

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 630\*561.2:528.855

### ОЦЕНКА СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА В СТВОЛОВОЙ ФРАКЦИИ *PINUS SYLVESTRIS L.* ПО ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ В ЮЖНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Н. В. Рыгалова<sup>@</sup>, Е. Ю. Мордвин, А. А. Бондарович, Д.В. Кириллов

ФГБОУ ВО “Алтайский государственный университет”, Россия, 656049, г.

Барнаул, пр. Ленина 61

@natalia.ml@mail.ru

Дата поступления: 01.08.2025 г.

В работе представлен расчет значений углерода (по дендрохронологическим и лесотаксационным данным), который аккумулируют сосна обыкновенная ленточных боров в стволовой фракции на юге лесостепной зоны Западной Сибири. Ежегодно (в среднем за период 2000–2024 гг.) перестойная сосна секвестрирует в стволе около 2 кг С / год, всего за весь период роста аккумулировано 110 т С<sup>га</sup>. Расчетные значения углерода в стволовой фракции сосны демонстрируют статистически значимые связи с годовыми значениями валовой (и составляют 25.9% от ее величины) и чистой (46.1%) первичной продукции, значения которой получены по данным дистанционного зондирования Земли. В работе приведены факторы климатического контроля показателей, отвечающих за поглощение кроной и накопление углерода в стволе сосной обыкновенной.

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris L.*, ленточные боры, секвестрация углерода, ширина годичных колец, валовая и чистая первичная продукция, NDVI, дистанционное зондирование Земли

#### Введение

Изучение продуктивности лесных геосистем в условиях меняющегося климата является важной прикладной и фундаментальной научной задачей.

Отдельного внимания заслуживает тема секвестрации углерода российскими лесами и возможность ее оценки на разных территориальных уровнях (Малышева и др., 2017). В этой области исследования ключевое место среди методов принадлежит дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ). Однако следует отметить ряд ограничений, связанных с ним: короткий период космических наблюдений, необходимость дополнительного использования наземных методов для верификации результатов. Последнее дает возможность развития междисциплинарных связей и может быть представлено различными методическими вариациями. Применение дендрохронологического метода в совокупности с дистанционным является одним из трендов исследований лесных геосистем в последнее время (Матвеев, Литовченко, 2023; Рыгалова и др., 2024а; Bunn *et al.*, 2013; Lopatin *et al.*; 2006; Kaufmann *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2024; Wong *et al.*, 2021). В литературе (прежде всего зарубежной) представлены исследования связей радиального прироста деревьев и различных вегетационных индексов, среди которых наиболее популярным является NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) (Рыгалова и др., 2024б; Суховольский и др., 2023; Bunn *et al.*, 2013; Kaufmann *et al.*, 2004; Lopatin *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2024; Wong *et al.*, 2021). Также в качестве дистанционных показателей выступают параметры первичной продукции (ПП) древостоя: (валовая (GPP) и чистая (NPP) первичная продукция, чистый фотосинтез (PSNnet) (Chiesi *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2017; Wong *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

Объектом исследования являются ленточные боры Алтайского края, которые располагаются на южной границе зонального ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на юге Западной Сибири [Правдин, 1964]. Ранее были исследованы связи между древесно-кольцевыми хронологиями (ДКХ) сосны степной части ленточных боров и данными ДЗЗ, которые показали перспективность развития данного направления, одновременно, обозначив неопределенности метода (Рыгалова и др., 2024а; б). Целью представленного исследования является оценка секвестрации углерода в

стволах *P. sylvestris* L. в южной лесостепи по дендрохронологическим данным и сопоставление с показателями продуктивности деревьев, полученных дистанционными методами.

### **Материалы и методы**

Территория исследования относится к зоне умеренного континентального климата со среднегодовой температурой воздуха  $2.2^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup> (в июле:  $20^{\circ}\text{C}$ ; в январе:  $-17^{\circ}\text{C}$ ) и суммой атмосферных осадков – 388 мм. Территория характеризуется как слабо засушливая, приближенная к оптимальным условиям увлажнения (гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) равен 0.91). В ландшафтном отношении участок расположен на склоне бугристо-грядовых ложбин древнего стока на дерново-слабоподзолистых почвах и борových песках южно-лесостепной местности Верхнеобской провинции лесостепной зональной области (Ландшафтная карта, 2016). Абсолютная высота местности около 235 м над ур. м. Модельный участок заложен в Кулундинском ленточном бору (Тюменцевский район Алтайского края) (рис.1). Возрастным буром (Haglof) взяты керны с 45 деревьев (по одному образцу на высоте 1–1.3 м от поверхности земли). Высота деревьев измерялась эклиметром Haglof и составила в среднем 29 м; средний диаметр (с корой) – 42 см. Большая часть образцов (25) получена с деревьев, произрастающих на модельной площадке размером 25 м на 25 м, остальные взяты с сосен, растущих поблизости (максимальное расстояние между обследованными деревьями – 250 м). Породный состав на модельной площадке – 10С, на территории вокруг произрастают также березы и осины. Густота древостоя (экстраполированные данные по модельной площадке) составляет ~ 400 экз. / га.

Дендрохронологические образцы были обработаны по классической методике (Шиятов и др., 2000) с измерением ширины годичных колец на установке LINTAB 6 в программе TSAP-Win. Перед построением обобщенной

---

<sup>1</sup> Здесь и далее для периода 1991-2020 гг. по данным метеостанции Ребриха

ДКХ была проведена выбраковка 5 индивидуальных серий по причине слабой корреляционной связи с остальной выборкой (проверено в Cofecha). При стандартизации серий в программе ARSTAN было использовано два варианта аппроксимации: кубический сплайн  $2/3$  от длины ряда и экспоненциальная функция. Сравнение результатов показало, что наиболее высокие корреляции демонстрируют хронологии, полученные при применении негативной экспоненты, которые и представлены в работе. Стандартная (std) древесно-кольцевая хронология 24Sh показала лучшие результаты (по сравнению с остаточной) как в рамках этого исследования, так и ранее (Рыгалова и др., 2024a; Xu *et al.*, 2017). ДКХ 24Sh имеет длину 188 лет и значительную наполняемость индивидуальными сериями (рис. 2). Коэффициент чувствительности 24Sh составляет 0.15, при этом среднее значение для нестандартизированных (raw) хронологий равно 0.22. В связи с тем, что в работе представлена стандартная ДКХ, коэффициент автокорреляции I порядка равен 0.73.

В качестве дистанционных данных использованы продукты радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутника Terra. Валовая первичная продукция или GPP (gross primary production) является ключевым индикатором углеродного баланса. GPP определяется как общее количество углерода, ассимилированного наземной растительностью в результате фотосинтетических реакций, в единицу времени на единицу площади. Суточные данные PSNnet (net photosynthesis) и годовые значения чистой первичной продукции (NPP (net primary production)) являются непосредственным продуктом фотосинтеза, исключаящего потери углерода в процессе дыхания и обмена вещества через корневую систему (Running, Zhao, 2021). Чистая первичная продукция представляют собой суммарное депонирование углерода во всех фракциях фитомассы (включая подземные, отпад и опад) (Малышева и др., 2017). Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является наиболее часто используемым для анализа состояния растительности, который измеряет количество

фотосинтетически активного пигмента древесных растений (Kaufmann *et al.*, 2004). Для территории исследования были получены наборы данных MOD17A2HGF (8-дневные композиты для GPP/PSNnet) (MOD17A2HGF MODIS), MOD17A3HGF (годовые значения GPP и NPP) (MOD17A3HGF MODIS) с пространственным разрешением 500 м и MOD13Q1 версии 6.1. (16-дневные композиты для NDVI) с разрешением 250 м (Didan, 2021) за период с 2000 по 2024 гг. Расчеты производились по соответствующим формулам (Running, Zhao, 2021; Didan, 2021). Для сравнительного анализа вегетационного индекса с параметрами ПП 8-дневные ряды GPP / PSNnet были пересчитаны (путем суммирования) по аналогичным 16-дневным периодам.

В работе использованы суточные и месячные данные температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1999–2024 гг. по гидрометеостанции (ГМС) Ребриха (Специализированные массивы, 2025), расположенной в 45 км на юго-восток от модельного участка. На основе суточных данных были рассчитаны гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова (Грингоф, Павлова, 2013), суммы осадков и средние температуры за 16-дневные отрезки. Для периода 2000–2024 гг. определены переходы через различные температурные пределы, значения которых приведены в работе.

Для расчета углерода стволовой фракции дерева (С) использована ранее опубликованная формула (Рыгалова, 2024а):

$$C_n = (S_{г.к. n} * H * f) * 0.42 * 0.5,$$

где  $C_n$  – количество углерода, депонированного деревом в год  $n$  (г / год);  $S_{г.к. n}$  – площадь годовичного кольца в год  $n$  (кв. см);  $H$  – высота дерева (см);  $f$  – видовое число; 0.42 (г / куб. см) – плотность абсолютно сухой стволовой древесины сосны обыкновенной; 0.5 – доля углерода в сухом веществе древесины (Руководящие указания, 2003).

Расчет С произведен для каждого дерева в отдельности (38 деревьев) в двух вариантах: с неизменяемой высотой деревьев для периода 2000–2024 гг. (средний возраст выборки деревьев на высоте груди на начало расчетного периода – 142 года) и с меняющейся высотой по мере роста за период 150 лет.

Для второго варианта высота древесных растений была смоделирована для каждого года в регрессивном порядке (от зафиксированной на местности высоты дерева для последнего годичного кольца до высоты 1.3 м для первого годичного кольца в керне) с допущением того, что скорость роста в высоту была одинаковая на протяжении всей жизни дерева. Видовое число для первого варианта определялось по таблице М.Е. Ткаченко (Лесотаксационный справочник, 1980), исходя из высоты каждого древесного растения и коэффициента формы равного 0.62 как среднего для ленточных боров (Павлов, Барабанова, 2005). Видовое число для второго варианта рассчитывалось по формуле (Полякова и др., 2016, с. 102) для каждого порядкового номера годичного кольца до возраста  $\sim 100$  лет (когда расчетные значения видового числа достигали табличных (по Ткаченко)), далее, как для первой модели.

Для оценки общей фитомассы ствола (с последующим пересчетом в эквивалент углерода) использована формула (Иванова и др., 2025), которая аналогична выше описанной.

Для определения взаимосвязей в работе использован метод корреляции Пирсона (все представленные в тексте значения коэффициентов корреляции (если не оговорено иное) значимы при  $p < 0.05$ ), расчеты выполнены в программе Statistica 13.3.

### **Результаты исследования**

Изменение значений секвестрации углерода, полученных по двум моделям (с изменяемой и неизменяемой высотой ( $h$ ) деревьев), представлено на рисунке 3. Тренд изменения количества образуемого углерода за период 2000–2024 гг. слабо выражен (для ряда с изменяемой высотой деревьев  $R^2=0.21$ , для неизменяемой  $R^2=0.02$ ). Среднее значение количества  $C$ , которое образуют старовозрастные (более 140 лет) сосны в южной лесостепи, составляет 2070 г в год / дерево (при изменяемой  $h$ ) и 2190 г в год /дерево (при неизменяемой  $h$ ). Среднее количество углерода, накопленное в стволовой фракции за весь период роста одной сосной (средний возраст 165 лет), на модельной площадке составляет  $\sim 275$  кг  $C$  / дерево (рассчитано по (Иванова и

др., 2025)). Это, согласно расчетной густоте древостоя, соответствует 110 т С / га.

Сопоставление параметров ДЗЗ между собой показало тесные связи между валовой и чистой ПП (как при сопоставлении значений срок в срок, так и годовых значений) (табл.). Связи GPP / PSNnet (NPP) с NDVI характеризуются как слабые, не значимые при уровне достоверности  $p < 0.05$ . Корреляционный анализ расчетных значений С показал наилучший результат со значениями GPP при использовании модели с изменяемой высотой деревьев. Связи углерода в стволовой фракции с NDVI слабые и незначимые.

Таблица. Характеристика связи первичной продукции, вегетационного индекса NDVI и расчетного углерода в стволовой фракции *P. sylvestris* L. за период 2000–2024 гг.

	Срочные (16-дневные) значения (срок в срок)		Годовые значения		
	GPP	PSNnet	GPP	NPP	NDVI
NPP	<b>0.96</b>		<b>0.94</b>		
NDVI	0.33	0.32	0.21	0.14	
Углерод (с измен. / неизмен. высотой)			<b>0.51/0.42</b>	<b>0.41/0.33</b>	0.14/0.11

Примечание: **жирным шрифтом** выделены значения коэффициентов корреляции статистически значимых при  $p < 0.05$

Связь древесно-кольцевой хронологии 24Sh и значений секвестрации углерода в стволе дерева с дистанционными данными ПП и NDVI была проанализирована по 16-дневным интервалам. Установлена статистически значимая корреляционная зависимость между радиальным приростом дерева и величиной GPP и PSNnet за период с 10 по 25 июня (0.47 и 0.45 соответственно), в эти же сроки отмечена связь расчетных значений С с валовой и чистой первичной продукцией (0.59 и 0.57 соответственно). С NDVI оба показателя демонстрируют значимые связи (0.51 (С) и 0.43 (ДКХ)) в

первой половине августа (28 июля – 12 августа), а также с ДКХ в период перехода температуры воздуха через  $+10^{\circ}\text{C}$  (23 апреля – 8 мая) (0.45). Годовые значения GPP / NPP и NDVI с хронологией ширины годовых колец статистически значимых корреляционных связей не показали.

Анализ факторов климатического контроля проведен по результатам корреляционного анализа параметров ПП и NDVI с метеорологическими условиями. Наблюдается тесная выраженная связь с термическим режимом территории (рис. 4). Значимая статистическая зависимость GPP / PSNnet от средней температурой воздуха прослеживается срок в срок, практически на протяжении всего периода с положительными среднесуточными температурами (прежде всего для фотосинтеза). При переходе среднесуточной температуры через  $15\pm 1^{\circ}\text{C}$  связь параметров первичной продукции от температуры воздуха становится отрицательной. Значения NDVI показали положительную зависимость от термического режима срок в срок в марте и апреле, когда среднесуточные температуры колеблются, приблизительно, от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $5^{\circ}\text{C}$ , и во второй половине октября, когда дерево находится в стадии подготовки к зимнему покою. Для NDVI отмечено наличие “отложенного” влияние температур, которое проявляется через 2 недели (в мае, средний  $r = 0.5$ ) и через несколько месяцев (температура в конце мая–начале июля отрицательно влияет на NDVI августа и первой половины сентября). Отмечено общее для всех дистанционных параметров положительное влияние январских температур на значения GPP / PSNnet / NDVI в период с 23 апреля по 8 мая, когда начинается активная фаза вегетации (переход через  $+10^{\circ}\text{C}$ ).

Значимость температурного режима для показателей продуктивности, отвечающих за поглощение углерода, просматривается в их выраженной сезонной согласованности. Так, ПП соснового бора характеризуется стремительным увеличением значений с конца марта – начала апреля (переход через  $0^{\circ}\text{C}$  в среднем приходится на 2 апреля), достигая максимума в середине июня, и последующим более плавным снижением до ноября с небольшим повышением в августе (рис. 5). Стоит отметить, что максимум значений GPP

и PSNnet во времени опережает максимум средних температур, который приходится на июль (19.4°C). Сезонный ход средних значений NDVI имеет более симметричную (относительно ПП) форму с максимумами 26 июня – 3 июля и 28 июля – 4 августа, что в целом соответствует сезонному температурному ходу.

Корреляционный анализ показателей ПП и NDVI с атмосферными осадками не показывает выраженных связей срок в срок, за исключением двух временных отрезков в начале и конце вегетации древесных растений: 23 апреля–8 мая (для GPP/PSNnet,  $r = -0.52$ ) и 16–31 октября (все параметры,  $r = -0.54$ ).

По причине низкой чувствительностью стандартной ДКХ для нее установлено минимальное количество статистически значимых дендроклиматических связей: только с температурой мая предыдущего (-0.61) и текущего (-0.47) года. Зависимость расчетного углерода стволовой фракции (модель с учетом меняющейся высоты деревьев) от метеопоказателей аналогична вышеописанной и зафиксирована только от температуры мая предыдущего года (-0.58) и апреля (0.41) текущего.

### **Обсуждение результатов**

Ключевым вопросом, который определяет достижимость поставленной цели, является возможность использовать древесно-кольцевые данные для оценки секвестрации углерода в стволах деревьев с последующим масштабированием до уровня древостоя. Потенциал этого подтверждается связями между расчетными значениями С (на основе дендрохронологических рядов) и параметрами ПП (валовой и чистой). Расчетные значения С меньше значений валовой (составляют 25.9% от GPP) и чистой (46.1% от NPP) первичной продукции, полученных дистанционно. Подобные расхождения отмечались ранее для расчетных данных и данных, полученных с вышек мониторинга потоков углерода, и практически сопоставимы с ними по величине (для разных участков расчетные величины показывали от 1.7% до 23.8% от зафиксированной GPP (Kannenber *et al.*, 2025)). Отмечаем, что ряд

NPP отражает накопление биомассы как надземной, так и подземной частей растений (Kirschbaum *et al.*, 2001), а в наших расчетах мы оперируем только углеродом стволовой фракции. По некоторым оценкам (Иванов, Борисов, 2024), на долю ствола в спелых древостоях в лесостепной зоне может приходиться 76–80 % всей фитомассы. Важно отметить, что GPP древостоя, который фиксируется спутниками, может представлять собой углерод, зафиксированный древесными видами подлеска или лиственными деревьями (Kannenberg *et al.*, 2025) (на участке 500 м x 500 м произрастают березы и осины), которые не включены в выборку. Эти и другие неопределенности вносят свой вклад в различия между расчетными и зафиксированными по космоснимкам показателями.

Выше указанный процент расчетного С от значений GPP и NPP, полученных с помощью ДЗЗ, не является постоянным от года к году и характеризуется коэффициентами вариации 15–16%. На изменчивость этого показателя оказывают температуры мая текущего ( $r = -0.45$  (NPP) и  $-0.50$  (GPP)) и прошлого ( $r = -0.48$  и  $-0.51$  соответственно) года, а также количество осадков прошлого мая ( $r = 0.47$  и  $0.42$  соответственно). Это указывает на то, что высокие температуры и недостаток увлажнения (засуха) в начале вегетационного периода прошлого и текущего года уменьшают процент продуцируемого деревом углерода, который идет на формирование ствола. Влияние засух (и ее пролонгированный эффект) на роста дерева и связанного с ним накопления углерода указывалось ранее (Kannenberg *et al.*, 2025).

Наибольший вклад в интенсивность камбиальной активности и накопление углерода в стволе дерева вносит ПП, образованная в середине июня, когда активно формируется ранняя древесина, преобладающая в годичном кольце. Корреляция расчетных данных С и годовых значений первичной продукции показало наличие статистически значимой связи (см. табл.), которая видна при графическом сопоставлении (рис. 6). При этом наиболее высокая связь отмечена для пары С/GPP ( $r = 0.51$ ), несмотря на то, что NPP в большей степени должна отвечать расчетному показателю. Ранее

отмечалось (Muller *et al.*, 2011), что при дефиците влаги связи между доступностью углерода и ростом органов дерева ослабевают или изменяются. Это указывает на второстепенность роста древесины в условиях дефицита влаги по сравнению с другими физиологическими процессами дерева. Учитывая, что за период исследования снижение ГТК на одно стандартной отклонение наблюдалось в 26% случаев (т.е. каждый четвертый год), это на наш взгляд, могло нарушать связи между чистой первичной продукцией и ростом древесины, сделав их менее линейными.

Радиальный прирост и рассчитанное на его основе аккумулированное количество углерода в стволовой фракции сосны связаны с NDVI достаточно слабо. Установлены отдельные статистически значимые коэффициенты корреляции по 16-дневным временным интервалам (например, в конце июля – начале августа, когда наблюдается второй пик вегетационного индекса (см. рис. 3). Подобные слабые зависимости с повышением тесноты связи в периоды пиковых значений NDVI отмечались ранее (Kaufmann *et al.*, 2004).

При сдвиге рядов для установления “эффекта запаздывания” значений, отвечающих за накопление органического вещества (ширина годичных колец, С) относительно данных, определяющих поглощение углерода (GPP/PSNnet (NPP)/NDVI) по 16-дневным периодам наблюдались единичные случаи повышения связи между ними с задержкой в 1 и 2 года без выявления определенных закономерностей. Сопоставление годовых значений при смещении не обнаружило статистически значимых связей.

Особенности климатического контроля первичной продукции деревьев определяются термическим фактором, который меняет свое влияние со стимулирующего до лимитирующего (последнее проявляется в период максимальных (выше +15°C) летних температур). При чем PSNnet в наибольшей степени лимитирован температурным фактором, чем GPP (см. рис. 4). Нами не зафиксировано выраженного влияния атмосферных осадков и увлажнения (определяемое по ГТК) на формирование первичной продукции. Известно (Суворова, 2016), что сосна обыкновенная характеризуется высокой

устойчивостью нетто-фотосинтеза хвой к экстремально низкой влажности почвы. Связь GPP / PSNnet и NDVI (наиболее выражена для последнего) с температурой января может быть объяснима риском промерзания почвы в условиях малоснежной зимы или повреждения хвой, что может влиять на продуктивность деревьев в начале вегетации. Подобная зависимость описана ранее для NDVI (Шарый и др., 2020).

Дендроклиматический анализ полученной древесно-кольцевой хронологии показал значимость для роста дерева только температуры мая (отрицательная связь), что усиливает дефицит влаги, необходимой для активизации всех физиологических процессов в начале вегетации. Отсутствие связей с осадками может быть объяснено потенциальным наличием почвенно-грунтового увлажнения в ленточных борах. Таким образом, можно заключить, что стволовой рост древесных растений и поглощение углерода лесом (первичная продукция) имеют разные климатические регуляторы. Так, температура воздуха в мае оказывает положительное воздействие на производство валовой и чистой первичной продукции, одновременно сдерживая радиальный прироста ствола. Формирование древесины может быть больше ограничено другими причинами, чем доступностью углерода от фотосинтеза (Muller *et al.*, 2011; Kannenberg *et al.*, 2025).

Стоит отметить, что мы сравниваем расчетные значения не с результатами полевых прямых наблюдений за накоплением фитомассы и углерода, а с данными космического мониторинга. В защиту корректной фиксации ПП древесной растительности спутниковыми радарными свидетельствует высокая корреляция расчетных и дистанционных данных секвестрации углерода на лесовосстановительных 20-летних посадках сосны, которая была установлена ранее в сухостепной части ленточных боров (Рыгалова и др., 2024а). Из этого можно сделать вывод, что в одновозрастных насаждениях два метода (дистанционный и дендрохронологический) дают сопоставимые результаты. Это объясняется минимизацией неопределенностей, связанных с формированием выборки в разновозрастном

лесу (Nehrbass-Ahles *et al.*, 2014) для участка площадью 500 м x 500 м (размер ячейки снимка MODIS), а также с более простым моделированием изменения высоты молодых деревьев по мере их роста.

Сопоставление полученных результатов по ленточным борам для южной лесостепи (ок. 2000 г С / дерево ^ год) и сухой степи (565 г С / дерево ^ год) [Рыгалова и др., 2024а] демонстрирует существенное превышение первых значений над вторыми. Важно отметить, что в сухой степи были проанализированы сосны, возраст которых был от 120 лет (средний – 135), и в модели была использована неизменяемая высота деревьев. Это несколько затрудняет сравнение результатов между собой.

Полученная реконструкция величины секвестрации углерода средним старовозрастным деревом за последние 150 лет может быть представлена как один из результатов исследования, но с уточнением, что эта модель требует доработки (прежде всего относительно изменения скорости роста дерева в высоту). По причине наличия различных неопределенностей, в т.ч. связанных с моделью расчета ежегодного объема секвестрации С для отдельных деревьев, мы не производим масштабирование средних значений до площадных значений. При этом для понимания соответствия наших оценок с полученными ранее был произведен расчет накопленного количества С в стволовой фракции на гектар (110 т С^га) для старовозрастного леса. Схожие данные получены для 100-летних сосновых культур Московской области (106 т С^га в древесине без коры) (Мерзленко и др., 2023). Однако несколько расходятся с данными по 140-летним чистым сосновым лесам Воронежской области (лесостепная зона), где в стволовой части сосен зафиксировано 144.8 т^га фитомассы [Шешнищан и др., 2024], и с данными по 160-летним соснякам Иркутской области (109.6 т^га фитомассы в стволе) (Суворова, 2016), учитывая то, что в сухой фитомассе на углерод приходится приблизительно около половины объема (Замолодчиков, 2011). Стоит также уточнить, что выполненное сравнение носит условный характер, т.к. иные факторы (тип

леса, полнота и др.), определяющие накопление фитомассы в древостое, в данном случае не были учтены.

### **Заключение**

В исследовании была выполнена оценка ежегодной секвестрации углерода в стволовой фракции сосен перестойной возрастной группы (старше 140 лет) на основе дендрохронологических и лесотаксационных данных с использованием двух моделей. Наилучшие результаты показала модель, где учитывается изменение высоты дерева с возрастом. Согласно этой модели, одна старовозрастная сосна (средний возраст 165 лет) в период с 2000–2024 гг. аккумулирует  $\sim 2 \text{ кг C /деревцо}^{\wedge}\text{год}$ .

Комплексный сопряженный анализ различных видов продуктивности сосны обыкновенной Кулундинского ленточного бора, полученных наземными (хронология радиального прироста древесины и расчетные значения ежегодного накопления углерода в стволе) и дистанционными методами (первичная продукция и вегетационный индекс NDVI) показал наличие слабой связи между параметрами, отвечающими за поступление и накопление углерода. Самые высокие коэффициенты корреляции получены для ДКХ и расчетного C с валовой первичной продукцией, самые слабые – с NDVI. Это может быть связано с различным набором факторов, лимитирующих эти процессы в дереве, прежде всего климатических: GPP и NPP (также частично NDVI) в наибольшей степени зависимы от термического режима, в то время как процесс формирования годичных колец и накопления C в древесине не демонстрируют четко выраженных линейных связей с климатическими условиями территории.

### **Благодарности**

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**

*Грингоф И.Г., Павлова В.Н.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. III. Ч. 1. Основы агроклиматологии. Ч. 2. Влияние изменений климата на экосистемы, агросферу и сельскохозяйственное производство. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2013. 384 с.

*Замолодчиков Д.Г.* Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4 (29). С. 15–22

*Иванова Ю.Д., Ковалев А.В., Суховольский В.Г.* Фитомасса фракций деревьев по модели рангового распределения // Известия вузов. Лесной журнал. 2025. № 2. С. 63–75.

*Иванов В.В., Борисов А.Н.* Накопление углерода сосновыми насаждениями Красноярской лесостепи при уходе за лесом // Сибирский лесной журнал. 2024. №3. С. 103–109.

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

Лесотаксационный справочник / Сост. Б.И. Грошев, С.Г. Сеницын, П.И. Мороз, И.П. Сеперович. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.

*Мальшева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А.* Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13.

*Матвеев С.М., Литовченко Д.А.* Дендроклиматология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Усманского бора Воронежской области // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 4 (52). Ч. 2. С. 110–136.

*Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Мельник Л.П.* Депонирование углерода стволовой фракцией в 100-летних лесных культурах хвойных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 5–10.

*Павлов И.Н., Барабанова О.А.* Влияние географического происхождения сосны обыкновенной на форму ствола // Лесной и химический комплексы: проблемы и решения. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-

практической конференции, посвященной 75-летию СибГТУ. Красноярск: СибГТУ, 2005. Т.2. С. 169–179.

*Полякова Г.Г., Поляков М.В., Ибе А.А., Подоляк Н.М.* Таксационная оценка состояния молодняка сосны при естественном лесовозобновлении // Сибирский лесной журнал. 2016. № 4. С. 98–104.

*Правдин Л.Ф.* Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М., Наука, 1964. 191 с.

Руководящие указания по эффективной практике для сектора ИЗЛХ / Руководящие указания МГЭИК по эффективной практике для ЗИЗЛХ. Гл. 3. 2003. Режим доступа: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/russian/ch3.pdf> (дата обращения: 03.03.2025)

*Рыгалова Н.В., Мордвин Е.Ю., Бондарович А.А.* Продуктивность и секвестрация углерода *Pinus sylvestris* L. ленточных боров в сухой степи Западной Сибири по данным дендрохронологии и спутниковых измерений MODIS // Сибирский экологический журнал. 2024а. Т. 31. № 6. С. 975–987.

*Рыгалова Н.В., Плуталова Т.Г., Мартынова Я.В.* Оценка показателей продуктивности растительных сообществ степной зоны Западной Сибири, полученных методами дистанционного зондирования и дендрохронологии // Аридные экосистемы. 2024б. Т. 30. № 2(99). С. 36–44.

Специализированные массивы // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). 2025. Режим доступа: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 31.04.2025).

*Суворова Г.Г.* Анализ биологической продуктивности сосновых древостоев по возрастным группам на основе лесотаксационных данных // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2016. Т. 16. С. 43–52.

*Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Воронин В.И., Осколков В.А., Иванова Ю.Д.* Связь радиального прироста деревьев хвойных пород и

нормализованного разностного вегетационного индекса // Лесоведение. 2023 №1. с. 3–12

*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

*Шешницян С.С., Карташова Н.П., Штена Е.Н., Царегородцев А.В., Сафонова А.А.* Запасы углерода в фитомассе и биологическая продуктивность спелых и перестойных древостоев Пригородного лесничества Воронежской области // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 4 (56). С. 97–110.

*Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Курдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М.* Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с

*Bunn A., Hughes V., Kirdyanov A.V., Losleben M., Shishov V., Berner L., Olchev A., Vaganov E.A.* Comparing forest measurements from tree rings and a space-based index of vegetation activity in Siberia // Environmental Research Letters. 2013. Vol. 8. 035034 (8pp).

*Chiesi M., Maselli F., Bindi M., Fibbi L., Cherubini P., Arlotta E., Tirone G., Matteucci G., Seufert G.* Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements // Agricultural and Forest Meteorology. 2005. Vol. 135 (1–4), P. 22–34.

*Didan K.* MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. Режим доступа: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061> (дата обращения: 23.05.2025).

*Kannenbergh S., Babst F., Barnes V., Cabon A., Dannenberg M., Johnston M., Anderegg W.* Stand density and local climate drive allocation of GPP to aboveground woody biomass // New Phytologist. 2025. 246. P. 543–553.

*Kaufmann R. K., D'Arrigo R.D., Laskowski C., Myneni R.B., Zhou L., Davi N.K.* The effect of growing season and summer greenness on northern forests // *Geophys. Res. Lett.* 2004. 31. L09205.

*Kirschbaum M., Eamus D., Gifford R., Roxburgh S., Sands P.* Definitions Of Some Ecological Terms Commonly Used In Carbon Accounting. Canberra, 2001. P. 2–5.

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

*Lopatin E., Kolström T., Spiecker H.* Determination of forestgrowth trends in Komi Republic (northwestern Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data // *Boreal Environment Research.* 2006. 11(5). P. 341–353

MOD17A2HGF MODIS / Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Режим доступа: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061> (дата обращения: 10.04.2025)

MOD17A3HGF MODIS / Terra annual Gross and Net Primary Production (GPP and NPP) L4 Global 500 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Режим доступа: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061> (дата обращения: 10.04.2025)

*Muller B, Pantin F, Genard M, Turc O, Freixes S, Piques M, Gibon Y.* Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs // *Journal of Experimental Botany.* 2011. Vol. 62. P. 1715–1729

*Nehrbass-Ahles Ch., Babst F., Klesse S., Nötzli M., Bouriaud O., Neukom R., Dobbertin M., Frank D.* The influence of sampling design on tree-ring-based quantification of forest growth // *Global Change Biology.* 2014. Vol. 20 (9). P. 2867–2885

*Running S.W., Zhao M.* User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H) and Year-end GapFilled (MOD17A2HGF/A3HGF) Products

NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1),  
Version 1.1 Mr. 11Th, 2021. 32 p.

*Speer J.H.* Fundamentals of Tree Ring Research. University of Arizona Press.  
Tucson, AZ, USA, 2010. 368 p.

*Wang T., Bao A., Xu W., Zheng G., Nzabarinda V., Yu T., Huang X., Long G.,  
Naibi S.* Dynamics of forest net primary productivity based on tree ring  
reconstruction in the Tianshan Mountains // Ecological Indicators. 2023. Vol. 146.  
109713.

*Wang B., Wang Z., Zhang D., Li L., Zhao Y., Luo T., Wang X.* Spatial and  
Temporal Variation in Primary Forest Growth in the Northern Daxing'an Mountains  
Based on Tree-Ring and NDVI Data // Forests. 2024. Vol. 15. P. 317.

*Wong C.Y.S., Young D.J.N., Latimer A.M., Buckley T.N., Magney T.S.*  
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. 2021. Vol. 265. P. 112635.

*Xu K., Wang X., Liang P., An H., Sun H., Han W., Li Q.* Tree-ring widths are  
good proxies of annual variation in forest productivity in temperate forests //  
Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 1945.

**Assessment of carbon sequestration in the stem fraction of *Pinus sylvestris L.*  
based on dendrochronological data in the southern forest-steppe of Western  
Siberia**

**N.V. Rygalova<sup>@</sup>, E.Yu. Mordvin, A.A. Bondarovich, D.V. Kirillov**

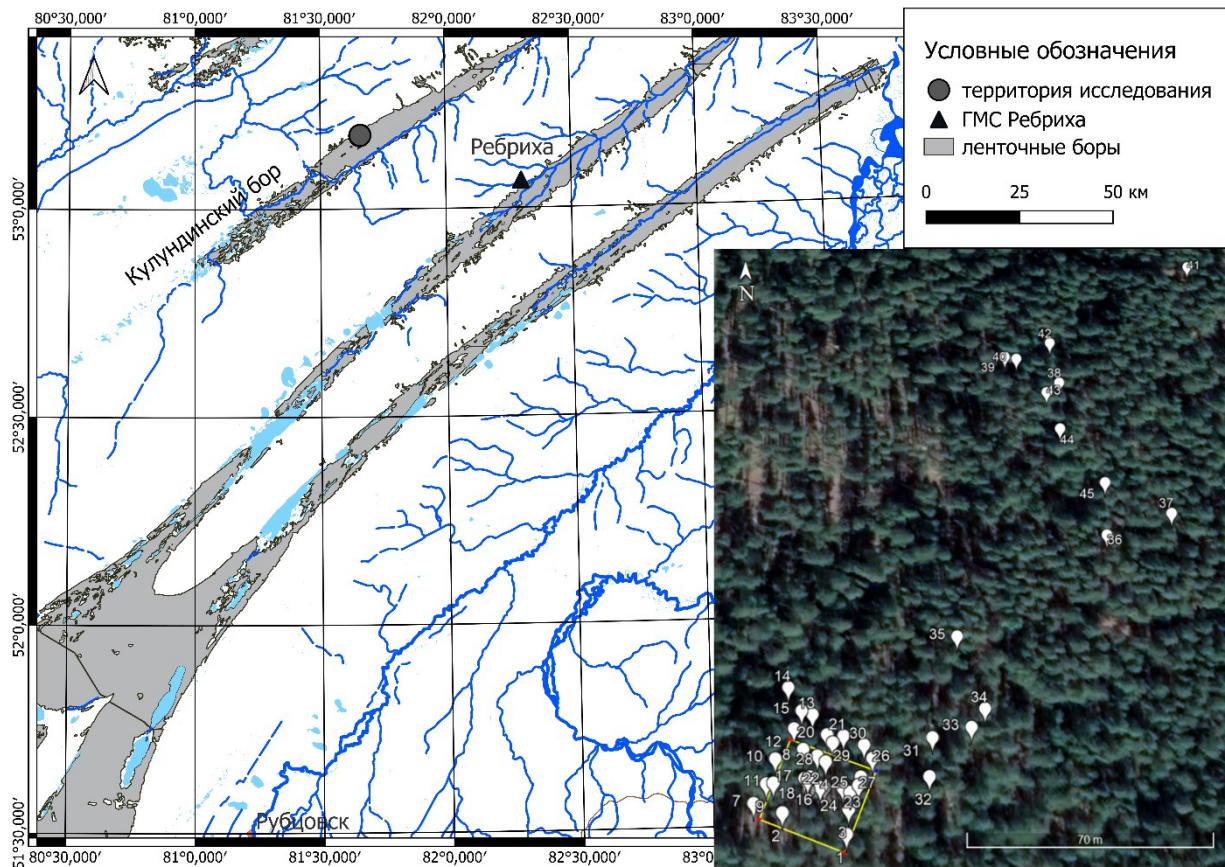
*Altai State University, Lenin Ave. 61, Barnaul, 656049, Russia*

*<sup>@</sup>natalia.ml@mail.ru*

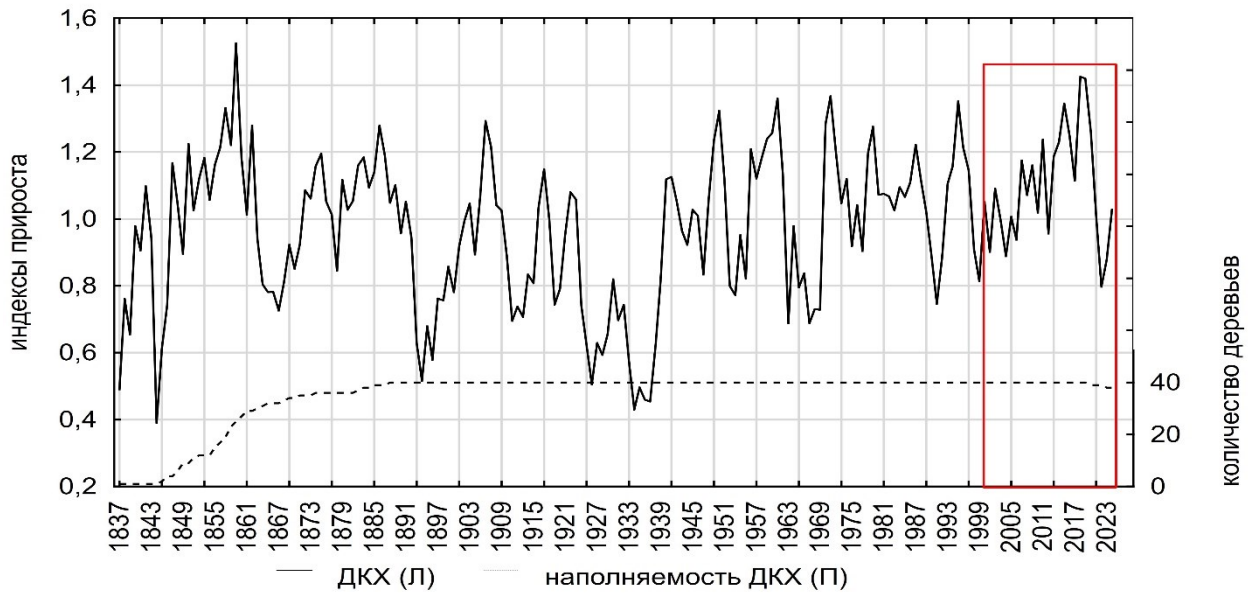
The paper presents the calculation of carbon values (based on dendrochronological and forest inventory data) accumulated by Scots pine in the stem fraction of ribbon pine forests in the south of the forest-steppe zone of Western Siberia. Every year (on average for the period 2000–2024), overmature pine

sequesters about 2 kg C/year in the trunk; in total, 110 t C/ha have accumulated over the entire growth period. The calculated carbon values in the stem fraction of pine demonstrate statistically significant relationships with the annual values of gross (and make up 25.9% of its value) and net (46.1%) primary production, the values of which are obtained from remote sensing of the Earth. The paper presents the climate control factors of the indicators responsible for the absorption and accumulation of carbon by Scots pine.

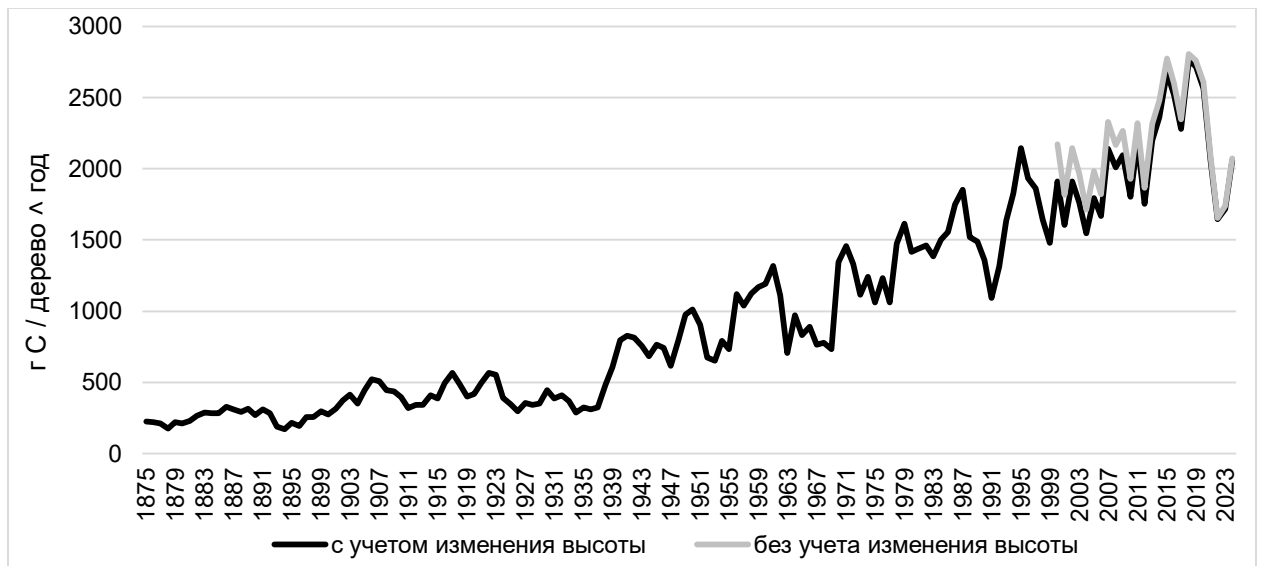
*Keywords:* *Pinus sylvestris L.*, ribbon pine forests, carbon sequestration, tree-ring width, remote sensing of the Earth, gross and net primary production, NDVI



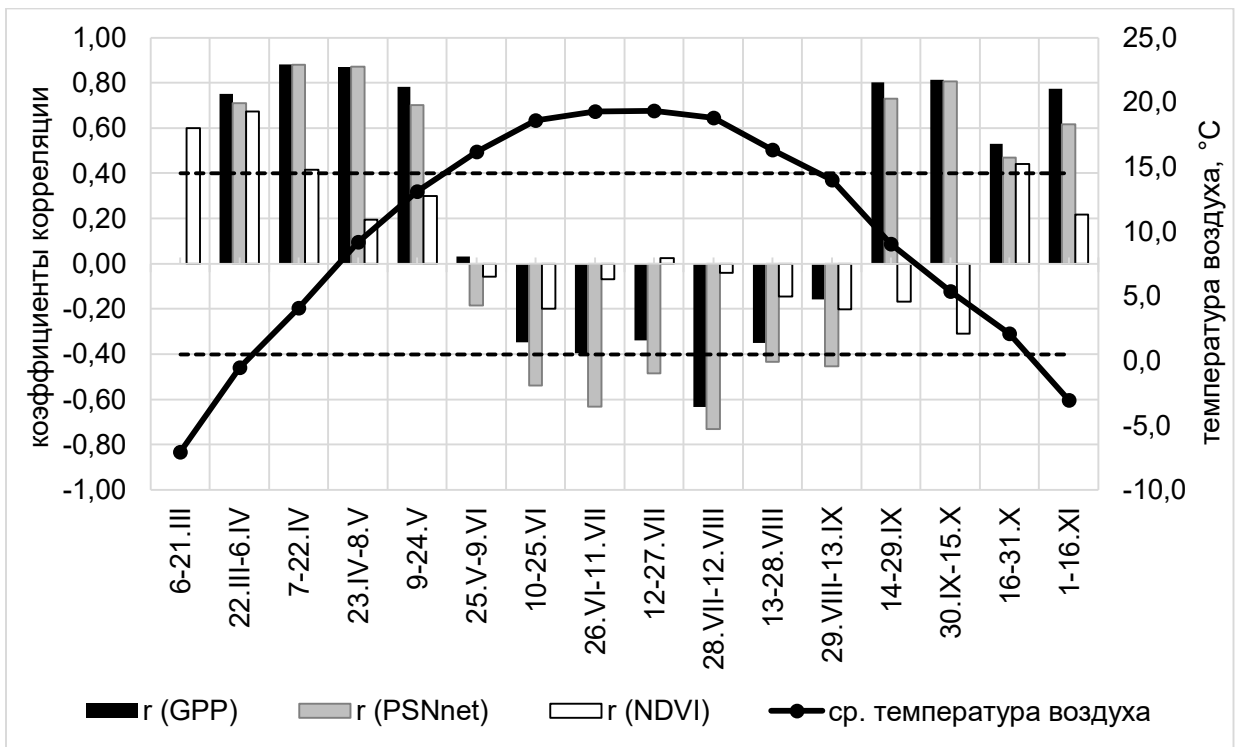
Рыгалова. Рис.1.



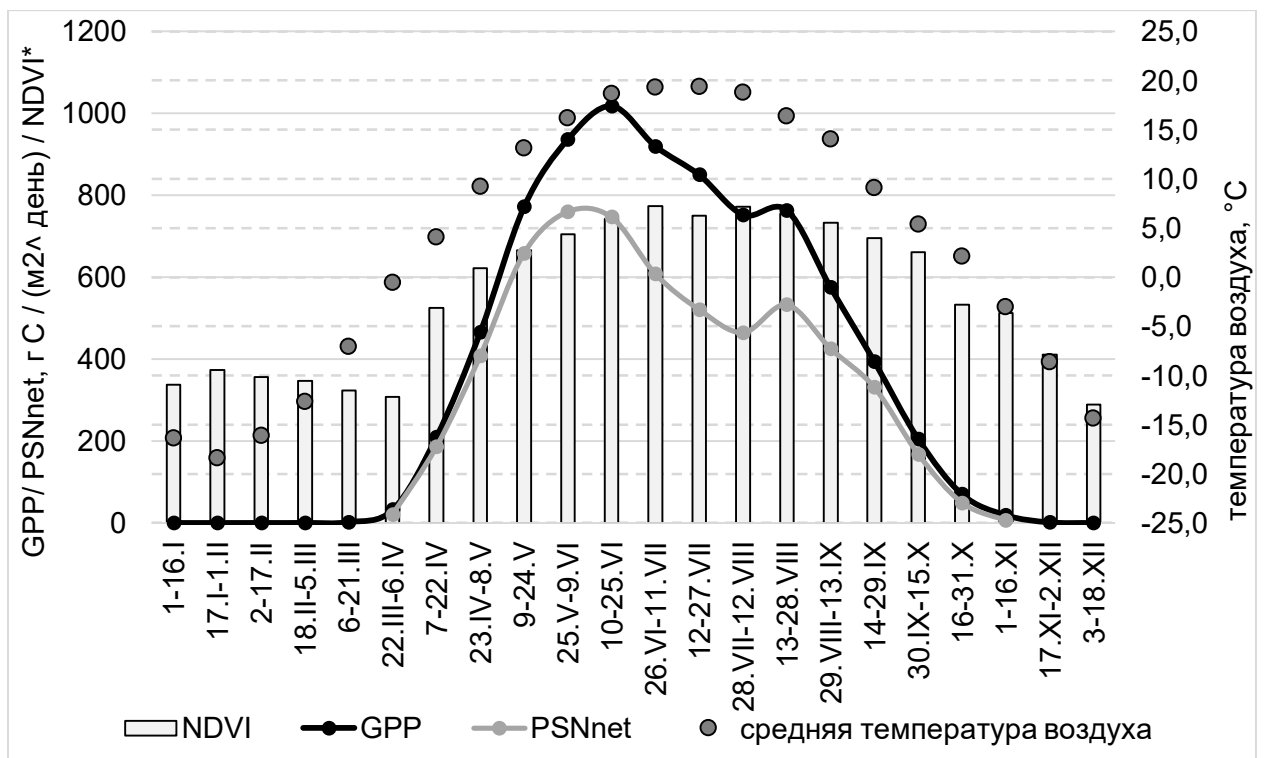
Рыгалова. Рис. 2.



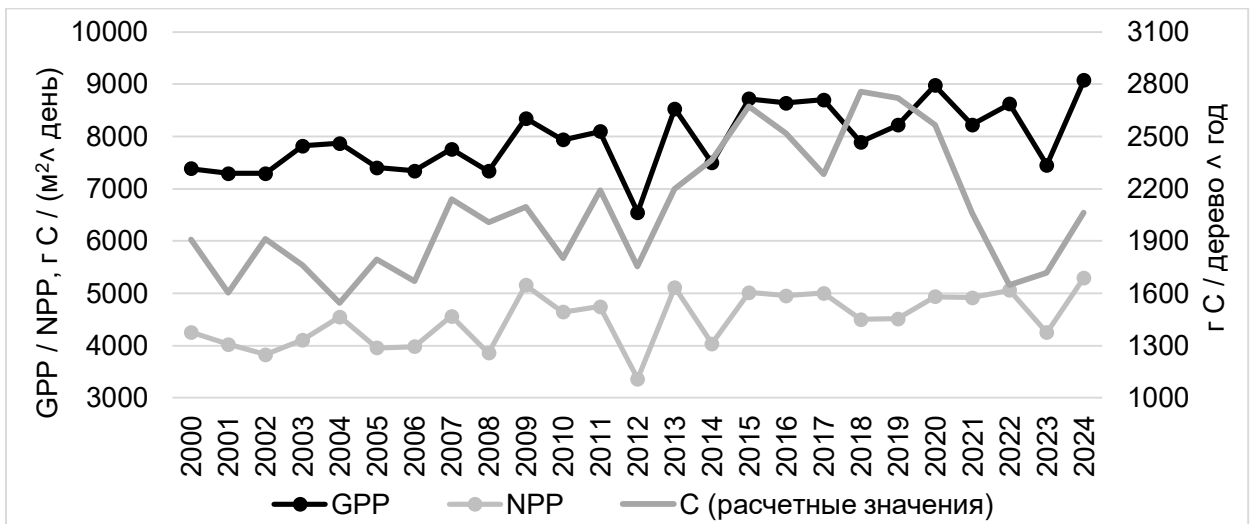
Рыгалова. Рис. 3.



Рыгалова. Рис. 4.



Рыгалова. Рис. 5.



Рыгалова. Рис. 6.

Рис.1. Расположение территории исследования. На снимке-врезке приведено размещение обследованных деревьев относительно модельной площадки (25 м x 25 м), подложка из Google Earth.

Рис. 2. Древесно-кольцевая хронология 24Sh (std). Прямоугольником отмечен период исследования: 2000–2024 гг.

Рис. 3. Средние значения ежегодной секвестрации углерода в стволовой фракции одного дерева, полученные при использовании двух моделей (с учетом изменения во времени высоты деревьев, 150 лет (1875–2024 гг.) и без учета изменений, 25 лет (2000–2024 гг.)).

Рис. 4. Корреляция Пирсона (r) валовой (GPP) первичной продукции, чистого фотосинтеза (PSNnet) и вегетационного индекса NDVI соснового леса с температурным режимом (пунктирной горизонтальной линией отмечены границы статистической значимости коэффициентов корреляции при  $p < 0.05$ ).

Рис. 5. Сезонная динамика первичной продукции соснового леса (GPP и PSNnet), вегетационного индекса NDVI и средней температуры воздуха (по

ГМС Ребриха) за период 2000–2024 гг. (\* значения *NDVI* приведены в 1000-кратном увеличении).

Рис. 6. Динамика валовой / чистой первичной продукции и накопления углерода в столовой фракции сосны обыкновенной в ленточном бору в южной лесостепи.