АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2024, том 30, № 2 (99), с. 36-44

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

*УДК 630*561.24;528.854*

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ДЕНДРОХРОНОЛОГИИ

© 2024 г. Н.В. Рыгалова*, Т.Г. Плуталова, Я.В. Мартынова***

**Алтайский государственный университет*
Россия, 656049, Алтайский край, г. Барнаул, просп. Ленина, д. 61. E-mail: natalia.ml@mail.ru
***Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН*
Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. E-mail: plutalova.tg@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2023. После доработки 30.11.2023. Принята к публикации 01.12.2023.

Исследование посвящено сопряженному анализу продуктивности травянистых и древесных растений различных ландшафтных сообществ (типичных степных, засоленных, древесных и агрокультурных) в засушливых условиях юга Западной Сибири, выполненного разными методами: дистанционным (анализ вегетационных индексов NDVI) и дендрохронологическим (анализ стволового прироста в ширину сосны обыкновенной (*Punus sylvestris* L.) из экстразональных ленточных боров). Установлены климатические факторы, определяющие динамику NDVI и радиального прироста деревьев в степной зоне, это ограничивающее воздействие летних температур и положительное влияние атмосферных осадков прошлого зимнего и текущего летнего сезонов. Анализ вегетационных индексов и радиального прироста деревьев показал наличие умеренной связи между ними: NDVI мая и июля травянистых сообществ (ковыльно-типчаковых, пахотных угодий) коррелируют с шириной годичных колец деревьев. Выявлено, что ширина радиального прироста сосны в засушливой степи зависит от величины NDVI кроны древостоя в мае двумя годами ранее.

Ключевые слова: NDVI, продуктивность, радиальный прирост деревьев, ленточный бор, степная зона, юг Западной Сибири.
DOI: 10.24412/1993-3916-2024-2-36-44
EDN: PGYINH

В настоящее время изучение продуктивности растительных сообществ является не только экологической тематикой, но и затрагивает экономические аспекты, определяемые связыванием углерода в экосистеме. Сделана попытка исследовать это многофакторное явление для нескольких растительных сообществ степной зоны с использованием различных методов. Нормализованный дифференцированный вегетационный индекс (NDVI) является одним из наиболее популярных вегетационных индексов и активно используется для широкого круга задач, связанных с дистанционным мониторингом растительности (Барталев и др., 2016). Он измеряет долю поглощенной растительностью фотосинтетически активной радиации и может быть использован как показатель валового первичного производства – GPP (Berner et al., 2011). Однако применение вегетационных индексов ограничено периодом последних десятилетий. Анализ более длительных изменений NDVI возможен с помощью реконструкции на основе привлечения таких многолетних прокси-данных, как годичные кольца деревьев. Целью работы является исследование связи между двумя показателями продуктивности (валовой первичной, определяемой через NDVI, и стволовой). Известно, что ширина радиального прироста деревьев положительно коррелирует с GPP (Liu et al., 2023) и чистой продуктивностью (NEP) экосистемы (Rocha et al., 2006).

Использование дендрохронологических рядов для восстановления вегетационных индексов прошлых лет апробировано и использовалось ранее (Li et al., 2021; Liu et al., 2021; Qin et al., 2022; Wang et al., 2010). Эти и другие исследования (Berner et al., 2011; Wong et al., 2021; Kaufmann et al., 2008; Lopatin et al., 2006; Vicente-Serrano et al., 2020; Wen et al., 2022) посвящены анализу взаимосвязи радиального годичного прироста и NDVI кроны деревьев. При этом изучение связи древесно-

кольцевых хронологий (ДКХ) с временной изменчивостью вегетационного индекса травянистой растительности, произрастающей в одном районе, позволяет оценить возможность реконструкции последней. Работ в этом направлении гораздо меньше (He, Shao, 2006; Liang et al., 2005; Chen et al., 2012). Поиск связей между вегетационными индексами, полученными дистанционными методами для большой территории, но для короткого промежутка времени, и шириной радиального прироста деревьев, которая определяется наземными способами для локальных территорий, при этом характеризуется более широким временными диапазон данных, имеет фундаментальное и прикладное значение. Важность подобного рода работ отмечалась ранее (Bunn et al., 2013).

Материалы и методы

Для оценки образования зеленой биомассы использован стандартный продукт спектрорадиометра MODIS/TERRA MOD13Q1 (16-дневный композит с пространственным разрешением 250 м; Welcome to GloVis, 2023; MODIS …, 2023), который считается наиболее эффективным при изучении растительного покрова в оптическом диапазоне спектра (Барталев и др., 2016). Непрерывный временной и территориальный ряд данных обеспечили 190 снимков, обработка которых проводилась в QGIS 3.28.3.

Основу изучения и оценки продуктивности и состояния растительных сообществ образуют методы расчета вегетационных индексов, представляющих собой комбинации спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. В представленном исследовании для анализа используется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (англ. «Normalized Difference Vegetation Index»; Huete et al., 2011). Этот индекс эффективен при использовании на степных и умеренно залесенных территориях.

Для оценки продуктивности различных растительных сообществ степной зоны Западной Сибири (в границах Алтайского края) выбрано шесть условных полигонов дискретного типа (рис. 1), пять из которых – это территории с естественной растительностью, а один – обрабатываемые земли (Пашня). Для каждого полигона в 10 точках определены NDVI за вегетационный период: дважды в месяц с мая по сентябрь за период 2000-2018 гг. Три полигоны (Новокормиха, Ащегуль и Касалгач) были выделены на территории памятников природы краевого значения («Балочная система в Новокормихе» и «Древнее русло реки в Ащегуле», образованных в 2014 г., «Озеро Куричье и урочище Касалгач» – в 1998 г.). Полигоны Пашня и Прибрежная растительность (далее – Прибрежная) характеризуются широким пространственным охватом точек и, как следствие, высоким ландшафтным разнообразием (табл. 1). Полигон Бор приурочен к территории сбора образцов древесины для построения древесно-кольцевой хронологии.

В качестве климатических данных были использованы ряды месячных значений температуры и осадков метеостанции Славгород (Специализированные массивы, 2023), на основе ее суточных данных рассчитан гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК).

Хронология ширины годичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Волчиха (W; (рис. 2) получена на участке ленточного бора (табл. 1), в зональном плане приуроченного к засушливой степи юга Западной Сибири. Сбор буровых кернов деревьев проводились по общепринятой методике (Методы дендрохронологии, 2000), измерение выполнялось на установке LINTAB 6 (TSAP-Win), стандартизация индивидуальных серий выполнялась в программе Arstan. Для изучения связей были использованы стандартная (std) и остаточная (res) древесно-кольцевые хронологии (ДКХ), последняя характеризуется минимальной автокорреляцией. Оценка связи производилась путем расчета коэффициентов корреляции Пирсона (r), в работе представлены только статистически значимые показатели (при $p < 0.05$).

Результаты и обсуждение

Значение NDVI различных растительных сообществ изменяется в течение вегетационного периода (рис. 3). Максимум значений NDVI для всех выбранных полигонов приходится на июль (для Бора в отдельные годы максимум приходится на июнь или июль). Высокие медианные значения NDVI июля и их размах характерны для полигонов, которые приурочены к эрозионным ложбинам: Новокормиха – балка с небольшими участками березово-осинового леса, Ащегуль – заросшее русло пересохшего водотока (рис. 4). Минимальные значения NDVI отмечены в галофитных сообществах

(Прибрежная, Касалгач). Бор отличается наиболее высокими медианными значениями NDVI июля и небольшим размахом значений. Июльский NDVI Пашни демонстрирует выраженный размах значений, что объясняется чувствительностью агроценозов к увлажнению в степной зоне, с одной стороны, и большой территориальной разобщенностью точек полигона – с другой. Кластерный анализ июльских серий NDVI также сгруппировал полигоны по величине индекса и размаху.

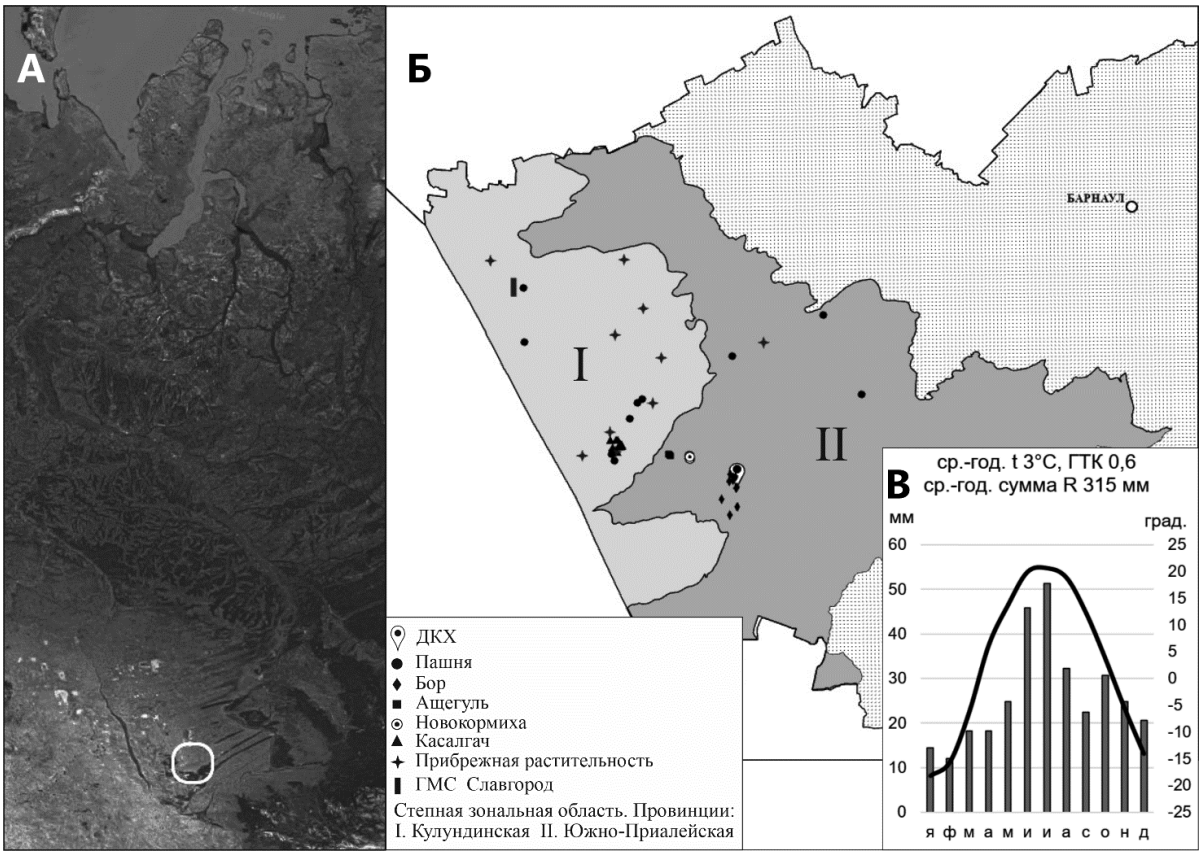

Рис. 1. Территория исследования. *Условные обозначения:* А – локация исследования в пределах Западной Сибири (Google.Earth, 2023), Б – Ландшафтная привязка объектов исследования (Ландшафтная карта …, 2016), В – Климатограмма по ГМС Славгорода, 2000-2018 гг. (Специализированные массивы, 2023).

В основе изучения связи между вегетационными индексами растений и ежегодным приростом деревьев, произрастающих в одной природной зоне, находится общий климатический фон, который лимитирует стволовую продуктивность деревьев и образование зеленой биомассы. Выявлена сильная связь ГТК Селянинова за вегетационный период с месячными рядами NDVI и осредненными за май-сентябрь (максимальный r = 0.81 по Пашне), умеренная связь с ДКХ (r = 0.6). Кроме того, для NDVI значимой является температура октября прошлого года (отрицательная связь), температура января определяет уровень NDVI мая, а февраля – NDVI июня (положительная связь). Рост температуры июня и июля понижает NDVI в степи (отрицательная связь). Корреляционный анализ вегетационных индексов Бора с рядами летних температур связи не показал, но выявлена отрицательная зависимость радиального прироста (ДКХ) сосны от температуры июня (табл. 2). Связь NDVI растений с осадками в степной зоне практически всегда является положительной: обнаружены значимые связи вегетационных индексов с осадками октября-декабря прошлого года и частично января и февраля текущего (сохранение почвы от вымерзания) и осадками теплого периода года (прежде всего, июня и июля) и за гидрологический год. Только для сообществ, расположенных в понижениях (Ащегуль и Новокормиха), обнаружилась обратная связь значений NDVI июня и июля с осадками в марте: обильные снегопады в начале календарной весны приводят к более позднему сходу снега из-за задерживания в овражной системе и замедляют вегетацию.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования по полигонам (ландшафтное описание дано по «Ландшафтной карте Алтайского края» (2016)).

Название точки	Географические координаты	Абс. высота, м н.у.м. БС	Ландшафтная характеристика	
			Подпровинция / провинция	Тип местности (количество точек)
ДКХ				
Волчиха (W)	51° 58' 56" с.ш., 80° 28' 39" в.д.	220	Засушливо-степная Южно-Приалейская	Днища ложбин древнего стока бугристо-грядовые на дерново-слабоподзолистых почвах
Вегетационные индексы				
Бор	51° 50' - 52° 02' с.ш., 80° 21'-80° 28' в.д.	202-219	Засушливо-степная Южно-Приалейская	Днища (6), равнины дельт (3) и склоны (1) ложбин древнего стока
Пашня	52° 07' - 52° 59' с.ш., 78° 43'-81° 29' в.д.	123-283	Сухостепная Кулундинская	Озерно-аллювиальные равнины (6), склоны озерных котловин пологие (1)
			Умеренно засушливо-степная Южно-Приалейская	Плоские и слабоволнистые водораздельные поверхности плато (1)
			Засушливо-степная Южно-Приалейская	Днища ложбин древнего стока (1), склоны ложбин древнего стока (1)
Прибрежная	52° 08' - 53° 08' с.ш., 78° 27'-80° 42' в.д.	87-156	Сухостепная Кулундинская	Низкие озерные террасы с солонцово-солончаковыми лугами (4), высокие древние озерные террасы с типчаково-ковыльными сухими степями (1) и с галофитными группировками (1), склоны озерных котловин с полынно-типчаковыми сухими степями (2), озерно-аллювиальные равнины с типчаково-ковыльными сухими степями (1)
			Засушливо-степная Южно-Приалейская	Днища ложбин древнего стока с солонцово-солончаковыми и остепненными лугами (1)
Ащегуль	52° 08'- 52° 09' с.ш., 79° 55'-79° 56' в.д.	192-202	Сухостепная Южно-Приалейская	Пологие слаборасчлененные склоны плато с полынно-типчаково-ковыльными степями (10)
Новокормиха	52° 07' - 52° 08' с.ш., 80° 05' в.д.	254-288	Сухостепная Южно-Приалейская	Пологосклонные долины и балки с широкими днищами с разнотравно-злаковыми лугами (2)
			Засушливо-степная Южно-Приалейская	Расчлененные склоны плато с разнотравно-злаково-полынно-типчаковыми степями (3), плоские водораздельные поверхности плато с разнотравно-типчаково-ковыльными степями (5)
Касал-гач	52° 09'- 52° 13' с.ш, 79° 27'-79° 32' в.д.	127-131	Сухостепная Кулундинская	Высокие древние озерные террасы пониженные с галофитными группировками (4), низкие озерные террасы плоско-западинные с солонцово-солончаковыми лугами (2), склоны озерных котловин с полынно-типчаковыми степями (4)

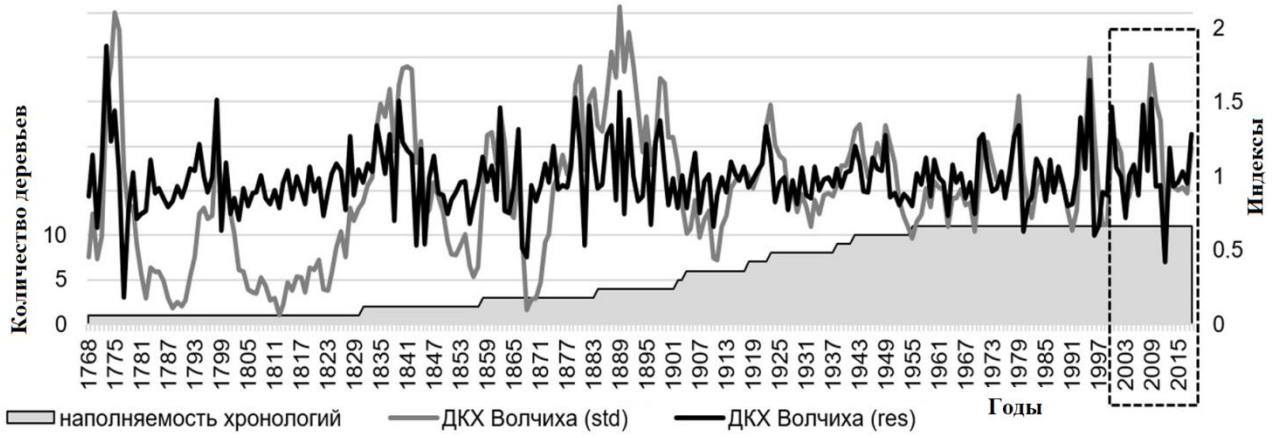

Рис. 2. Древесно-кольцевые хронологии Волчиха – стандартная (std) и остаточная (res); выделенный период хронологии использован в работе.

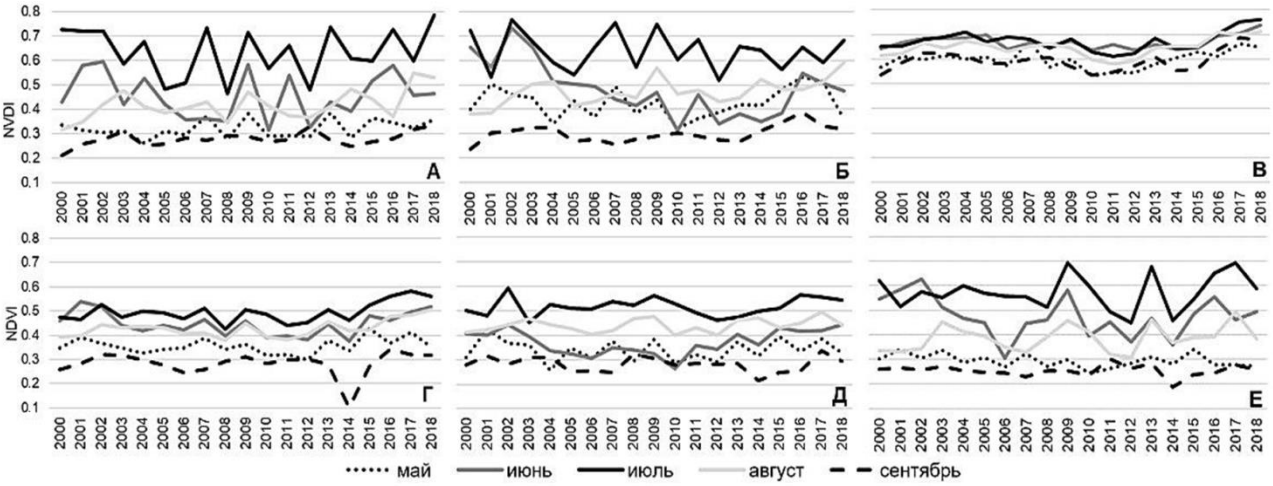

Рис. 3. Динамика NDVI с мая по сентябрь за период 2000-2018 гг. по полигонам исследования (А – Ащегуль, Б – Новокормиха, В – Бор, Г – Касалгач, Д – Прибрежная, Е – Пашня).

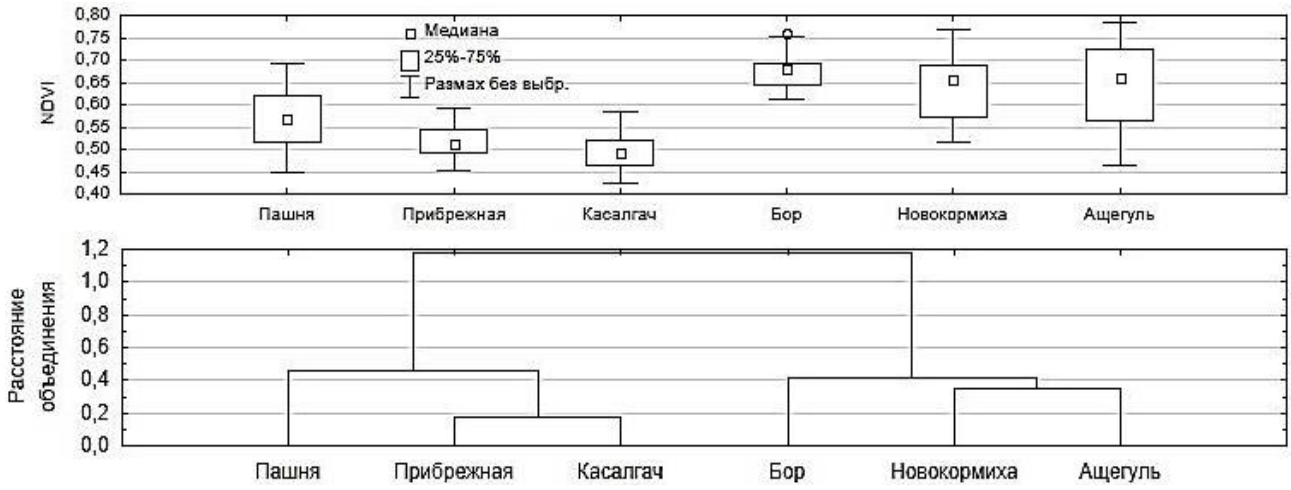

Рис. 4. Статистическая характеристика рядов NDVI мая разных полигонов и их кластерная группировка (правило объединения: метод Варда, мера близости: Евклидово расстояние).

Корреляционный анализ показал, что значения NDVI и прирост по радиусу сосны в засушливых условиях степи лимитированы одинаковыми климатическими факторами. Это позволяет проводить их дальнейшее сопряженное изучение. Для выявления связи с рядами NDVI были использованы стандартная и остаточная хронологии, при этом первая практически не показала статистически значимых связей и была исключена из дальнейшего анализа.

Между ДКХ Волчиха и вегетационными индексами полигонов Прибрежная и Касалгач (галофитная растительность) связи не выявлено. Оставшиеся полигоны (кроме Бора) продемонстрировали связь июльского NDVI с радиальным приростом сосны обыкновенной. Кроме этого по Ащегулю, который представляет собой ковыльно-типчаковую степь, также была выявлена связь NDVI мая с ДКХ (табл. 3). В целом вегетационные индексы этого полигона показали наиболее тесную связь с древесно-кольцевыми данными, что, вероятнее всего, определяется ландшафтной однородностью территории (все 10 точек расположены в одном типе местности (табл. 1)). Остальные полигоны имели более мозаичную структуру: по полигонам было объединено от 3 типов местностей (Бор, Новокормиха) до 9 (Прибрежная).

Таблица 2. Связь значений NDVI и ДКХ с метеоданными ГМС Славгорода за период 2000-2018 гг.

Метеоданные / NDVI/ ДХК		ГТК	Температура воздуха													Атмосферные осадки												
			X-1*	XI-1	XII-1	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	г. год	X-1	XI-1	XII-1	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	г. год
Нормализованный разностный вегетационный индекс																												
Ащегуль	V																											
	VI																				–							
	VII										–	–									–							
	VIII		–																									
	IX																											
	V-IX										–	–									–							
Новокормиха	V																											
	VI		–																		–							
	VII										-																	
	VIII																											
	IX		–																									
	V-IX											–									-							
Касалгач	V		–																									
	VI		–								–																	
	VII																											
	VIII																											
	IX																											
	V-IX		–																									
Прибрежная	V		–																									
	VI		–																									
	VII																											
	VIII																											
	IX																											
	V-IX		–								–																	
Пашня	V																											
	VI										–																	
	VII										–																	
	VIII																											
	IX																											
	V-IX										–	–																

Продолжение таблицы 2.

Метеоданные / NDVI/ДКХ		ГТК	Температура воздуха													Атмосферные осадки											
			X-1*	XI-1	XII-1	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	г. год	X-1	XI-1	XII-1	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	г. год
Бор	V		–																								
	VI																										
	VII																										
	VIII																										
	IX		–																								
	V-IX		–																								
Древесно-кольцевая остаточная хронология																											
Волчиха W(res)											–																

Примечания к таблице 2: светло-серый цвет – коэффициенты корреляции |0.46| - |0.59| (порог статистической достоверности при $p < 0.05$), т.е. слабо умеренная связь; темно-серый – |0.6| - |0.69|, выраженная умеренная связь; черный – > |0.7|, сильная связь; минус – отрицательная зависимость; **X-1*** – «-1» в наименовании календарных месяцев обозначает использование данных прошлого года.

Связь древесно-кольцевой хронологии сосны с рядами NDVI Бора год в год не прослеживалась. Сдвижка на 2 года позволила получить статистически значимую корреляцию рядов вегетационного индекса в мае с ДКХ. Сдвиг в 2 года можно объяснить тем, что процесс трансформации поглощенного кроной углерода в годичное кольцо дерева занимает значительное время. Эффект запаздывания между этими процессами уже отмечался ранее (Kaufmann et al., 2008; Wong et al., 2021), как и то, что засухи, которые часто наблюдаются в степной зоне, могут влиять на скорость поглощения и ассимиляции углерода в экосистеме (Bond-Lamberty et al., 2012).

Установленная умеренная (но недостаточная для реконструкции) связь между NDVI и ДКХ определяется тем, что изучаемые процессы не связаны напрямую: существует опосредованный, не учитываемый в исследовании, фактор между элементами организма, которые поглощают и хранят углерод (Kaufmann et al., 2008). Неоднородность на ландшафтном уровне также влияет на взаимосвязь между этими показателями, что отмечалось ранее (Wen et al., 2022).

Таблица 3. Статистически значимые коэффициент корреляции Пирсона (при $p < 0.05$) рядов NDVI растительных сообществ степной зоны с остаточной ДКХ Волчиха (W res).

Месяц	Ащегуль	Новокормиха	Бор	Пашня	Прибрежная, Касалгач
Май, I половина	0.51	–	**0.62***	–	–
Май, II половина	0.51	–	**0.52**	–	
Май	0.63	–	**0.60**	–	
Июль, I половина	0.66	0.46	–	0.53	
Июль, II половина	0.56	0.55	–	0.48	
Июль	0.64	0.58	–	0.53	
Май-июль	0.58	–	–	0.56	
Май-сентябрь	0.48	–	–	0.46	

Примечания к таблице 3: * – жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции со сдвигом ДКХ на 2 года (запаздывание реакции радиального прироста ствола дерева на 2 года относительно ряда NDVI).

Выводы

В ходе работы исследована связь между двумя видами продуктивности растений (валовой первичной, определяемой через NDVI различных растительных сообществ, и стволовой,

характеризующейся через ежегодный радиальный прирост деревьев), которые предопределяются общим лимитирующим воздействием климатических условий в засушливой и сухой степи (дефицит осадков и высокие температуры теплого периода года). Несмотря на ряд ограничений метода, наблюдается умеренная положительная связь между двумя показателями измерения углеродного обмена. Наиболее высокая связь древесно-кольцевой хронологии была зафиксирована с рядами NDVI мая и июля полигона типчаково-ковыльной степи (Ащегуль), однородного в ландшафтном отношении. Связь между NDVI Бора и шириной годичных колец сосен была обнаружена только при временном сдвиге: значение NDVI кроны в мае определяет величину радиального прироста дерева через 2 года. Установлено, что индикационные возможности дендрохронологических данных, полученных для степной зоны, позволяют говорить о восстановлении NDVI не только древесных сообществ, но и травянистых.

Вегетационные индексы и древесно-кольцевая хронология представляют собой разные показатели углеродного обмена: NDVI определяется поглощением углерода, а ширина годичного кольца дерева связана с ассимиляцией углерода. Поиск связи между этими прокси-данными с учетом климатических условий территории позволит уточнить модель накопления углерода в экосистеме степной зоны.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в Алтайском государственном университете, проект № FZMW-2023-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Шабанов Н.В. 2016. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН. 208 с.

Ландшафтная карта Алтайского края. 2016. Масштаб 1:500000 / Науч. рук. Ю.И. Винокуров. Барнаул: ИВЭП СО РАН. 1 л.

Методы дендрохронологии. 2000. Ч. I / Ред. Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов. Красноярск: КрасГУ. 80 с.

Специализированные массивы. 2023. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс http://meteo.ru/data (дата обращения 31.03.2023)].

Berner L.T., Beck P.S., Bunn A.G., Lloyd A.H., Goetz S.J. 2011. High-Latitude Tree Growth and Satellite Vegetation Indices: Correlations and Trends in Russia and Canada (1982-2008) // Journal of Geophysical Research. Vol. 116. P. G01015.

Bond-Lamberty B., Bunn A.G., Thomson A.M. 2012. Multi-Year Lags between Forest Browning and Soil Respiration at High Northern Latitudes // PLoS ONE. Vol. 7 (11). P. e50441.

Bunn A., Hughes V., Kirdyanov A.V., Losleben M., Shishov V., Berner L., Olchev A., Vaganov E.A. 2013. Comparing Forest Measurements from Tree Rings and a Space-Based Index of Vegetation Activity in Siberia // Environmental Research Letters. Vol. 8. 8 p.

Chen Z.-Ju, Li J.-B., Fang K., Davi N., He X.-Y., Cui M.-X., Zhang X., Peng J.-J. 2012. Seasonal Dynamics of Vegetation over the Past 100 Years Inferred from Tree Rings and Climate in Hulunbei'er Steppe, Northern China // Journal of Arid Environments. Vol. 83. P. 86-93.

Wong C.Y.S., Young D.J.N., Latimer A.M., Buckley T.N., Magney T.S. 2021. Importance of the Legacy Effect for Assessing Spatiotemporal Correspondence between Interannual Tree-Ring Width and Remote Sensing Products in the Sierra Nevada // Remote Sensing of Environment. Vol. 265. P. 112635.

Welcome to GloVis. 2023. USGS [Электронный ресурс http://glovis.usgs.gov/ (дата обращения 31.01.2023)].

Google.Earth. 2023. Версия 9.194.0.0 [Электронный ресурс https://earth.google.com/web/ (дата обращения 13.09.2023)].

He J., Shao X. 2006. Relationships between Tree-Ring Width Index and NDVI of Grassland in Delingha // Chinese Science Bulletin. Vol. 51. P. 1106-1114.

Huete A., Didan K., Van Leeuwen W., Miura T., Glenn Ed. 2011. MODIS Vegetation Indices // Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS. P. 579-602.

Kaufmann R., D'Arrigo R., Paletta L.,Tian H., Jolly W., Myneni R. 2008. Identifying Climatic Controls on Ring Width: The Timing of Correlations between Tree Rings and NDVI // Earth Interactions – EARTH INTERACT. Vol. 12. P. 1-14.

Li H., Thapa I., Speer J. 2021. Fine-Scale NDVI Reconstruction Back to 1906 from Tree-Rings in the Greater Yellowstone Ecosystem // Forests. Vol. 12 (10). P. 1324.

Liang E., Shao X., He J. 2005. Relationships between Tree Growth and NDVI of Grassland in the Semi-Arid Grassland

of North China // International Journal of Remote Sensing. Vol. 26. P. 2901-2908.

Liu R., Song Y., Liu, Y., Li X., Song H., Sun Ch., Li Q., Cai Q., Ren M., Wang L. 2021. Changes in the Tree-Ring Width-Derived Cumulative Normalized Difference Vegetation Index over Northeast China during 1825 to 2013 CE // Forests. Vol. 12. P. 241.

Liu N., Wu Z., Du Z., Lei T., Sun B. 2023. Relationship between the Radial Growth of Two Dominant Coniferous Species and GPP in the Arid Region of Northwest China // Forests. Vol. 14 (7). P. 1336.

Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. 2006. Determination of Forestgrowth Trends in Komi Republic (Northwestern Russia): Combination of Tree-Ring Analysis and Remote Sensing Data // Boreal Environment Research. Vol. 11 (5). P. 341-353

MODIS Vegetation Index Products. 2023. NASA [Электронный ресурс https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php (дата обращения 30.01.2023)].

Qin J., Bai H., Zhao P., Fang S., Xiang Y., Huang X. 2022. Dendrochronology-Based Normalized Difference Vegetation Index Reconstruction in the Qinling Mountains, North-Central China // Forests. Vol. 13 (3). P. 443.

Rocha A.V., Goulden M.L., Dunn A.L., Wofsy S.C. 2006. On Linking Interannual Tree Ring Variability with Observation of Whole-Forest CO_2 Flux // Global Change Biology. Vol. 12 (8). P. 1378-1389.

Vicente-Serrano S.M., Martín-Hernández N., Camarero J.J., Gazol A., Sánchez-Salguero R., Peña-Gallardo M., Kenawy A., Domínguez-Castro F., Tomas-Burguera M., Gutiérrez E. et al. 2020. Linking Tree-Ring Growth and Satellite-Derived Gross Primary Growth in Multiple Forest Biomes. Temporal-Scale Matters // Ecological Indicators. Vol. 108. P. 105753.

Wang W.-Z., Liu X.-H., Chen T., An W.-L., Xu G.-B. 2010. Reconstruction of Regional NDVI Using Tree-Ring Width Chronologies in the Qilian Mountains, Northwestern China // Chinese Journal of Plant Ecology. Vol. 34 (9). P. 1033-1044.

Wen Y., Jiang Y., Jiao L., Hou C., Xu H. 2022. Inconsistent Relationships between Tree Ring Width and Normalized Difference Vegetation Index in Montane Evergreen Coniferous Forests in Arid Regions // Trees. Vol. 36. P. 379-391.