

Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна

П. А. Шарый¹, Л. С. Шарая², Л. В. Сидякина²

¹ *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Пушино, 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*

Изучение связи индекса NDVI темнохвойных, светлохвойных, лиственных и смешанных лесов с характеристиками климата в Волжском бассейне показало, что наиболее тесные связи NDVI с климатом в регионе наблюдаются для темнохвойных лесов. При этом главными для всех лесов характеристиками климата были континентальность, вариабельность температуры, оцененная как её стандартное отклонение, температура зимы, сумма отрицательных температур, холодовой индекс Кира и индекс снежности. Также большое значение имела потенциальная эвапотранспирация октября — месяца, после которого средняя температура в регионе меняется на отрицательную. Связь NDVI со среднегодовой температурой была сравнительно слабой, ещё слабее — с месячными и годовыми суммами осадков. Последнее связано с тем, что дефицит влаги — не лимитирующий фактор для лесов в регионе. В целом летние значения NDVI для всех лесов бассейна были более тесно связаны с температурой зимних месяцев, чем летних. Это может объясняться как зимними морозами, так и эффектами так называемой зимней засухи. Последняя проявляется в том, что в конце зимы, когда корни растений ещё заморожены, а транспирация уже существенна, происходит обезвоживание надземной части растений, что позже может проявляться в вегетационный период. Найдены критические значения дефицита воды (определённого как разность потенциальной и реальной эвапотранспирации), при превышении которых леса в бассейне не встречаются: 251 мм/год — для темнохвойных лесов, 254 мм/год — для смешанных, 282 мм/год — для светлохвойных и 326 мм/год — для лиственных.

Ключевые слова: NDVI, хвойные и лиственные леса, характеристики климата, зимняя засуха

Одобрена к печати: 22.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) определяется фотосинтетической активностью растительного покрова, лесов, которая зависит от количества хлорофилла в зелёных листьях (иголках) растений, по данным отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра (Tucker, Sellers, 1986). NDVI лесов и, в свою очередь, активность зависят от климата, который изменяется в пространстве. Климат может быть охарактеризован рядом показателей, рассчитываемых из месячных данных о температуре и осадках разрешения 900 м базы данных WorldClim (Hijmans et al., 2005), где они усреднены за 50 лет (1950–2000). Представляет интерес сравнение пространственных изменений NDVI лесов Волжского бассейна с широким спектром характеристик климата, включающих, например, индекс континентальности, индексы Кира, потенциальную и реальную эвапотранспирацию, с целью выявления соответствующих закономерностей. Потенциальное исчезновение видов деревьев в связи с глобальным потеплением изучалось, например, в работе (Lutz et al., 2010). Имеет смысл провести анализ отдельно для каждой группы леса из-за различий их реакций на изменение климата в пространстве. Цель — выявление характеристик климата, наиболее значимых для NDVI в Волжском бассейне.

Материалы и методы

Известно, что оценить климат как сухой или влажный с помощью измеряемых на метеостанциях характеристик (температуры и осадков) невозможно, поскольку это зависит от соотношения между осадками и потенциальной эвапотранспирацией E_0 . Последняя метеостанция не измеряется, но может быть рассчитана. В работе (Thorntwaite, 1948) предложен эмпирический метод расчёта E_0 по данным о температуре в разные месяцы. Метод состоит в следующем. Согласно данным публикации (Thorntwaite, 1948), для различных участков США измерения потенциальной эвапотранспирации E_{0i} за i -й месяц, представленные в координатах $(E_{0i}, \log T_i)$, где T_i — средняя температура i -го месяца в градусах Цельсия, а E_{0i} — потенциальная эвапотранспирация этого месяца, давали на каждом участке прямой тренд положительного наклона a . Поэтому для любого участка $E_{0i} = cT_i^a$ мм/мес; коэффициенты a и c зависели от участка, причём a возрастал от холодных участков к тёплым, а c — убывал. Для учёта этого использовался годовой тепловой индекс I , от которого зависели a и c , причём $a(I)$ возрастал с ростом I , а $c(I)$ — убывал. Месячный тепловой индекс f_i определялся формулой:

$$f_i = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (1)$$

($f_i = 0$ при $T_i \leq 0$ °C), а суммирование f_i по 12 мес давало годовой тепловой индекс

$$I = \sum f_i; \quad (2)$$

зависимость $a(I)$ описывалась эмпирической формулой:

$$a(I) = 0,000000675 I^3 - 0,0000771 I^2 + 0,01792 I + 0,49239. \quad (3)$$

Коэффициент:

$$c(I) = 160/I; \quad (4)$$

ненастроенная формула:

$$E'_{0i} = \frac{160}{I} T_i^{a(I)} \text{ мм/мес}, \quad (5)$$

где $a(I)$ берётся из выражения (3); здесь ещё не учтена широта точки, от которой зависит количество часов между восходом и закатом, когда в основном происходит эвапотранспирация. Для этого значение E'_{0i} следует «настроить», т. е. умножить на зависящее от широты φ и месяца i (числа дней в нём) число $k_i(\varphi)$:

$$E_{0i} = k_i(\varphi) E'_{0i} \text{ мм/мес}; \quad (6)$$

годовая потенциальная эвапотранспирация E_0 есть сумма месячных значений. Севернее 50° с. ш. значения $k_i(\varphi) = k_i(50^\circ)$. Для 50° с. ш. и севернее формула E_0 записывается как:

$$E_0 = \sum E_{0i} = 0,74E'_{0,1} + 0,78E'_{0,2} + 1,02E'_{0,3} + 1,15E'_{0,4} + 1,33E'_{0,5} + 1,36E'_{0,6} + 1,37E'_{0,7} + 1,25E'_{0,8} + 1,06E'_{0,9} + 0,92E'_{0,10} + 0,76E'_{0,11} + 0,70E'_{0,12} \text{ мм/год}, \quad (7)$$

где слагаемые — месячные значения потенциальной эвапотранспирации E_{0i} для тех же широт. Для рассматриваемого региона Волжского бассейна этого достаточно. Коэффициенты для более южных широт приведены в работе (Thorntwaite, 1948). Используя формулы (1)–(7), можно рассчитать E_{0i} каждого месяца, а также E_0 . Из-за отрицательных температур в Волжском бассейне значения E_{0i} для пяти холодных месяцев ($E_{0,1}$, $E_{0,2}$, $E_{0,3}$, $E_{0,11}$, $E_{0,12}$) равны нулю. Относительная ошибка расчёта E_0 оценена как 2,6 % (Thorntwaite, 1948).

С помощью множественной регрессии найдено, что для разнообразия деревьев в Северной Америке важнее реальная эвапотранспирация E (Currie, 1991; Lutz et al., 2010). В работе (Будыко, 1956) предложен метод расчёта E по формуле:

$$E = \sqrt{E_0 P [1 - \exp(-E_0/P)] \cdot \text{th}(P/E_0)} \text{ мм/год,}$$

где P — годовая сумма осадков; $\text{th}(x)$ — гиперболический тангенс, равный $(e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$.

Коэффициенты корреляции Спирмана (r_s) для связей NDVI различных групп леса в Волжском бассейне с кубическим трендом характеристик климата и с расстоянием на северо-восток. Полу жирным начертанием выделены значения r_s больше 0,7

Факторы среды		Группы леса				
		Темнохвойные	Светлохвойные	Лиственные	Смешанные	Все
Температура	января	0,761	0,579	0,585	0,583	0,585
	февраля	0,764	0,552	0,555	0,618	0,552
	марта	0,711	0,497	0,448	0,566	0,453
	апреля	0,689	0,336	0,177	0,380	0,235
	мая	0,660	0,299	0,040	0,293	0,092
	июня	0,416	0,281	0,160	0,066	0,140
	июля	0,185	0,337	0,286	0,057	0,228
	августа	0,546	0,372	0,164	0,106	0,040
	сентября	0,636	0,246	0,060	0,252	0,057
	октября	0,750	0,494	0,467	0,579	0,505
	ноября	0,781	0,588	0,586	0,627	0,595
	декабря	0,786	0,581	0,584	0,602	0,582
Среднегодовая температура		0,699	0,394	0,380	0,523	0,421
Индекс континентальности IC		0,812	0,472	0,498	0,642	0,489
Вариабельность температуры		0,792	0,287	0,501	0,538	0,391
Минимальная температура января		0,765	0,564	0,568	0,601	0,581
Температура зимы		0,774	0,580	0,590	0,614	0,594
Сумма отрицательных температур		0,773	0,575	0,587	0,617	0,587
Холодовой индекс Кира СК		0,756	0,560	0,572	0,608	0,573
Индекс снежности		0,705	0,317	0,184	0,154	0,207
Расстояние на северо-восток		0,837	0,586	0,594	0,639	0,578
Годовая потенциальная эвапотранспирация E_0		0,691	0,354	0,050	0,260	0,043
Коэффициент вариации осадков		0,636	0,286	0,158	0,329	0,019
Среднегодовая сумма осадков		0,635	0,342	0,291	0,043	0,251
Дефицит воды W		0,603	0,336	0,128	0,121	0,127
Потенциальная эвапотранспирация	апреля	0,696	0,352	0,227	0,417	0,287
	мая	0,640	0,295	0,103	0,275	0,097
	июня	0,182	0,316	0,236	0,021	0,182
	июля	0,703	0,160	0,378	0,252	0,248
	августа	0,298	0,365	0,144	0,107	0,104
	сентября	0,556	0,228	0,118	0,213	0,014
	октября	0,737	0,542	0,543	0,600	0,557

Отмечено, что в Европейской части России для областей распространения пород деревьев в направлении с севера на юг важны гидротермические характеристики климата, такие как дефицит воды на юге, а в направлении с запада на восток — континентальность клима-

та (Погребняк, 1968). Дефицит воды определяется как $W = E_0 - E$ (Lutz et al., 2010), индекс континентальности — как амплитуда температуры года $IC = T_{\max} - T_{\min}$ (Krestov et al., 2010). Для востока России и Японии было показано, что определение границ групп леса лучше проводить по индексам Кира (Grishin, 1995). Тепловой индекс Кира (*англ.* Kira's warmth index) есть $WK = \sum \max\{0, (T_i - 5)\}$ °С, где T_i — средняя температура i -го месяца, а холодовой индекс Кира (Kira's coldness index) есть $СК = -\sum \max\{0, (5 - T_i)\}$ °С (Krestov et al., 2010). Зимой снежный покров защищает растительность от вымерзания корней, но часто его толщина под лесом неизвестна; для его оценки используют индекс снежности (*англ.* snow index), определённый как сумма осадков холодного периода (Krestov et al., 2010). Индекс омброиспаряемости (*англ.* ombro-evapotranspirational index) определён как отношение суммы осадков тёплого периода к E_0 (Krestov et al., 2010). Для анализа мы использовали 19 биоклиматических показателей из базы данных WorldClim, среди которых заметную связь с NDVI (*таблица*) продемонстрировали вариабельность температуры и коэффициент вариации осадков. Проверялся также ряд других показателей климата, таких как сумма годовых осадков, гидротермический коэффициент Селянинова, сумма активных температур выше 10 °С и сумма отрицательных температур.

В глобальном или континентальном масштабе потенциальная эвапотранспирация рассматривается как один из важнейших показателей для разнообразия растительности, причём разнообразие связано с ней нелинейно (квадратично) (O'Brien et al., 2000). В региональном масштабе выявляется различная зависимость разнообразия растительности для разных форм роста (Richerson, Lum, 1980) или жизненных форм (Shary et al., 2019).

Для анализа мы сформировали векторный слой точек — выборки для разных групп леса (тематические классы) с помощью программы «Аналитическая ГИС Эко» (Wood, 2009) из матрицы лесного покрова России с пространственным разрешением 1035 м, созданной на основе данных SPOT-Vegetation 2001–2010 гг. в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2016, <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317>). Из матриц каналов RED (красный) и NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный), полученных с помощью спутниковой системы Terra-MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), скорректированных в ИКИ РАН, рассчитаны значения NDVI для лета 2005 г. Затем с использованием матрицы NDVI для каждой группы леса получены векторные точечные слои значений NDVI в программе «Аналитическая ГИС Эко». Эти группы следующие: 1 — темнохвойные, 2 — светлохвойные, 3 — лиственные, 4 — смешанные, где в пологе площади крон хвойных пород составляют 60 % и лиственных — 40 %.

Мы рассчитывали матрицы разрешения 1 км каждой из характеристик климата (Hijmans et al., 2005) в проекции Каврайского для Европейской части России. Часть Волжского бассейна, расположенная южнее Самарской Луки, была исключена из анализа, поскольку там мало лесов. Непосредственно западные склоны Урала также исключались из анализа.

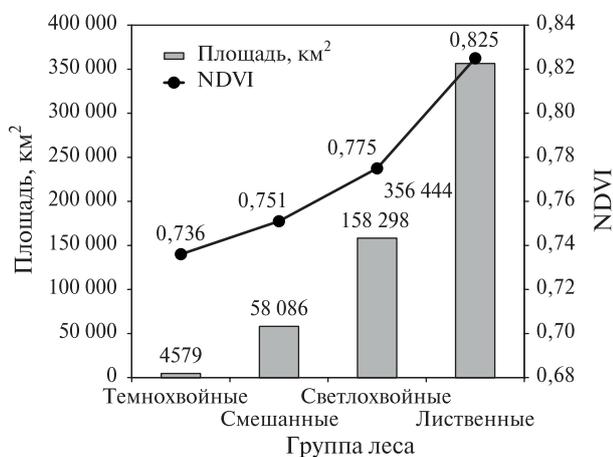


Рис. 1. График распределения площадей и средних значений NDVI для разных групп леса

Распределение площадей и средних значений NDVI для разных групп леса на изучаемой территории показано на *рис. 1* (см. с. 157). Поскольку связь NDVI с характеристиками климата, как правило, была нелинейной, для парных сравнений мы использовали кубическую регрессию NDVI по данной характеристике климата, а в качестве показателя тесноты связи — ранговый коэффициент корреляции Спирмана r_s .

Результаты и их обсуждение

Карта индекса континентальности приведена на *рис. 2*.

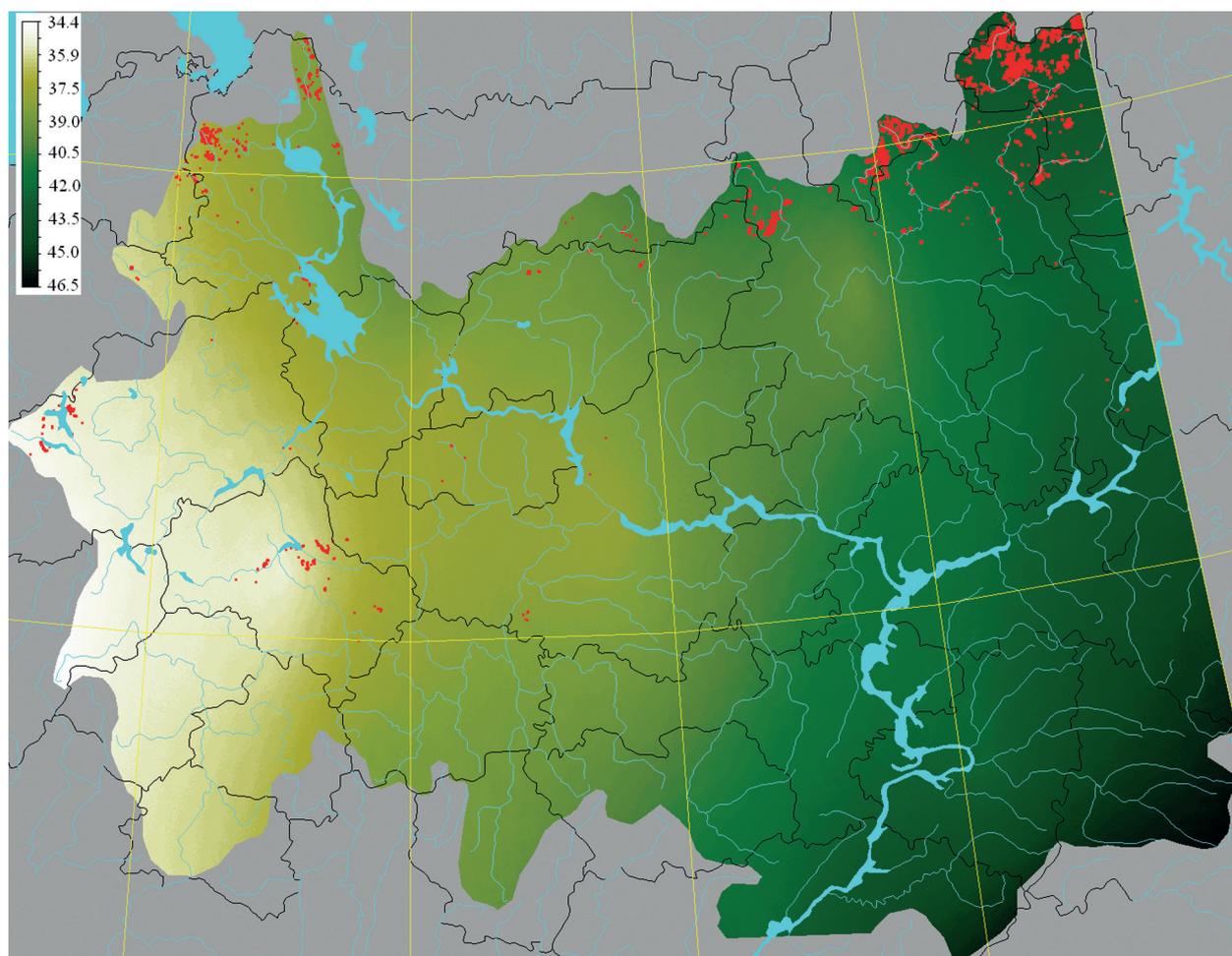


Рис. 2. Карта индекса континентальности. Площадки красного цвета отвечают темнохвойным лесам

Нелинейный характер связи NDVI с индексом континентальности показан на *рис. 3* (см. с. 159).

На *рис. 2* видно, что в области распространения темнохвойных лесов в пределах Волжского бассейна индекс континентальности IC принимает большие значения на северо-востоке региона; резкое падение NDVI справа на *рис. 3* отвечает этой части региона. Это говорит о высокой чувствительности NDVI темнохвойных лесов к континентальности климата в тех частях области их распространения, где IC превышает 42 °С. Остальные группы леса имеют тот же характер связи с континентальностью (см. *таблицу*). При $IC > 43,7$ °С темнохвойные леса в регионе не растут.

Результаты сравнений NDVI разных лесов с характеристиками климата показаны в *таблице*.

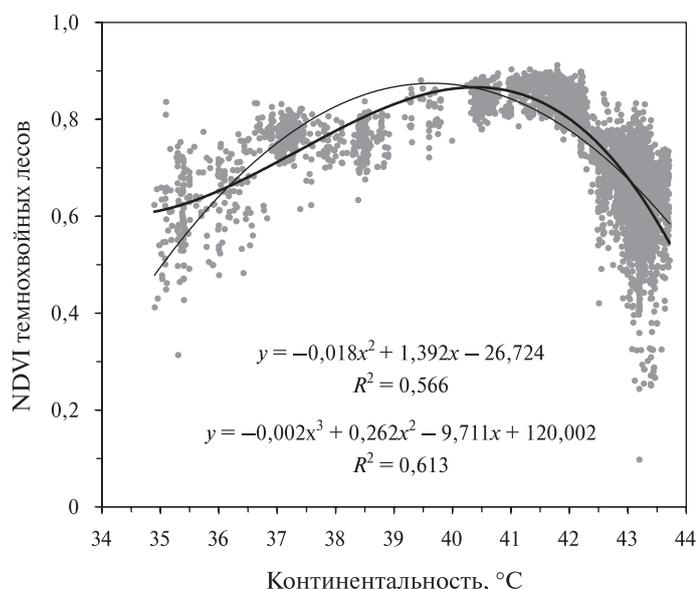


Рис. 3. Зависимость NDVI темных хвойных лесов от индекса континентальности климата; жирной линией показан кубический тренд, тонкой — квадратичный

Связи с другими показателями климата не приведены, так как они менее тесные. В отличие от видового богатства деревьев в Северной Америке (Currie, 1991) и характеристик лесов в Калифорнии (Lutz et al., 2010) связь NDVI с реальной эвапотранспирацией E была сравнительно слабой (для темных хвойных лесов $r_S = 0,411$, для остальных — ещё слабее). Связь с годовой суммой осадков и осадками по месяцам также относительно слабая, поскольку в основной части Волжского бассейна они не являются лимитирующим фактором (средняя по региону среднегодовая сумма осадков — 590 мм при среднегодовой температуре от $-0,6$ до $+6,9$ °C и средним по региону $+3,6$ °C). Относительно малая роль осадков отмечалась и для некоторых других регионов, например для Якутии (Варламова, Соловьев, 2017); однако в полуаридном и аридном климате региона Большой Бассейн, США (англ. Great Basin) осадки были важнее температуры, поскольку там они являлись лимитирующим фактором (Tang et al., 2015). Дефицит воды в регионе может быть важен не для групп леса, а для отдельных видов деревьев, находящихся вблизи южной границы своей области распространения, где его увеличение может привести к их исчезновению в будущем (Lutz et al., 2010).

Наиболее тесные связи наблюдались для темных хвойных лесов, NDVI которых особо чувствителен к континентальности климата ($r_S = 0,812$), возрастающей на северо-восток в ареале распространения этих лесов. Из-за этого возрастания и роста некоторых других характеристик климата в том же направлении наиболее тесной для данной группы леса была связь с расстоянием на северо-восток ($r_S = 0,837$). Помимо континентальности для темных хвойных лесов были наиболее важны ($r_S > 0,7$), без учёта температуры отдельных месяцев, вариабельность температуры ($r_S = 0,792$), оцененная её стандартным отклонением, температура зимы ($r_S = 0,774$), сумма отрицательных температур ($r_S = 0,773$), холодовой индекс Кира ($r_S = 0,756$) и индекс снежности ($r_S = 0,705$); при этом среднегодовая температура, которую часто используют, оказалась не столь важна ($r_S = 0,699$), как и среднегодовые осадки ($r_S = 0,635$). Континентальность существенна не для всех регионов; например, она не была важна для разнообразия растительности Австрийских Альп в региональном масштабе, где главными климатическими факторами оказались среднегодовые потенциальная эвапотранспирация и температура (Moser et al., 2005).

В экологии случайно меняющееся во времени действие климатических факторов (их вариабельность) рассматривают как одну из возможных причин их воздействия на разнообразие древесной растительности (Currie, 1991). В Волжском бассейне это согласуется с тем, что вариабельность температуры стала одним из наиболее важных показателей климата. Как

и континентальность, вариабельность температуры в области распространения темнохвойных лесов возрастала на северо-восток, причём при нелинейной связи, подобной показанной на *рис. 3*, наблюдалось резкое уменьшение NDVI этих лесов при значениях вариабельности температуры больше 11,3 °C (диапазон 9,3–12,1 °C). Отметим, что связь NDVI с годовой потенциальной эвапотранспирацией не была тесной ($r_s = 0,691$), но NDVI темнохвойных лесов оказался тесно связан с потенциальной эвапотранспирацией октября ($r_s = 0,737$) — месяца перехода к отрицательным температурам в регионе.

Обращает на себя внимание то, что для темнохвойных лесов летние значения NDVI более тесно связаны с зимней температурой, чем с летней (*рис. 4*).

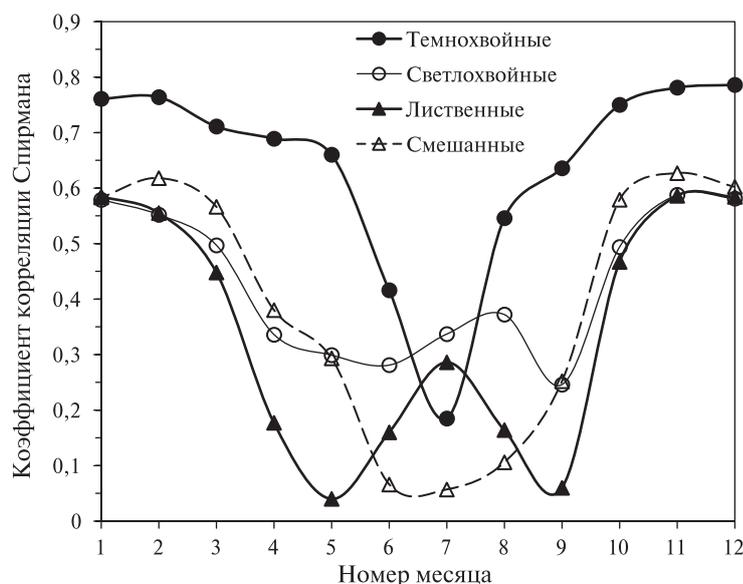


Рис. 4. Зависимость связи летнего NDVI со среднемесячной температурой для разных групп леса

Ясно, что летний NDVI лесов не только зависит от климата вегетационного периода, но формируется и зимой вследствие влияния морозов на деревья (закалка, повреждения). Однако в литературе иногда ограничиваются рассмотрением связей летнего NDVI с климатическими условиями вегетационного периода, *априори* считая их наиболее важными. В то же время отмечается, что радиальный прирост лиственницы в Центральной Якутии тесно связан с зимней температурой и практически не зависит от летней (Федоров, Десяткин, 2016). По этой причине следует обратить внимание на эффекты так называемой *зимней засухи* (Вальтер, 1982). Речь идёт о косвенном воздействии мороза, который блокирует всасывание воды корнями и передвижение её от корней к транспирирующим органам. Транспирация при низкой температуре невелика, но вполне измерима не только у вечнозелёных, но и у листопадных пород. Ей особенно способствует сильная солнечная радиация, если выступающие над снегом части побегов приобретают высокую избыточную температуру. Из-за транспирации при отсутствии передвижения воды наблюдается медленное обезвоживание органов растений, особенно поздней зимой, когда температура воздуха уже повышается и солнечная радиация возрастает, но почва ещё не оттаяла. Поэтому повреждения от зимней засухи проявляются не в разгар зимы, а позже, в вегетационный период.

Для лиственных лесов эти явления в определённой мере компенсируются в летний период, благоприятные условия которого на протяжении ряда лет способствуют увеличению их NDVI; поэтому для лиственных лесов на *рис. 4* виден летний пик. Тем не менее основное влияние и на NDVI лиственных пород в регионе оказывают многолетние климатические условия не лета, а зимы. То же относится ко всем группам леса в регионе (см. *рис. 4*), хотя наиболее отчётливо это выражено для темнохвойных лесов.

Индекс NDVI относительно слабо связан с дефицитом воды $W = E_0 - E$ для *всего* региона; в регионе W лежит в диапазоне 105–373 мм/год при среднем 185 мм/год, возрастая на юго-восток, где располагается степная зона. Однако для южной части ареала распространения данной породы деревьев дефицит воды важен, поскольку в конечном счёте приводит к исчезновению породы. В регионе темнохвойные (еловые) леса не встречаются при $W > 251$ мм/год, смешанные — при $W > 254$ мм/год, светлохвойные (сосновые) — при $W > 282$ мм/год и лиственные — при $W > 326$ мм/год. Однако это лишь граничные значения. Из-за размытости южной границы и наличия лесных островков на юге региона (например, Бузулукский бор) эти данные неточно характеризуют типичные значения дефицита воды для южной границы ареалов распространения пород в пределах региона; кроме того, они в значительной мере относятся к группам (таким как лиственные леса), а не к конкретным породам.

В США проводились систематические исследования значений дефицита воды W (или E/E_0) в южной части ареалов распространения различных видов деревьев с целью определения условий их исчезновения при глобальном потеплении (Lutz et al., 2010). Поскольку, как уже отмечалось, температура и осадки не характеризуют сухость климата, эти данные важны. Пока подобные сведения не собирались в России. Для получения такой информации лучше анализировать леса той части региона, которая включает южную границу ареала распространения данной породы. С ростом температуры дефицит воды увеличивается даже при постоянных осадках, так как потепление приводит к быстрому росту потенциальной эвапотранспирации E_0 (Lutz et al., 2010). В Волжском бассейне для средней за 50 лет (1950–2000) температуры в регионе E_0 лежит в диапазоне 496–741 мм/год при среднем по региону 593 мм/год, диапазон реальной эвапотранспирации E составляет 331–450 мм/год при среднем 407 мм/год.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00024).

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лурия Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоролог. изд-во, 1956. 256 с.
3. Вальтер Г. Общая геоботаника / пер. с нем. М.: Мир, 1982. 264 с.
4. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Исследование трендов NDVI и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 206–214.
5. Погребняк П. С. Общее лесоводство. 2-е изд. М.: Колос, 1968. 440 с.
6. Федоров П. П., Десяткин А. Р. Связь температурного режима мерзлотных почв и радиального прироста лиственницы в Центральной Якутии // Успехи современного естествознания. 2016. № 7. С. 185–189.
7. Currie D. J. Energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness // The American Naturalist. 1991. V. 137. P. 27–49.
8. Grishin S. Yu. The boreal forests of north-eastern Eurasia // Vegetatio. 1995. V. 121. P. 11–21.
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.
10. 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.
11. Lutz J. A., van Wageningen 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.
12. 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.
13. O'Brien E. M., Field R., Whittaker R. J. Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation, and topography // Oikos. 2000. V. 89. P. 588–600.
14. 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.

15. 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. V. 12. P. 310–320.
16. Tang G., Arnone J. A. III, Verburg P. S. J., Jasoni R. L., Sun L. Trends and climatic sensitivities of vegetation phenology in semiarid and arid ecosystems in the US Great Basin during 1982–2011 // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 6985–6997.
17. Thornthwaite C. W. An approach toward a rational classification of climate // *Geographical Review*. 1948. V. 38. P. 55–94.
18. Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production // *Intern. J. Remote Sensing*. 1986. V. 7. P. 1395–1416.

The relation of forest NDVI to climate in Volga basin

P. A. Shary¹, L. S. Sharaya², L. V. Sidiyakina²

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*

Study of NDVI for dark coniferous, light coniferous, deciduous, and mixed forests and climate features in Volga basin has shown that most strong links between NDVI and climate are observed for dark coniferous forests. The main climate features for all forests were continentality, variability of temperature estimated as its standard deviation, winter temperature, sum of negative temperatures, Kira's coldness index, and snow index. Potential evapotranspiration in October was also important — in November, average temperature changes from positive to negative in the region. The relation of NDVI to average annual temperature was relatively weak, and weaker — with precipitation. The latter is related to that water deficit is not a limiting factor for forests in the region. In general, summer NDVI for all forests was strongly related to winter, rather than summer temperatures. This was better expressed for dark coniferous forests. This may be explained by both winter frosts, and effects of so-called winter drought. The latter is expressed in that at the end of winter when plant roots are still frozen but transpiration is already essential, above-ground parts of plants loose water, and this may be expressed later, during growing season. Maximal values of water deficit (defined as the difference between potential and actual evapotranspiration) were found when forests do not grow: 251 mm/year for dark coniferous forest, 254 for mixed, 282 for light coniferous, 326 for deciduous.

Keywords: NDVI, coniferous and deciduous forests, climate features, winter drought

Accepted: 22.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163

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 Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
2. Budyko M. I., *Teplovoi balans zemnoi poverkhnosti* (Thermal balance of earth surface), Leningrad: Gydrometeorologicheskoe izd., 1956, 256 p.
3. Walter H., *Obshchaya geobotanika* (General geobotanics), Moscow: Mir, 1982, 264 p.
4. Varlamova E. V., Solovyev V. S., *Issledovaniye trendov NDVI i fenologicheskikh parametrov rastitel'nosti merzlotnogo regiona Sibiri po sputnikovym nabludeniyam* (Study of NDVI trends and vegetation phenological parameters in permafrost region of Siberia by satellite observations), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 206–214.

5. Pogrebnyyak P. S., *Obshchee lesovodstvo* (General forestry), Moscow: Kolos, 1968, 440 p.
6. Fedorov P. P., Desyatkin A. R., Svyaz' temperaturnogo rezhima merzlotnykh pochv i radial'nogo prirosta listvennitsy v Central'noi Yakutii (Dependence of larch radial increment on permafrost soil temperature regime in the Central Yakutia), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No. 7, pp. 185–189.
7. Currie D. J., Energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness, *The American Naturalist*, 1991, Vol. 137, pp. 27–49.
8. Grishin S. Yu., The boreal forests of north-eastern Eurasia, *Vegetatio*, 1995, Vol. 121, pp. 11–21.
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.
10. 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, Vol. 40, pp. 41–56.
11. 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, Vol. 37, pp. 936–950.
12. 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.
13. O'Brien E. M., Field R., Whittaker R. J., Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation, and topography, *Oikos*, 2000, Vol. 89, pp. 588–600.
14. 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.
15. 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.
16. Tang G., Arnone J. A. III, Verburg P. S. J., Jasoni R. L., Sun L., Trends and climatic sensitivities of vegetation phenology in semiarid and arid ecosystems in the US Great Basin during 1982–2011, *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, pp. 6985–6997.
17. Thornthwaite C. W., An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, 1948, Vol. 38, pp. 55–94.
18. Tucker C. J., Sellers P. J., Satellite remote sensing of primary production, *Intern. J. Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, pp. 1395–1416.