

## Закономерные изменения вегетационного индекса лиственных лесов в пространстве в Волжском бассейне

П. А. Шарый<sup>1,2</sup>, Л. С. Шарая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
Пушино, Московская обл., 142290, Россия  
E-mail: p\_shary@mail.ru*

<sup>2</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
имени Д. Н. Прянишникова, Москва, 127550, Россия*

В Волжском бассейне изучены связи вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) лиственных лесов с характеристиками климата и рельефа. Характер статистических связей NDVI лиственных лесов, распределённых по бассейну, изменяется при температуре января  $-14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ : в западной части рост температуры января приводит к снижению NDVI, в восточной — к увеличению. Поэтому выборка из 400 площадок площадью  $1\text{ км}^2$  разделена на две части — западную и восточную. Половина площадок лиственных лесов на западной части находится в зоне широколиственных лесов, 67 % площадок восточной части — в более суровых континентальных климатических условиях средне- и южнотаёжных лесов. Лиственные леса заметно отличаются по средним значениям NDVI: в западной части среднее значение индекса составляет 0,818, в восточной — 0,854, такие величины значительно превосходят NDVI темнохвойных и светлохвойных лесов. Индекс NDVI лесов более холодной восточной части по сравнению с западной характеризуется более тесными и только положительными связями со среднемесячной температурой, более тесными отрицательными связями с месячными осадками. Западная и восточная части заметно отличаются значениями среднегодовой ночной и дневной температуры, потенциальной эвапотранспирации, дефицитом воды и высотой. Анализ фотосинтетической активности с помощью множественной регрессии показал, что около 50 % дисперсии NDVI на западе и востоке объясняется температурой холодного периода, для западных лесов является важным снижение осадков в вегетационный период, для восточных — уменьшение осадков февраля перед началом вегетации, несмотря на то, что они самые низкие в году. NDVI западных лесов зависит от наибольшего в году суточного перепада температуры в июне, NDVI восточных больше зависит от положения в рельефе. Так, на западе NDVI снижается с удалением от водоразделов (с увеличением площади сбора), на востоке — с уменьшением высоты на возвышенностях и вне их, что в тенденции тоже связано с ростом площади сбора. В целом восточные лиственные леса находятся больше под влиянием климата и рельефа, а их положительные связи с температурой позволяют предполагать позитивные изменения их фотосинтетической активности при глобальном потеплении, в отличие от лесов западной части бассейна.

**Ключевые слова:** Волжский бассейн, лиственные леса, NDVI, климат, рельеф, множественная регрессия

Одобрена к печати: 10.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-134-144

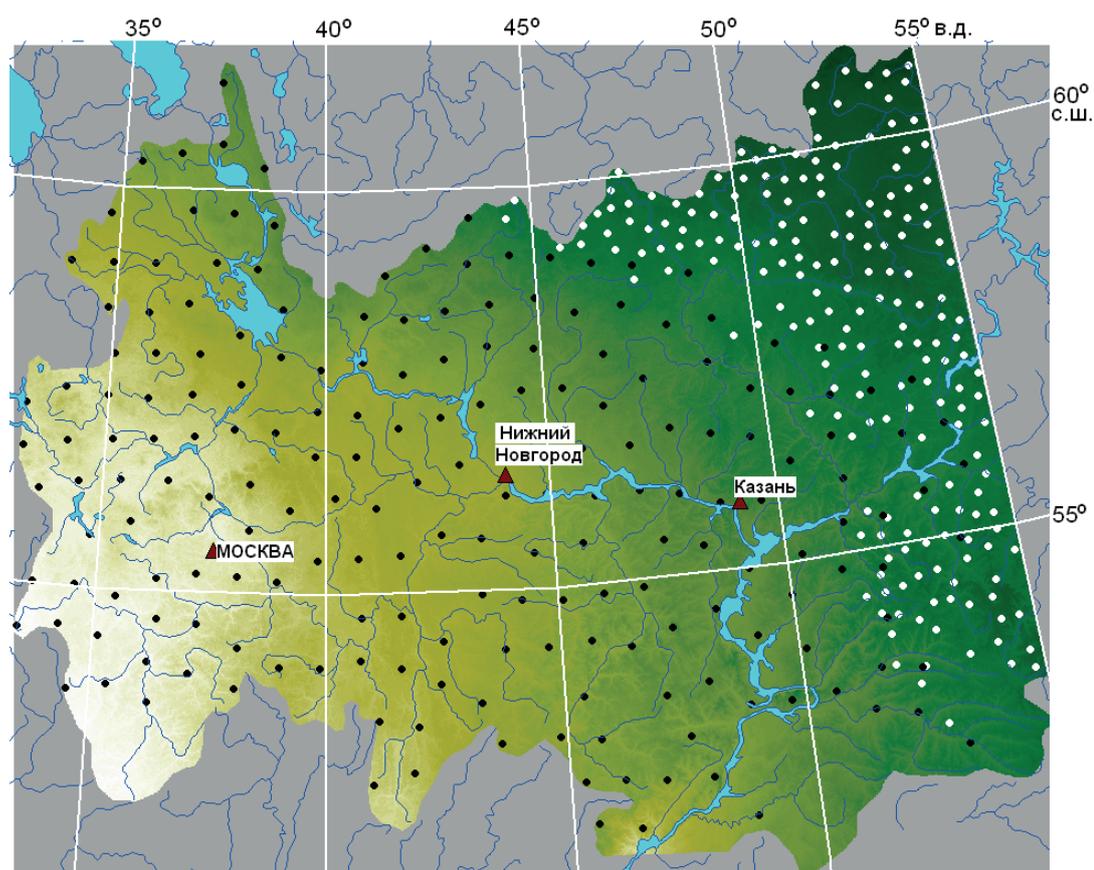
### Введение

Лиственные леса на карте растительного покрова России TerraNorte, полученной по данным сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Барталев и др., 2016), определены тем, что в пологе насаждений не менее 80 % их площади занимают кроны берёзы и осины, а также кроны широколиственных пород, включая дуб, липу, ясень и некоторые другие. Поскольку лиственные леса в Волжском бассейне располагаются по всей территории основного водосбора — от зоны среднетаёжных лесов до зоны луговых степей, то климатические условия, в которых они находятся, сильно различаются: радиационный баланс меняется от  $0,7$  до  $2,1\text{ ГДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ , годовые осадки — от 500 до 870 мм, средняя температура января — от  $-18,8$  до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , июля — от  $8,0$  до  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Голубятников, Денисенко, 2009). Большинство пород умеренного пояса после зимнего покоя начинают жизнедеятельность

при переходе температуры через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , раскрытие почек проявляется при переходе температуры через  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и продолжительном обогреве дерева, фотосинтез происходит при температуре от  $0$  до  $40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  при оптимуме около  $20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Погребняк, 1968). Основной массив площадок лиственных лесов на севере бассейна находится в зонах среднетаёжных и южно-таёжных лесов, в южной части — в зоне широколиственных лесов, которая характеризуется влажным и умеренно влажным с ослабленной континентальностью климатом. Анализ изменения NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) темных хвойных и светлых хвойных лесов в пространстве бассейна под влиянием климата проведён в работах (Шарый, Шарая, 2022; Шарый и др., 2024). Показано, что влиятельными факторами изменения индексов хвойных лесов являются температура и осадки холодного периода, а также расстояние на северо-восток. Знаки зависимостей от этих факторов различаются для западной и восточной части бассейна. Целью настоящего исследования было выявление закономерностей изменения NDVI лиственных лесов в бассейне под влиянием климата и рельефа.

## Материалы и методы

Лиственные леса бассейна были разделены на два географических региона — западный (W) и восточный (E) — по знаку связи с наиболее влиятельной для их пространственного распределения температурой января. Полученные выборки показаны на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Расположение точек западной (чёрные) и восточной (белые) выборок на фоне карты среднемесячной температуры января в бассейне (светлые тона отвечают большей температуре)

В исследовании использовали только один класс наземного покрова — лиственные леса, полученный из матрицы наземного покрова России разрешения  $1035\text{ м}$ , которая 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). Лиственные леса предгорья Урала и его западных склонов исключались из анализа. Значения NDVI для лета 2005 г., скорректированные в ИКИ РАН по данным спутниковой системы Terra-MODIS разрешения 250 м, были преобразованы нами с разрешением 1 км для сопоставимости с климатическими и рельефными данными. Из полученной матрицы сформировали векторные точечные данные с соответствующими значениями NDVI.

Усреднённые за 50 лет (1950–2000) данные о климатических характеристиках каждого месяца разрешения 1 км получены нами из базы данных WorldClim (Hijmans et al., 2005). Цифровая модель рельефа того же разрешения 1 км получена из данных SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) (Rodriguez et al., 2005). Климатические и рельефные данные преобразованы в проекцию Каврайского для европейской части России с разрешением 1 км.

При расчёте среднегодовых значений испаряемости PET (*англ.* Potential Evapotranspiration) и испарения АЕТ (*англ.* Actual Evapotranspiration) использовали методики, описанные в статье (Шарый и др., 2020). Применяли в анализе также дефицит воды (Lutz et al., 2010)  $WD = PET - AET$  (*англ.* Water Deficit), коэффициент увлажнения  $MI = MAP/PET$  (*англ.* Moisture Index), среднегодовую сумму осадков MAP (*англ.* Mean Annual Precipitation), индекс континентальности IC (*англ.* index of continentality) (амплитуда среднемесячной температуры:  $T_{max} - T_{min}$ ) и индекс Де Мартона (*англ.* Index of De Martonne)  $IDM = MAP/(MAT + 10)$  (*англ.* Mean Annual Temperature — MAT, среднегодовая температура). Для положительности значения IDM к MAT добавляют 10 °С, поскольку MAT может менять знак. Для востока России и Японии было показано, что определение границ групп леса лучше проводить по индексам Кира (Grishin, 1995). В анализе использовали тепловой индекс Кира (*англ.* Kira's warmth index)  $WK = \sum \max\{0, (T_i - 5)\} \text{ °C}$ , где  $T_i$  — средняя температура  $i$ -го месяца, и холодовой индекс Кира (*англ.* Kira's coldness index)  $CK = -\sum \max\{0, (5 - T_i)\} \text{ °C}$  (Krestov et al., 2010). Измерения мощности снежного покрова не всегда доступны во многих регионах, по этой причине для оценки индекса снежности (*англ.* snow index) применяют сумму осадков холодного периода (с ноября по март).

В исследовании связей NDVI лиственных лесов с климатом и рельефом использована линейная множественная регрессия с решением по наиболее простому и популярному методу наименьших квадратов OLS (*англ.* Ordinary Least Squares). NDVI лиственных лесов западной и восточной части являлись зависимыми переменными, в качестве независимых переменных или предикторов применяли характеристики климата и рельефа. Число предикторов ограничивали четырьмя, 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. В программе перебирались все сочетания четырёх независимых предикторов и выбиралось то, для которого коэффициент детерминации  $R^2$  был наибольшим. По этой причине выбор предикторов в финальной модели не зависел от предпочтений авторов. Значимость предикторов в модели оценивалась по  $t$ -статистикам Стьюдента (Montgomery, Peck, 1982), в приведённых уравнениях регрессии предикторы расположены в порядке убывания их статистической значимости. Автокорреляция остатков считалась пренебрежимо малой, так как площадки исследования были расположены на расстоянии более 7 км друг от друга. Расчёты проводились с помощью авторской программы «Аналитическая ГИС Эко», версия 1.08г (Wood, 2009).

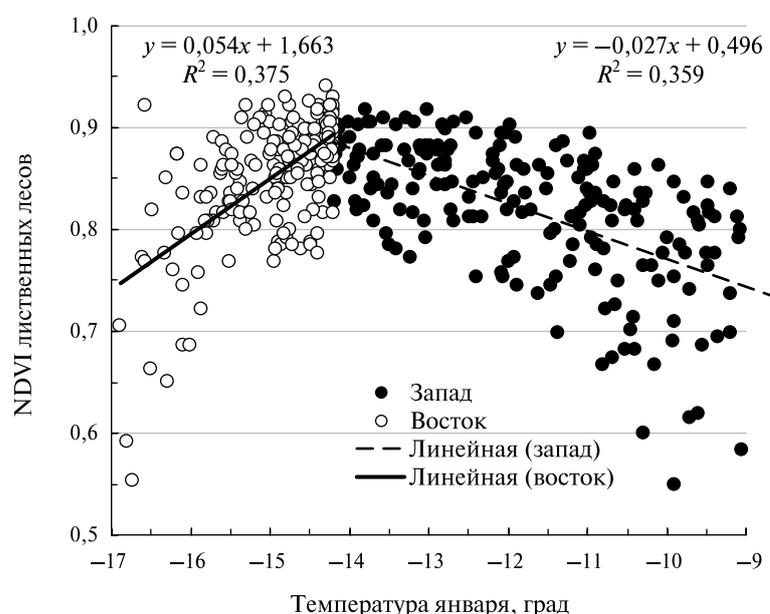
## Результаты и обсуждение

Анализ встречаемости лиственных лесов в бассейне показал следующее. Лиственные леса на северной границе Волжского бассейна находятся в зоне среднетаёжных лесов: в западном регионе таких площадок всего 1,5 % от всех изученных, в восточной части их 25,6 %. В западном регионе бассейна в зоне южнотаёжных лесов расположены более трети (35,1 %)

изученных площадок; в восточной части бассейна таких площадок 41,5 %. К югу от южнотаёжных лесов в подзоне широколиственно-еловых лесов находятся четверть площадок, 24,7 % с западными лиственными лесами и 12,5 % с восточными. В зоне широколиственных лесов, представленной в бассейне небольшими островками на западе, расположены около 24,4 % площадок (10 % в подзоне с участием ели и 14,4 % без ели), на востоке 8,2 % площадок без ели. Зона луговых степей включает 14,4 % западных и 11,1 % восточных площадок лиственных лесов. В целом западная часть бассейна отличается от восточной тем, что половина площадок лиственных лесов на западе находится в зоне широколиственных лесов, а 67 % восточных площадок — в более суровых континентальных климатических условиях средне- и южнотаёжных лесов.

Средние значения NDVI лиственных лесов в западном регионе бассейна ниже (0,818), чем в восточном (0,854). В противоположность этому, NDVI хвойных лесов в западной части бассейна выше (еловые — среднее значение 0,756, сосновые леса — 0,760), чем в восточной (для еловых NDVI — 0,708, для сосновых — 0,732).

На *рис. 2* показана связь NDVI лиственных лесов с температурой января, с помощью которой выделены западная и восточная выборки по признаку положительной и отрицательной связи с ней. NDVI лиственных лесов возрастает с увеличением температуры января в восточной части бассейна, а в западной — снижается (см. *рис. 2*).



*Рис. 2.* Зависимость NDVI лиственных лесов от температуры января в западной (чёрные кружки справа) и восточной (светлые кружки слева) части региона

Климатические условия, при которых показатели фотосинтетической активности NDVI максимальны и при удалении от которых происходит снижение показателя, называют экологическим оптимумом. Это логично следует из существования географических областей разных типов леса, которые исчезают за границами своей области, а близ границы происходит уменьшение NDVI, что и наблюдается на *рис. 2*.

Поскольку связи NDVI с характеристиками климата для каждой из выборок близки к линейным, то можно использовать коэффициенты корреляции Пирсона для оценки тесноты связей. В *таблице* проведено сравнение факторов среды по тесноте связи с NDVI.

Из *таблицы* видно, что в целом NDVI лиственных лесов более холодной восточной части связаны с температурой и осадками несколько теснее, чем NDVI западной части. С температурой в восточной части связь NDVI положительная, в западной — знакопеременная. Это не согласуется с результатами, полученными другими авторами (Adulkongkaew et al., 2020;

Zhang X. et al., 2010; Zhang Y. et al., 2012), которые отмечали негативное влияние роста температуры на значения NDVI разных типов растительности. Отметим, что западные леса более зависимы от вариабельности температуры, хотя значения её ниже, чем в восточных. NDVI западных лесов заметно возрастает по направлению на северо-восток, восток и юго-восток, на NDVI восточных лесов не влияют эти направления, он снижается по направлению на север. Из-за повышенных осадков заметно положительное влияние на восточные леса испаряемости, дефицита воды и отрицательное — индекса Де Мартона и индекса снежности.

Коэффициенты корреляции парных связей NDVI двух выборок лиственных лесов западной (W) и восточной (E) части бассейна

Климатический фактор		W	E	Климатический фактор	W	E
Среднемесячная температура	Январь	<b>-0,599</b>	<b>0,613</b>	Среднегодовая температура	-0,220	<b>0,535</b>
	Февраль	<b>-0,583</b>	0,425	Среднегодовая сумма осадков	-0,392	-0,391
	Март	-0,449	0,242	Вариабельность температуры	<b>0,580</b>	*
	Апрель	*	0,480	Коэффициент вариации осадков	-0,236	*
	Май	0,223	0,476	Средняя температура зимы	<b>-0,601</b>	<b>0,607</b>
	Июнь	0,293	0,408	Средняя температура весны	*	<b>0,540</b>
	Июль	0,392	0,344	Средняя температура лета	0,312	0,391
	Август	0,247	0,406	Средняя температура осени	-0,294	<b>0,501</b>
	Сентябрь	*	0,403	Расстояние на северо-восток	<b>0,573</b>	<b>-0,579</b>
	Октябрь	-0,376	0,489	Расстояние на север	*	-0,429
	Ноябрь	<b>-0,561</b>	<b>0,612</b>	Расстояние на восток	<b>0,630</b>	*
	Декабрь	<b>-0,593</b>	<b>0,616</b>	Расстояние на юго-восток	<b>0,504</b>	0,250
Среднемесячные осадки	Январь	*	-0,359	Испарение (АЕТ)	-0,361	*
	Февраль	*	-0,202	Испаряемость (РЕТ)	-0,171	0,436
	Март	-0,356	-0,447	Дефицит воды (WD)	0,266	0,405
	Апрель	-0,288	-0,305	Индекс Де Мартона (IDM)	-0,236	-0,466
	Май	-0,477	-0,325	Индекс континентальности (IC)	<b>0,583</b>	-0,164
	Июнь	-0,402	-0,341	Сумма отрицательной температуры	<b>-0,588</b>	<b>0,615</b>
	Июль	-0,377	*	Индекс снежности	-0,211	<b>-0,510</b>
	Август	-0,393	-0,360	Сумма осадков зимы	*	-0,390
	Сентябрь	-0,149	-0,197	Сумма осадков весны	-0,498	-0,374
	Октябрь	*	-0,416	Сумма осадков лета	-0,432	-0,292
	Ноябрь	-0,256	<b>-0,545</b>	Сумма осадков осени	*	-0,396
	Декабрь	-0,286	-0,318	Сумма осадков тёплого периода	-0,368	-0,313

\* Связь незначима при  $P < 0,05$ . Полушжирным начертанием помечены значения, для которых модуль коэффициента корреляции больше 0,5.

На рис. 3 (см. с. 139) приведены графики, отражающие характер связей NDVI лесов со среднемесячной температурой (а) и суммой осадков (б) для запада и востока.

Из графиков видно, что связи с температурой месяцев (см. рис. 3а) описываются противоположными параболоми: с выпуклым куполом для запада и вогнутым куполом для востока. Обе параболы показывают более тесные связи с температурой холодного периода и снижение тесноты связей в вегетационный период. Для запада отмечается также перемена знака связи в вегетационный период. Характер связей с суммой осадков иной (см. рис. 3б): он описывается параболоми с выпуклым куполом для NDVI лесов в восточной части, с вогнутым — в западной. В бассейне распределение осадков и температуры по месяцам характеризуется

нарастанием их значений в тёплый период, из графиков следует, что рост температуры в этот период приводит к снижению зависимости лесов на западе и востоке, а повышение количества осадков, напротив, — к некоторому увеличению этой зависимости (по модулю), хотя и отрицательной.

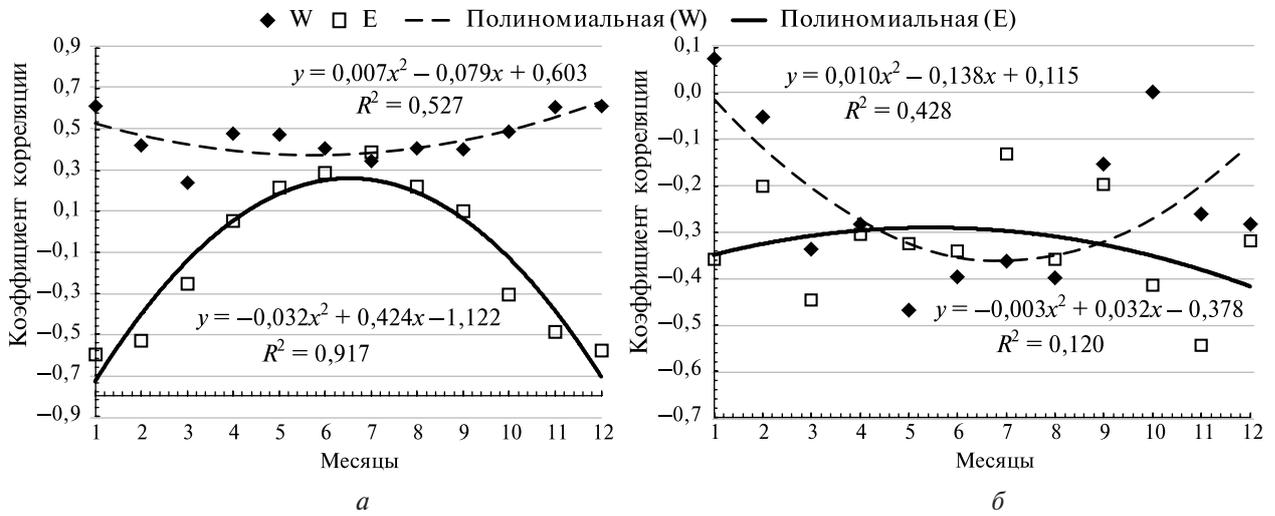


Рис. 3. Связи NDVI лиственных лесов со среднемесячной температурой (а) и суммой осадков (б) для запада и востока

Для западной выборки лиственных лесов  $NDVI_W$  находим нижеприведённое уравнение множественной регрессии:

$$NDVI_W = -2,595 \cdot 10^{-2} T_{\max 01} - 5,309 \cdot 10^{-4} P_{04-10} - 2,684 \cdot 10^{-2} DTR_{06} - 1,434 \cdot 10^{-3} MCA + 1,141, \quad R^2 = 0,452, \quad P < 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $T_{\max 01}$  — средняя дневная температура января;  $P_{04-10}$  — средняя сумма осадков тёплого периода (месяцев с положительной температурой);  $DTR_{06}$  — суточный перепад температуры июня;  $MCA$  — площадь сбора потоков водных и твёрдых частиц. Соотношение (1) показывает, что рост  $NDVI_W$  на площадках лиственных лесов следует снижению четырёх факторов среды: дневной температуры января, суммы осадков тёплого периода, суточного перепада температуры в июне и площади сбора. В уравнении предикторы записываются в порядке снижения их статистической значимости: в равенстве (1)  $T_{\max 01}$  определяет почти половину пространственной изменчивости  $NDVI_W$  — на 48,3 %,  $P_{04-10}$  — на 23,9 %,  $DTR_{06}$  — на 17,4 %,  $MCA$  — на 10,4 %.

Изменение  $NDVI_E$  лиственных лесов в восточной части описывается следующим уравнением множественной регрессии:

$$NDVI_E = 8,725 \cdot 10^{-3} T_{\text{cold Kira}} - 1,169 \cdot 10^{-2} P_{02} + 6,368 \cdot 10^{-3} Z_{\text{hills}} + 1,427 \cdot 10^{-4} Z + 1,838, \quad R^2 = 0,499, \quad P < 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{cold Kira}}$  — холодовой индекс Кира;  $P_{02}$  — средняя сумма осадков февраля;  $Z_{\text{hills}}$  — относительная высота холмов и возвышенностей, отсчитываемая для каждого холма от наибольшей окаймляющей его замкнутой горизонтали;  $Z$  — абсолютная высота. Возрастание значений  $NDVI_E$ , согласно соотношению (2), происходит при увеличении индекса Кира, относительной высоты холмов и абсолютной высоты и при снижении осадков февраля. Статистическая значимость предикторов в уравнении (2) распределилась следующим образом:  $T_{\text{cold Kira}}$  определяет больше половины пространственной изменчивости — на 55,5 %,  $P_{02}$  — на 21,4 %,  $Z_{\text{hills}}$  — на 15,3 %,  $Z$  — на 7,8 %.

Соотношения (1) и (2) близки по главным факторам пространственного изменения NDVI — около половины изменчивости в обоих случаях объясняет температура холодного периода; на западе с её ростом у лиственных лесов снижается фотосинтетическая активность, на востоке — возрастает. Подобная закономерность показана авторами для темнохвойных и светлохвойных лесов в Волжском бассейне (Шарый, Шарая, 2022; Шарый и др., 2024). Различаются уравнения (1) и (2) вторыми по значимости предикторами: для западных лесов является важным снижение осадков в вегетационный период, для восточных — уменьшение осадков февраля перед началом вегетации, несмотря на то, что они самые низкие в году. Индекс NDVI западных лесов также зависит от суточного перепада июньской температуры, в июне перепад является наибольшим в году (11,1 °C). Для всех лиственных лесов прослеживается зависимость от положения в рельефе. Так, на западе NDVI снижается с удалением от водоразделов (с увеличением площади сбора), на востоке — с уменьшением высоты на возвышенностях и вне их, что в тенденции тоже связано с ростом площади сбора. Отметим, что средняя высота для площадок лиственных лесов на востоке больше (209 м), чем на западе (167 м), при этом значимость рельефа для западных лесов возрастает более чем в два раза. Можно предположить, что на востоке это связано с ростом осадков и со снижением годовой температуры, потенциальной и реальной эвапотранспирации, которые в пространстве реализуются через переувлажнение почвы, в первую очередь в пониженных местах.

Следует отметить, что исследователи, как правило, анализируют связи NDVI лесов с температурой и осадками вегетационного периода ((Логинов и др., 2019; Тигеев и др., 2021; Chuai et al., 2013; Piedallu et al., 2019) и др.), что вполне понятно. В работе (Гусев, 2022) показано, что связи NDVI мелколиственных и широколиственных лесов на юго-востоке Беларуси с годовой температурой и осадками были более тесными, чем с летними, что косвенно может свидетельствовать о том, что связи с зимними климатическими показателями, которые не проверялись авторами, были влиятельнее летних. В лесах и альпийских лугах верховьев р. Хуанхэ на севере Китая годовая максимальная температура имела менее тесную положительную связь с NDVI, чем минимальная годовая, из чего авторы делают вывод, что месячная самая низкая температура оказала наиболее выраженное влияние на изменение растительного покрова (Hao et al., 2012).

Для лиственных лесов в восточной части важно положение в рельефе — NDVI увеличивается с высотой, при этом средняя высота в восточном регионе выше, чем на западе, а тенденция «избегания» пониженных увлажнённых мест описывается отрицательными связями с площадью сбора. Различия в характере связей с зимней температурой в восточной и западной частях могут быть связаны с формированием и сохранением влагозапасов почвы до начала вегетационного периода. Так, в западной части выше дефицит воды — 181 мм (158 мм — для восточной), выше значения испарения, испаряемости, годовой температуры и ниже значения годовой суммы осадков. По этой причине возрастание температуры зимы, которая приводит к снижению NDVI, может нарушать «консервирование» влагозапасов в этой части бассейна. В восточной же части повышение температуры зимы, которая вызывает рост NDVI, способно уменьшать избыточные влагозапасы. Как известно, осенне-зимний период является накопителем влагозапасов (Ремезов, Погребняк, 1965), при этом влага лучше сохраняется в почве при низкой температуре в этот период.

Поскольку современное потепление отличается более заметным увеличением температуры зимы, можно ожидать, что лиственные леса на востоке бассейна будут находиться в более благоприятных условиях по сравнению с лесами в западной части бассейна. Полагаем, что в прогнозных оценках учёт зависимости NDVI лиственных лесов от зимней температуры, как показано в исследовании, существенной и превосходящей влияние летней температуры, был бы уместным.

## Заключение

Выявленная особенность лиственных лесов в бассейне состоит в том, что средние значения NDVI в бассейне заметно больше, чем для хвойных лесов, при этом на востоке NDVI выше (0,854), чем на западе (0,818), несмотря на то, что зимняя температура на востоке на 3 °С ниже. Распределение NDVI темнохвойных и светлохвойных лесов иное: в более холодной части бассейна значения индекса снижаются. Закономерности изменения NDVI лиственных лесов в Волжском бассейне определены, в первую очередь, изменением температуры холодного периода. На западе рост этой температуры приводит к снижению NDVI, на востоке — к росту. Различается также динамика изменения NDVI: скорость снижения NDVI на западе составляет 0,03 ед. на 1 °С зимней температуры, скорость роста NDVI на востоке 0,06 единиц на 1 °С зимы.

## 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. *Голубятников Л. Л., Денисенко Е. А.* Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 2. С. 57–68.
3. *Гусев А. П.* NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси) // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 2. С. 200–209.
4. *Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Бондаренко Ю. А., Бровка Ю. А.* Глобальные и региональные изменения климата и их связь с биопродуктивностью наземных экосистем // Природопользование. 2019. № 2. С. 20–31.
5. *Погребняк П. С.* Общее лесоводство. 2-е изд. М.: Колос, 1968. 440 с.
6. *Ремезов Н. П., Погребняк П. С.* Лесное почвоведение. М.: Лесная пром-сть, 1965. 324 с.
7. *Тигеев А. А., Московченко Д. В., Фахретдинов А. В.* Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 166–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *Шарый П. А., Пикуленко О. В., Шарая Л. С., Степанова В. И.* NDVI светлохвойных лесов как функция климата в Волжском бассейне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 210–219. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-210-219.
12. *Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoenhirunyingsos 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.
13. *Chuai X. W., Huang X. J., Wang W. J., Bao G.* NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China // Intern. J. Climatology. 2013. V. 33. Iss. 7. P. 1696–1706. DOI: 10.1002/joc.3543.
14. *Grishin S. Yu.* The boreal forests of north-eastern Eurasia // Vegetatio. 1995. V. 121. P. 11–21.
15. *Hao F., Zhang X., Quyang W. et al.* Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River // Environmental Modeling and Assessment. 2012. V. 17. P. 389–398. DOI: 10.1007/s10666-011-9297-8.
16. *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. Iss. 15. P. 1965–1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
17. *Krestov P. V., Omelko A. M., Nakamura Y.* Phytogeography of higher units of forests and krummholz in North Asia and formation of vegetation complex in the Holocene // Phytocoenologia. 2010. V. 40. P. 41–56. DOI: 10.1127/0340-269X/0040-0440.

18. Lutz J. A., van Wagten J. W., Franklin J. F. Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park // *J. Biogeography*. 2010. V. 37. P. 936–950. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2009.02268x.
19. Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to linear regression analysis. N. Y.: John Wiley and Sons, 1982. 504 p.
20. Piedallu C., Chéret V., Denux J. P. et al. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 651 (Pt. 2). P. 2874–2885. DOI: 10.1016/scitotenv.2018.10.052.
21. 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.
22. Wood J. Overview of software packages used in geomorphometry // *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* / eds. Hengl T., Reuter H. I. Ser. Developments in Soil Science. V. 33. Ch. 10. Amsterdam, etc.: Elsevier, 2009. P. 257–267. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00010-X.
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.

## Regular spatial changes in the vegetation index of deciduous forests in the Volga basin

P. A. Shary<sup>1,2</sup>, L. S. Sharaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS  
Pushchino, Moscow region 142290, Russia  
E-mail: p\_shary@mail.ru*

<sup>2</sup> *All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikova  
Moscow 127550, Russia*

In the Volga basin, the relationships between NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) of deciduous forests and climate and topography have been studied. The nature of the statistical relationships of NDVI of deciduous forests distributed across the basin changes at a January temperature of  $-14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ : in the western part, an increase in January temperature leads to a decrease in NDVI, in the eastern part — to an increase. Therefore, the sample of 400 sites with an area of  $1\text{ km}^2$  is divided into two parts — western and eastern. Half of the deciduous forest sites in the western part are located in the broad-leaved forest zone, 67 % of the sites in the eastern part are in the harsher continental climatic conditions of middle and southern taiga forests. Deciduous forests differ significantly in their average NDVI values: in the western part, the average index value is 0.818, in the eastern part — 0.854, such values significantly exceed the NDVI of dark coniferous and light coniferous forests. NDVI of forests in the colder eastern part differs from the western one by closer and only positive relationships with average monthly temperatures, closer negative relationships with monthly precipitation. The western and eastern parts differ significantly in the values of average annual night and day temperatures, potential evapotranspiration, water deficit and altitude. Analysis of photosynthetic activity using multiple regression showed that about 50 % of the NDVI variance in the west and east is explained by cold period temperatures; for western forests, a decrease in precipitation during the growing season is important; for eastern forests, a decrease in February precipitation before the beginning of the growing season is important, despite the fact that this precipitation is the lowest in the year. NDVI of western forests depends on the largest diurnal temperature range in June, while NDVI of eastern forests depends more on the position in the relief. Thus, in the west, NDVI decreases with distance from water divided (with the increase in the catchment area), in the east — with the decrease in altitude on and off the hills, which is also associated with an increase in catchment area. In general, eastern deciduous forests are more influenced by climate and topography and their positive relationships with temperatures suggest positive changes in their photosynthetic activity with global warming, unlike the forests of the western part of the basin.

**Keywords:** Volga basin, deciduous forests, NDVI, climate, topography, multiple regression

Accepted: 10.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-134-144

## 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. Golubyatnikov L. L., Denisenko E. A., Influence of climate changes on vegetation cover in European Russia, *Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya*, 2009, No. 2, pp. 57–68 (in Russian).
3. Gusev A. P., NDVI as an indicator climatogenic responses of geosystems (on the example of the south-east of Belarus), *Regional'nye geosistemy*, 2022, V. 46, No. 2, pp. 200–209 (in Russian).
4. Loginov V. F., Lysenko S. A., Bondarenko Yu. A., Brovka Yu. A., Global and regional climate changes and their relation to bioproductivity of land ecosystems, *Prirodopol'zovanie*, 2019, No. 2, pp. 20–31 (in Russian).
5. Pogrebynyak P. S., *Obshchee lesovodstvo* (Fundamental forestry), 2<sup>nd</sup> ed., Moscow: Kolos, 1968, 440 p. (in Russian).
6. Remezov N. P., Pogrebynyak P. S., *Lesnoe pochvovedenie* (Forest soil science), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1965, 324 p. (in Russian).
7. Tigeev A. A., Moskovchenko D. V., Fakhretdinov A. V., Current trends in natural and anthropogenic vegetation in Western Siberia's sub-tundra forests based on vegetation indices data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 166–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
8. Shary P. A., Pinskiy D. L., Statistical evaluation of the relationships between spatial variability of the organic carbon content in gray forest soils, soil density, concentration of heavy metals and topography, *Eurasian Soil Science*, 2013, V. 46, pp. 1076–1087, DOI: 10.1134/S1064229313090044.
9. Shary P. A., Sharaya L. S., Dark conifer forests NDVI as a function of climate in the Volga basin, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 178–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-178-185.
10. 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, V. 17, No. 4, pp. 154–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
11. Shary P. A., Pikulenko O. V., Sharaya L. S., Stepanova V. I., Light conifer forest NDVI as a function of climate in the Volga basin, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 210–219 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-210-219.
12. Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoenhirunyingyos 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.
13. Chuai X. W., Huang X. J., Wang W. J., Bao G., NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China, *Intern. J. Climatology*, 2013, V. 33, Iss. 7, pp. 1696–1706, DOI: 10.1002/joc.3543.
14. Grishin S. Yu., The boreal forests of north-eastern Eurasia, *Vegetatio*, 1995, V. 121, pp. 11–21.
15. Hao F., Zhang X., Quyang W. et al., Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River, *Environmental Modeling and Assessment*, 2012, V. 17, pp. 389–398, DOI: 10.1007/s10666-011-9297-8.
16. 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, Iss. 15, pp. 1965–1978, DOI: 10.1002/joc.1276.
17. Krestov P. V., Omelko A. M., Nakamura Y., Phytogeography of higher units of forests and krummholz in North Asia and formation of vegetation complex in the Holocene, *Phytocoenologia*, 2010, V. 40, pp. 41–56, DOI: 10.1127/0340-269X/0040-0440.
18. Lutz J. A., van Wagtenonk J. W., Franklin J. F., Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park, *J. Biogeography*, 2010, V. 37, pp. 936–950, DOI: 10.1111/j.1365-2699.2009.02268x.
19. Montgomery D. C., Peck E. A., *Introduction to linear regression analysis*, N. Y.: John Wiley and Sons, 1982, 504 p.

20. Piedallu C., Chéret V., Denux J. P. et al., Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type, *Science of the Total Environment*, 2019, V. 651 (Pt. 2), pp. 2874–2885, DOI: 10.1016/scitotenv.2018.10.052.
21. 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.
22. 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, V. 33, Ch. 10, Amsterdam, etc.: Elsevier, 2009, pp. 257–267, DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00010-X.
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, 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, V. 13, pp. 574–581, DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.048.