4,1 °C). Зимние осадки не демонстрируют таких различий.

В данной 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 Factor) (Montgomery, Peck, 1982) по критерию $\max\{VIF_i\} < 5,15$ (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», версия 1.08г, разработанной одним из авторов.

Результаты и их обсуждение

Связь NDVI с зимней температурой показана на *рис. 3*.

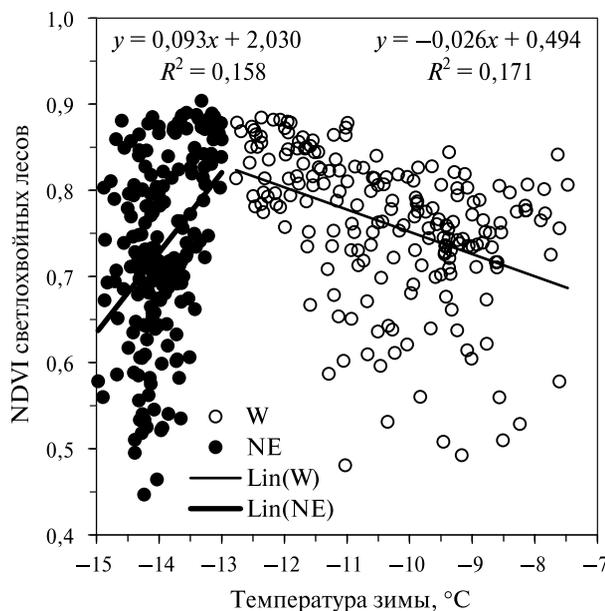


Рис. 3. Зависимость NDVI светлохвойных лесов от температуры зимы в западной (выборка W, точки справа) и северо-восточной (NE) части региона

В северо-восточной части региона NDVI светлохвойных лесов возрастает с увеличением температуры зимы, а в западной — снижается (см. *рис. 3*). Общим правилом в экологии считается существование экологического оптимума, т. е. таких климатических условий, при которых показатели обилия лесов (например, запасы стволовой древесины) или фотосинтетической активности (NDVI) максимальны при некоторых климатических условиях, уменьшаясь вдали от оптимума. Это следует уже из существования области распространения темнохвойных лесов, которые не растут за границами данной области, а близ границы естественно ожидать 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 увеличением температуры). Границы области распространения отчасти связаны с критическими условиями: большой континентальностью IC на северо-востоке (при $IC > 34,2$ °C светлохвойные леса в регионе не растут) и дефицитом воды WD на юге (где они не растут при $WD > 282$ мм/год) (Шарый и др., 2020). Ясно, что на своей южной границе (западная выборка) светлохвойные 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 зимы, с которой связь наиболее тесна, 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 линией линейных трендов на *рис. 3*.

Поскольку связи NDVI с характеристиками климата для каждой из выборок близки к линейным, то можно использовать коэффициенты корреляции Пирсона для оценки тесноты этих связей. Результаты представлены в *таблице*.

Коэффициенты корреляции парных связей NDVI двух выборок светлохвойных лесов (западной W и северо-восточной NE) с климатическими факторами

Климатический фактор		W	NE	Климатический фактор	W	NE
Среднемесячная температура	Январь	-0,402	0,335	Среднегодовая температура	-0,140	0,353
	Февраль	-0,420	0,426	Среднегодовая сумма осадков	-0,200	-0,663
	Март	-0,339	0,465	Вариабельность температуры	0,426	-0,603
	Апрель	*	0,314	Коэффициент вариации осадков	-0,216	0,580
	Май	*	0,317	Средняя температура зимы	-0,413	0,397
	Июнь	0,189	0,248	Средняя температура весны	*	0,358
	Июль	0,268	0,169	Средняя температура лета	0,199	0,212
	Август	0,140	0,195	Средняя температура осени	-0,174	0,446
	Сентябрь	*	0,407	Расстояние на северо-восток	0,727	-0,823
	Октябрь	-0,219	0,393	Расстояние на север	0,490	-0,583
	Ноябрь	-0,361	0,458	Расстояние на восток	0,581	0,397
	Декабрь	-0,399	0,425	Расстояние на юго-восток	0,184	-0,225
Среднемесячные осадки	Январь	*	-0,721	Испарение (АЕТ)	-0,212	*
	Февраль	*	-0,592	Испаряемость (РЕТ)	0,163	0,480
	Март	*	-0,567	Дефицит воды (WD)	*	0,305
	Апрель	*	-0,518	Индекс Де Мартона (IDM)	*	-0,492
	Май	-0,281	-0,264	Индекс континентальности (IC)	0,459	-0,407
	Июнь	*	*	Сумма значений отрицательной температуры	-0,404	0,424
	Июль	-0,291	0,438	Индекс снежности	*	-0,646
	Август	-0,217	-0,642	Сумма осадков зимы	*	-0,642
	Сентябрь	*	*	Сумма осадков весны	-0,223	-0,531
	Октябрь	*	-0,637	Сумма осадков лета	-0,243	0,355
	Ноябрь	-0,149	-0,647	Сумма осадков осени	*	-0,622
	Декабрь	*	-0,519	Сумма осадков тёплого периода	-0,208	-0,348

* Связь незначима при $P < 0,05$. Наиболее тесные связи обозначены полужирным начертанием.

Примечательно, что связи NDVI светлохвойных лесов с температурой зимних месяцев отрицательны в более тёплой западной части региона и положительны в северо-восточной. Это согласуется с результатами, полученными другими авторами (Adulkongkaew et al., 2020; Weng et al., 2004; Zhang X.X. et al., 2010; Zhang Y. et al., 2012), которые констатировали выраженное негативное влияние роста температуры на значения NDVI разных типов растительности. Однако в относительно холодной северо-восточной части бассейна такая закономерность для NDVI не наблюдается: напротив, знаки связей с температурой сезонов были положительными.

Для северо-восточной выборки NE светлохвойных лесов находим следующее уравнение множественной регрессии:

$$\left. \begin{aligned} \text{NDVI}_{\text{NE}} &= -9,942 \cdot 10^{-7} \frac{X+Y}{\sqrt{2}} - 0,009431P_{\text{win}} - 0,01185P_{07} + 0,008509P_{\text{spr}} + 2,742; \\ R^2 &= 0,732, \quad P < 10^{-6}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $(X+Y)/\sqrt{2}$ — расстояние на северо-восток; P_{win} — сумма осадков зимы; P_{07} — осадки июля; P_{spr} — сумма осадков весны. Эта модель объясняет 73 % дисперсии NDVI. В модели главным предиктором становится расстояние на северо-восток $(X+Y)/\sqrt{2}$, но оно отрицательно связано с температурой зимы T_{win} ($R^2 = 0,187$), т. е. на северо-востоке отрицательная

связь NDVI с $(X + Y)/\sqrt{2}$ вызвана отчасти положительной связью NDVI с T_{win} в согласии с рис. 3. Негативное влияние зимних морозов на летнее NDVI светлохвойных пород может быть обусловлено как влиянием на них морозов, так и эффектами зимней засухи (Шарый и др., 2020). Этот эффект в северо-восточной части региона усиливается тем, что здесь морозы особенно сильны. Связь NDVI с осадками зимы P_{win} и июля P_{07} отрицательна, т. е. с их возрастанием NDVI уменьшается. Однако NDVI увеличивается с ростом осадков весны P_{spr} .

Если в северо-восточной части региона (в точках выборки NE) средняя температура зимы составляла $-14,0$ °С, то в западной его части она выше и равна $-10,3$ °С. 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:

$$\left. \begin{aligned} \text{NDVI}_W &= 2,760 \cdot 10^{-7} \frac{X+Y}{\sqrt{2}} + 0,003281P_{spr} - 0,0002520Z + 0,01439T_{07} + 0,06435; \\ R^2 &= 0,570, \quad P < 10^{-6}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь Z — высота земной поверхности; T_{07} — температура июля. Модель (2) объясняет 57 % дисперсии NDVI — действительно меньше, чем модель (1). Связь NDVI с расстоянием на северо-восток в западной части региона положительна в противоположность модели (1). Это значит, что с возрастанием средней температуры зимы T_{win} NDVI на западе снижается. При температуре, близкой к наибольшей на северо-востоке региона, на западе NDVI имеет максимальные значения (см. рис. 3), т. е. леса находятся вблизи экологического оптимума по T_{win} . Связи NDVI с осадками весны P_{spr} и температурой июля T_{07} положительны, а с высотой Z связь отрицательна. Последнее означает, что 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).

Сравнение моделей (1) и (2) обнаруживает противоположные знаки связи с главным в обоих случаях предиктором — расстоянием на северо-восток $(X + Y)/\sqrt{2}$. Наиболее тесная (отрицательная) связь между $(X + Y)/\sqrt{2}$ и климатическими факторами наблюдается с зимней температурой ($R^2 = 0,479$ для W и $R^2 = 0,187$ для NE), поэтому связь NDVI с расстоянием на северо-восток $(X + Y)/\sqrt{2}$ говорит скорее о том, что NDVI на западе убывает с ростом зимней температуры, а на северо-востоке — возрастает, как это непосредственно видно из рис. 3.

Отрицательные связи NDVI светлохвойных и темнохвойных лесов с температурой сезонов свидетельствуют о возможном снижении фотосинтетической активности при глобальном потеплении на западе бассейна. На северо-востоке изученной территории бассейна, где связи с сезонной температурой положительны, напротив, возможен рост NDVI при потеплении.

Заключение

Приведённый выше анализ показывает, что связи NDVI светлохвойных лесов с большинством климатических факторов статистически значимы и указывают на существенные различия между северо-восточной и западной частью региона (Волжского бассейна). Ярче всего это проявляется в противоположных знаках связи NDVI с температурой зимних месяцев для этих двух регионов: отрицательной в западной части и положительной — в северо-восточной. В то же время связи NDVI с осадками являются наиболее тесными на северо-востоке региона, где они также отрицательны в зимний период, достигая $r = -0,721$ ($P < 10^{-6}$) в январе, наиболее холодном месяце года. При этом в более тёплой западной части региона эта связь слабая и незначима в любом из зимних месяцев. В то же время вариабельность осадков существенно влияет на NDVI в северо-восточной части региона ($r = 0,580$; $P < 10^{-6}$), свидетельствуя о том, что светлохвойные леса адаптируются к существующему расписанию осадков во времени, которое поэтому важно для них. Более тесные связи NDVI с осадками выразились и в том, что осадки доминируют в финальных уравнениях множественной регрессии.

Литература

1. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О. и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Грибова С. А., Исаченко Т. И.* Сосновые леса южной части таежной и широколиственнолесной областей европейской части СССР: география и картография / Геоботан. картографирование. 1979. С. 38–49. <https://doi.org/10.31111/geobotmap/1979.38>.
3. *Грибова С. А., Исаченко Т. И., Лавренко Е. М.* Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 430 с.
4. *Рысин Л. П.* Хвойные леса России // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 1106–1109.
5. *Рысин Л. П., Савельева Л. И.* Сосновые леса России. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2008. 289 с.
6. *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.
7. *Шарый П. А., Шарая Л. С.* NDVI темнохвойных лесов как функция климата в Волжском бассейне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 178–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-178-185.
8. *Шарый П. А., Шарая Л. С., Иванова А. В. и др.* Сравнительный анализ видового богатства жизненных форм сосудистых растений в Среднем Поволжье // Сибирский эколог. журн. 2019. № 4. С. 383–396. DOI: 10.15372/SEJ20190402.
9. *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.
10. *Швиденко А. З.* Глобальные изменения и Российская лесная таксация // Лесная таксация и лесостроительство. 2012. Вып. 1(47). С. 52–75.
11. *Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoehirunyingyos S., Singhirunnusorn W.* Effect of land cover composition and building configuration on land surface temperature in an urban-sprawl city, case study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand // Heliyon. 2020. V. 6. Article e04485. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04485.
12. *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. DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.022.
13. *Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L. et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Intern. J. Climatology. 2005. V. 25. P. 1965–1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
14. *Hoylman Z. H., Jencso K. G., Hu J. et al.* The topographic signature of ecosystem climate sensitivity in the western United States // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 14508–14520. DOI: 10.1029/2019GL085546.
15. *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. DOI: 10.1007/s10980-011-9580-8.
16. *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.
17. *Montgomery D. C., Peck E. A.* Introduction to Linear Regression Analysis. N. Y.: John Wiley and Sons, 1982. 504 p.
18. *Moser D., Dullinger S., Englisch T. et al.* Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps // J. Biogeography. 2005. V. 32. P. 1117–1127. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2005.01265.x.
19. *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.
20. *Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E. et al.* An assessment of the SRTM topographic products: Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Lab., 2005. 143 p.
21. *Tucker C. J., Sellers P. J.* Satellite remote sensing of primary production // Intern. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. P. 1395–1416.
22. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
23. *Zhang X. X., Wu P. F., Chen B.* Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing City of China // Procedia Environmental Sciences. 2010. V. 2. P. 1438–1450. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.157.

24. Zhang Y., Yiyun Y., Qing D., Jiang P. Study on urban heat island effect based on Normalized Difference Vegetated Index: A case study of Wuhan City // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. V. 13. P. 574–581. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.048.
25. Zhou L., Tucker C.J., Kaufmann R.K. et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106(D17). P. 20069–20083.

Light conifer forest NDVI as a function of climate in the Volga basin

P. A. Shary^{1,2}, O. V. Pikulenko², L. S. Sharaya³, V. I. Stepanova²

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 Biological Instrumentation RAS, Pushchino 142290, Moscow Region, Russia
E-mail: agroecology@inbox.ru*

³ *All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov
Moscow 127550, Russia
E-mail: l_sharaya@mail.ru*

The vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) of light coniferous forests is statistically compared with the climate characteristics in the Volga basin. The NDVI of these forests depends non-monotonically on temperature and precipitation which allows identifying two areas for which the signs of the relationships between NDVI and climate are opposite. Changes in the nature of connections from positive to negative in light coniferous forests in the basin occur at a winter temperature of $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. For this reason, two samples of 200 points (areas of 1 km^2) each were identified in the study area, which correspond to these two parts with different signs of connections: northeastern and western. The relationship between NDVI of light coniferous forests and winter temperature is positive in the first, and negative in the second. For the northeastern sample, winter temperatures are $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower than in the western sample, and the amount of annual precipitation is 40 mm higher. In accordance with this, the average NDVI value of light coniferous forests for the northeastern region is 0.732, for the western region — 0.760. Two multiple regression models were constructed for the northeastern and western regions, linking NDVI with climate. The most influential factor for the regions is the distance to the northeast, with an increase in which the average winter temperature decreases by $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the amount of annual precipitation increases. Accordingly, for the western part the relationship between NDVI and the distance to the northeast is positive, for the northeastern part it is negative. The NDVI of forests in the northeastern part is characterized by closer relationships with cold-season precipitation. When comparing the western and northeastern parts of the Volga River basin, an increase in the influence of climate on the NDVI of light coniferous forests in the colder and more humid northeastern part of the region was revealed.

Keywords: Volga basin, light conifer forests, climate, multiple regression

Accepted: 23.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-210-219

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O. et al., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Gribova S. A., Isachenko T. I., Pine forests of the southern part of the taiga and iroko-forest regions of the European part of the USSR: geography and cartography, *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 1979, pp. 38–49 (in Russian), <https://doi.org/10.31111/geobotmap/1979.38>.

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. Rysin L. P., Coniferous forests of Russia, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, Vol. 14, No. 1, pp. 1106–1109 (in Russian).
5. Rysin L. P., Savel'eva L. I., *Sosnovye lesa Rossii* (Pine forests of Russia), Moscow: Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008, 289 p. (in Russian).
6. 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: 10.1134/S1064229313090044.
7. Shary P. A., Sharaya L. S., NDVI of dark coniferous forests as a function of climate in the Volga basin, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 178–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-178-185.
8. Shary P. A., Ivanova A. V., Sharaya L. S. et al., 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: 10.1134/S1995425519040103.
9. Shary P. A., Sharaya L. S., Sidiyakina L. V., The relation of forest NDVI to climate in Volga basin, *Sovremennyye 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.
10. Shvidenko A. Z., Global changes and Russian forest inventory, *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, 2012, Issue 1(47), pp. 52–75 (in Russian).
11. Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoenhirunyings S., Singhirunnusorn W., Effect of land cover composition and building configuration on land surface temperature in an urban-sprawl city, case study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand, *Heliyon*, 2020, Vol. 6, Article e04485, DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04485.
12. 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, DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.022.
13. Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L. et al., Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Intern. J. Climatology*, 2005, Vol. 25, pp. 1965–1978, DOI: 10.1002/joc.1276.
14. Hoyleman Z. H., Jencso K. G., Hu J. et al., The topographic signature of ecosystem climate sensitivity in the western United States, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, pp. 14508–14520, DOI: 10.1029/2019GL085546.
15. 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, DOI: 10.1007/s10980-011-9580-8.
16. 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.
17. Montgomery D. C., Peck E. A., *Introduction to Linear Regression Analysis*, New York: John Wiley and Sons, 1982, 504 p.
18. Moser D., Dullinger S., Englisch T. et al., Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps, *J. Biogeography*, 2005, Vol. 32, pp. 1117–1127, DOI: 10.1111/j.1365-2699.2005.01265.x.
19. 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.
20. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E. et al., *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPL D-31639, Pasadena, California: Jet Propulsion Lab., 2005, 143 p.
21. Tucker C. J., Sellers P. J., Satellite remote sensing of primary production, *Intern. J. Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, pp. 1395–1416.
22. Weng Q., Lu D., Schubring J., Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 89, pp. 467–483, DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
23. Zhang X. X., Wu P. F., Chen B., Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing City of China, *Procedia Environmental Sciences*, 2010, Vol. 2, pp. 1438–1450, DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.157.
24. Zhang Y., Yiyun Y., Qing D., Jiang P., Study on urban heat island effect based on Normalized Difference Vegetated Index: A case study of Wuhan City, *Procedia Environmental Sciences*, 2012, Vol. 13, pp. 574–581, DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.048.
25. Zhou L., Tucker C. J., Kaufmann R. K. et al., Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106(D17), pp. 20069–20083.