

**Продуктивность и секвестрация углерода
Pinus sylvestris L. ленточных боров в сухой степи
Западной Сибири по данным дендрохронологии
и спутниковых измерений MODIS**

Н. В. РЫГАЛОВА, Е. Ю. МОРДВИН, А. А. БОНДАРОВИЧ

ФГБОУ ВО “Алтайский государственный университет”
656049, Барнаул, пр. Ленина, 61
E-mail: natalia.ml@mail.ru

Статья поступила 25.06.2024

После доработки 02.07.2024

Принята к печати 04.07.2024

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ изменения продуктивности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) методами дистанционного зондирования (валовая и чистая первичная продукция / фотосинтез) и дендрохронологии (радиальный прирост ствола) на двух разновозрастных лесных участках ленточного бора в сухой степи Западной Сибири. Для обоих участков (молодые лесовосстановительные посадки и естественный лес) выявлен значимый положительный тренд изменения объема первичной продукции за период 2000–2023 гг. Определены различия в наборе климатических факторов, лимитирующих объем первичной продукции древостоя (весенние и осенние температуры и осадки) и радиальный прирост сосны (значимые температуры сентября прошлого года для сосны разных возрастов, для молодняка также значимые сумма годовых осадков и ГТК Селянинова вегетационного периода, для спелого леса – температура июня). Установлены связи между шириной годичного прироста модельных деревьев и первичной продукцией древостоя в июне и начале июля для естественного леса и во второй половине июня – для посадок. Выполненные на основе древесно-кольцевых и биометрических данных расчеты ежегодного объема секвестрации углерода деревьями показали, что в среднем за последние 5 лет сосна в стволовой фракции депонировала от 525 г С / год (молодняк) до 565 г С / год (зрелые деревья). Результаты расчетов объемов секвестрации углерода (по одновозрастным посадкам сосны) сопоставимы в абсолютном выражении и коррелируют со значениями первичной продукции древостоя, полученными дистанционно.

Ключевые слова: секвестрация углерода, ширина годичных колец, ленточные боры, сосна обыкновенная, сухая степь, валовая и чистая первичная продукция, MODIS.

ВВЕДЕНИЕ

Потенциал лесных экосистем к связыванию CO₂ и влияние изменения климата на этот процесс широко обсуждаются в последние десятилетия [Anderegg et al., 2020]. По оценкам [Dian et al., 2024] на леса приходится примерно 54,5 % поглощения углерода в наземных

экосистемах. Леса фиксируют углекислый газ через крону и распределяют его по различным органам дерева, среди которых ствол является основным местом его секвестрации [Dey et al., 2016; Liu et al., 2023]. Ширина годичных колец (ШГК) деревьев является прямым показателем радиального роста ствола,

который определяет ежегодное образование древесины и накопление углерода [Bouriaud et al., 2005]. В этой связи дендрохронологические данные совместно с биометрическими могут быть использованы для оценки его ежегодного депонирования в лесных экосистемах [Babst et al., 2014; Dey et al., 2016; Матвеев, Литовченко, 2023; Puchi et al., 2024].

Однако использование годичных колец деревьев как индикатора различных экологических процессов зачастую носит локальный характер. В этой связи возникает необходимость масштабировать древесно-кольцевые данные до регионального уровня. Увеличить пространственный охват позволяет метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для анализа динамики продуктивности лесных экосистем, связанных с депонированием углерода, могут быть использованы такие продукты ДЗЗ, как валовая (gross primary production (GPP)) и чистая (net primary production (NPP)) первичная продукция, а также чистый фотосинтез (PSNnet). В настоящее время сформирован научный задел по исследованию связи радиального прироста деревьев с этими показателями (GPP/NPP) [Chiesi et al., 2005; Rocha

et al., 2006; Xu et al., 2017; Wong et al., 2021; Liu et al., 2023; Wang et al., 2023].

Выбранные нами полигоны расположены в ленточных борах, дендроклиматический анализ которых представлен в ряде работ [Оленин, Мазепа, 1987; Малышева (Рыгалова), Быков, 2011; Агафонов и др., 2021; Рыгалова и др., 2022]. Вместе с тем исследования с применением методов дендрохронологии и ДЗЗ для изучения продуктивности лесов данного региона пока единичны [Рыгалова и др., 2024]. В связи с этим целью представленной работы является оценка потенциала секвестрации углерода сосной обыкновенной в засушливых условиях с использованием дистанционного и наземного (дендрохронологического) методов исследования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Территория исследования

В физико-географическом отношении территория исследования находится в юго-западной части экстразональных ленточных боров в пределах подзоны сухой степи [Алтайский

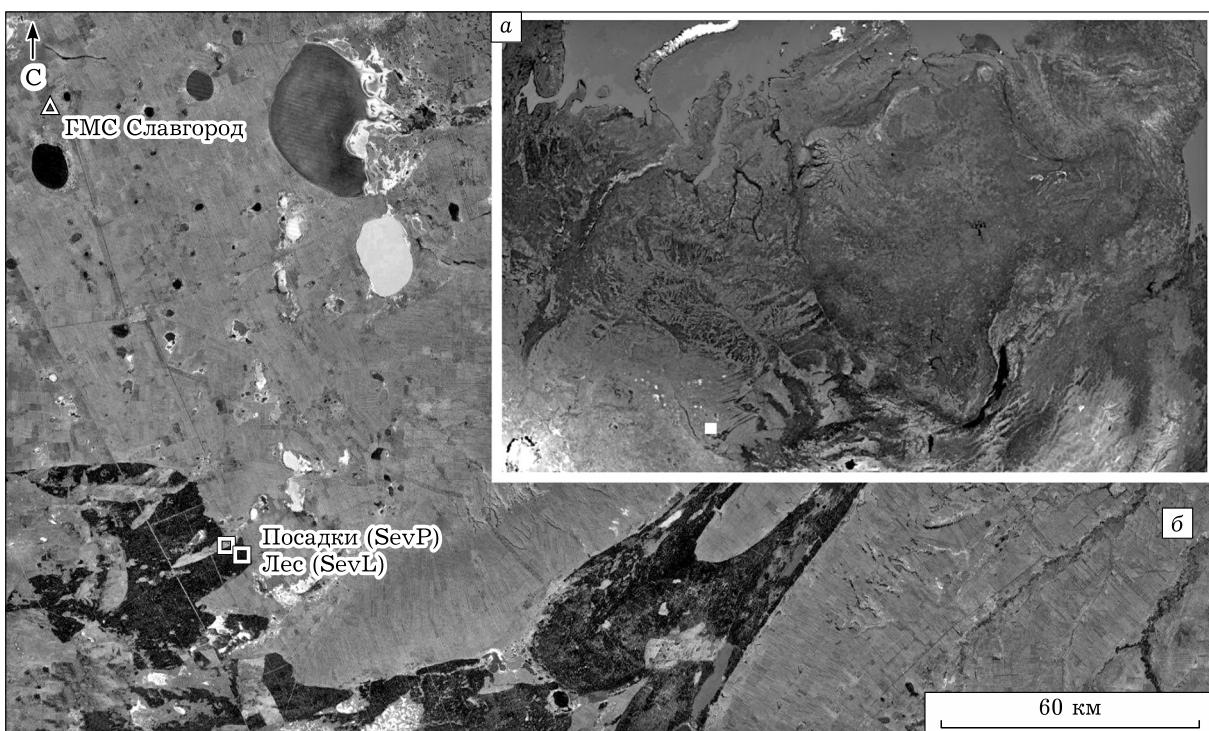


Рис. 1. Положение территории исследования (а – белым квадратом отмечена территория исследования на макроуровне, б – локальное размещение полигонов (белые квадраты) в массиве ленточного бора и ГМС Славгород (треугольник). Космоснимки получены с использованием Google Earth

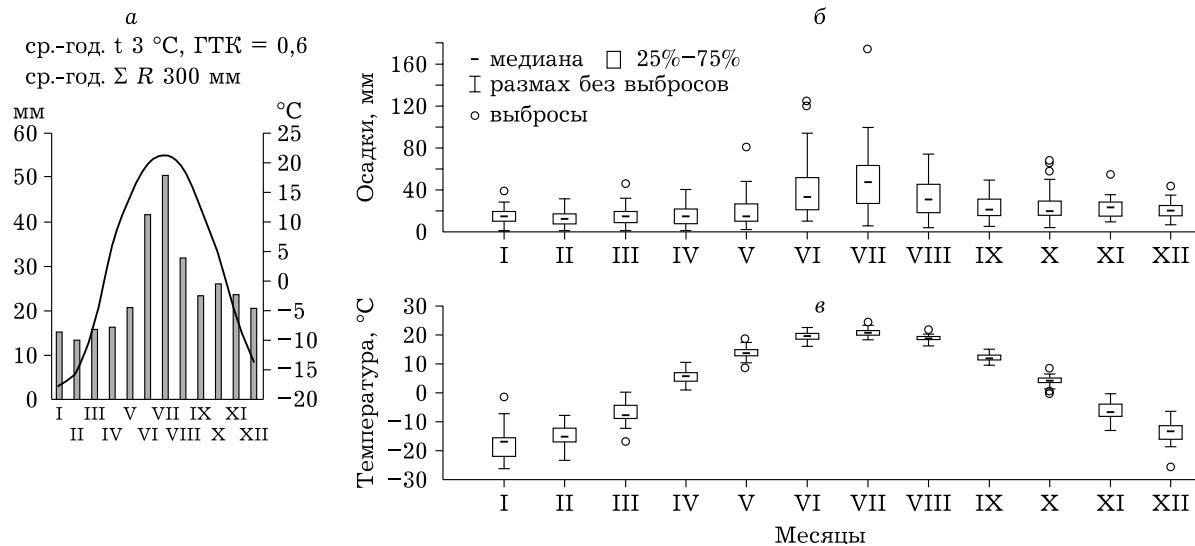


Рис. 2. Характеристика климатического режима территории исследования (1994–2023 гг.) по данным ГМС Славгород [Специализированные массивы, 2023]: а – климатограмма, б, в – размах значений величины атмосферных осадков и температуры воздуха по месяцам года соответственно

край, 1978] на юге Западной Сибири (рис. 1). Согласно административному делению модельные площадки располагаются в Ключевском районе Алтайского края Российской Федерации.

Рельеф местности характеризуется как бугристо-грядовый с перепадом высот от 150 до 165 м. Климат умеренно континентальный с выраженным колебанием температур в течение года (средняя температура июля^{*} +21,1 °C, января^{*} –17,6 °C) и летним максимумом осадков (рис. 2, а). Наибольшая вариабельность температуры характерна для зимнего периода, атмосферных осадков – для летнего (рис. 2, б, в). Последнее определяет контрастность климатических условий вегетационных периодов: гидротермический коэффициент Селянинова, рассчитанный для ГМС Славгород, за 2000–2023 гг. менялся от 0,2 (2012 г.) до 1,4 (2009 г.).

Дендрохронологический метод

Дендрохронологический материал в виде кернов древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) получен на двух модельных площадках. Первая площадка была заложена в молодых лесовосстановительных посадках, созданных на месте сгоревшего леса. Средний

камбияльный возраст посадок (на уровне грунта) – 14,5 года (максимальный – 19 лет). Вторая площадка расположена в беломошном сосновом бору, сменяющем сосновый на зеленошипинский (здесь выбирались наиболее старые, отдельно стоящие деревья).

Сбор буровых образцов, измерение (на LINTAB 6) ШГК, стандартизация рядов и построение обобщенных древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) проводились по общепринятой методике [Methods..., 1990; Шиятов и др., 2000] с применением программ пакета DPL. В результате были получены ДКХ SevL (лес) и ДКХ SevP (посадки), для каждого участка – три вида хронологий (стандартная, остаточная и arstan). В статье приведены результаты только по стандартной ДКХ (таблица, рис. 3), которая продемонстрировала наиболее высокие связи с данными ДЗЗ, что также отмечалось ранее [Xu et al., 2017; Wang et al., 2023].

Расчет стволового углерода

Для расчета ежегодного накопления стволового углерода (C_t) была использована структурная основа формулы 3.2.3. МГЭИК [Руководящие указания..., 2003], которая в настоящем исследовании имеет вид:

$$C_n = (S_{\text{г.к.н}} \cdot H \cdot f) \cdot 0,42 \cdot 0,5,$$

* Приведены данные ГМС Славгород за последние 30 лет (1994–2023 гг.) [Специализированные массивы, 2023].

Характеристика древесно-кольцевых хронологий *Pinus sylvestris* L.

ДКХ	Координаты	Высота местности, м	Наполняемость (количество деревьев)	Длина хронологии, годы	Средняя ширина годичного кольца (mean TRW), мм	Коэффициент чувствительности обобщенной ДКХ	Стандартное отклонение обобщенной ДКХ
SevP	52°5' с. ш. 79°15' в. д.	155	40	19 (2005–2023)	3,0	0,26	0,34
SevL	52°4' с. ш. 79°18' в. д.	163	35	193 (1831–2023)	1,3 (0,5*)	0,19 (0,28*)	0,26 (0,32*)

* В скобках представлены значения для периода исследования (2000–2023 гг.)

где C_n – количество углерода, депонированного деревом в год n (г/год); $S_{\text{г.к.н}}$ – площадь годичного кольца в год n (см^2); H – высота дерева, см; f – видовое число; 0,42 ($\text{г}/\text{см}^3$) – плотность абсолютно сухой стволовой древесины сосны обыкновенной; 0,5 – доля углерода в сухом веществе древесины.

Площадь каждого годичного кольца рассчитывалась как разница между площадью большого и малого круга, где радиусом большого круга является сумма измерений годичных колец от коры до центра дерева, малого – тот же радиус за вычетом ширины одного (последнего) годичного кольца. Расчет проведен для каждого года со смещением большого и малого радиусов на одно годичное кольцо. Высота дерева определялась на местности электронным высотомером (клинометром) Haglof. В расчете углерода на лесном участке использовались только спелые деревья возрастом более 120 лет (2/3 выборки), в этой связи принято допущение считать их высоту неизменной в течение периода исследования (последние 24 года). Высота молодняка на лесопосадках была рассчита-

на 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, взятом на высоте 1,3 м). Видовое число для спелых деревьев определено 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 молодняка на посадках рассчитывалось по формуле [Полякова и др., 2016, с. 102] для каждого порядкового номера годичного кольца. Расчеты C_t произведены для каждого дерева в отдельности (для леса – это 26 деревьев, для посадок – 32) с использованием индивидуальных нестандартизованных (raw) древесно-кольцевых серий с последующим осреднением по модельной площадке.

Данные дистанционного зондирования

Традиционный подход получения оценок валовой первичной продукции для различных

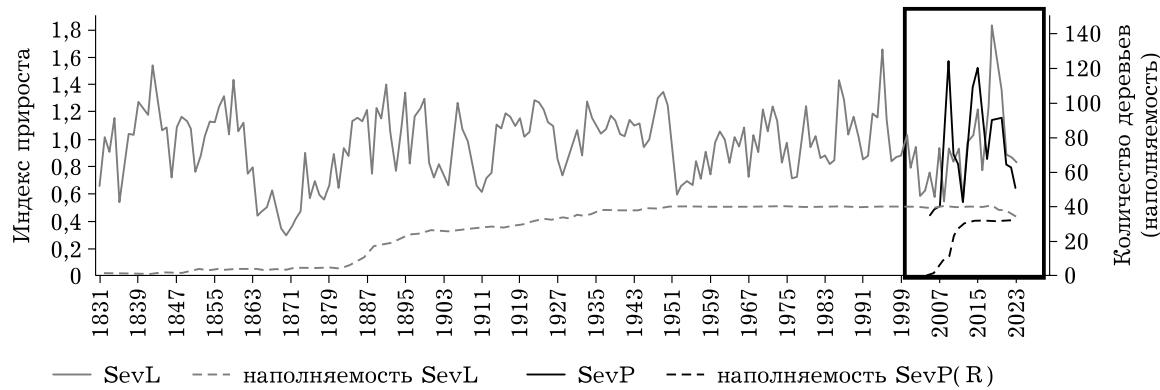


Рис. 3. Обобщенные древесно-кольцевые хронологии сосны обыкновенной юго-западной части ленточных боров, полученные для леса (SevL) и посадок (SevP).

Прямоугольник выделен период, анализируемый в работе

типов экосистем основан на использовании индексов растительности, а также на биофизических характеристиках растительного покрова, содержащего хлорофилл. Если GPP – это грубая оценка поглощенного CO₂ в процессе фотосинтеза в течение суток или года, то PSNnet (в течение суток)/NPP (в течение года) являются непосредственными продуктами фотосинтетических реакций, где исключены потери углерода в процессе дыхания и обмена вещества через корневую систему. Расчет GPP, PSNnet и NPP проводился по соответствующим формулам [Running, Zhao, 2021].

В представленном исследовании применен набор данных MOD17A2HGF (8-дневные композиты) и MOD17A3HGF (годовые значения) версии 6.1 [MOD17A2HGF MODIS; MOD17A3HGF MODIS] с пространственным разрешением 500 м. Их основой являются наблюдения радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутнике Terra. Снимки получены для территории, где отбирались буровые образцы сосны.

Метеорологические данные

В работе использованы полученные из открытых источников Росгидромета [Специализированные массивы, 2023] суточные и месячные данные температуры воздуха и атмосферных осадков ГМС Славгород, расположенной в подзоне сухой степи [Алтайский край, 1978] в 110 км севернее территории исследования (см. рис. 1). На основе суточных данных рассчитаны гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова [Грингоф, Павло-

ва, 2013] и значения по 8-дневным интервалам, соответствующим периодам получения спутниковых измерений MODIS.

Оценка связи между показателями выполнена на основе корреляционного анализа Пирсона (в программе Statistica 13). Все приведенные в работе коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка накопления углерода в стволе сосны обыкновенной

Анализ динамики рассчитанного ежегодного C_t (рис. 4) показал среднее значение для спелого дерева 526 г С/год за период 2000–2023 гг. Из-за молодого возраста сосна на посадках дает меньшие средние значения C_t (284 г С/год) за сопоставимый отрезок времени. При этом к 15 годам (камбиальный возраст дерева на уровне груди) молодые сосны достигли ежегодных значений углерода спелых деревьев. За последние 5 лет одна сосна в сухой степи депонировала от 525 г С/год (молодняк) до 565 г С/год (зрелые деревья). Выраженная позитивная тенденция C_t на посадках позволяет предположить увеличение показателя в ближайшее десятилетие.

Динамика образования первичной продукции древостоя

Увеличение (как и снижение) средних значений валовой первичной продукции и чистого фотосинтеза древостоя в течение года

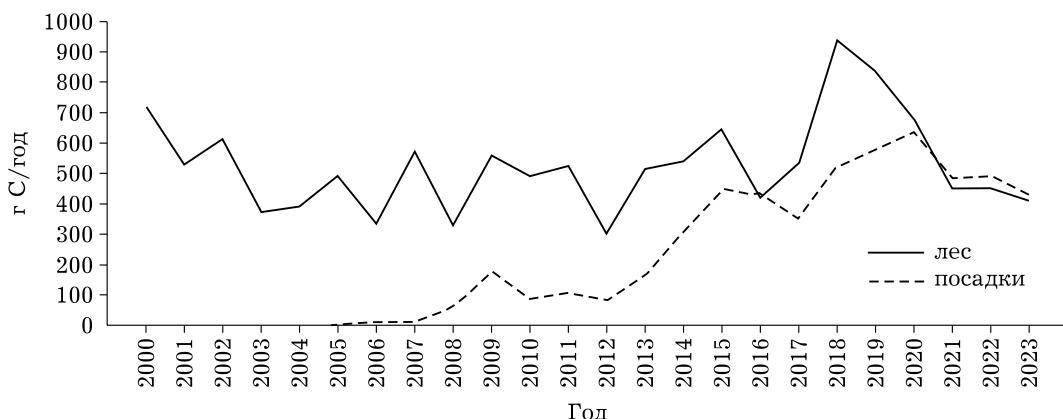


Рис. 4. Средние значения ежегодного накопления углерода в стволе дерева в сосновом лесу (лес) и молодых искусственных насаждениях (посадки)

совпадает с периодом перехода температуры воздуха через 0 °C (рис. 5, а). Выделяется выраженный максимум GPP/PSNnet в июне – августе. Для посадок значения в эти месяцы приблизительно равны, для естественного леса в годовом ходе отмечен явный максимум в июне – начале июля. Низкие значения валовой первичной продукции и фотосинтеза для полигона молодых деревьев (относительно лесного участка меньше в 2 раза) объясняются слаборазвитой кроной в ранний период развития. При этом средняя величина радиального прироста по стволу для молодых деревьев (на посадках) в 6 раз больше (см. таблицу) по сравнению со зрелыми деревьями за сопоставимый период, что типично для молодняка.

Динамика годовой величины валовой и чистой первичной продукции для обоих полигонов имеет значимые позитивные тренды за 2000–2023 гг. (оценки критерия Стьюдента превышают критическое значение при уровне $p < 0,05$). Если для молодых посадок это является проявлением физиологического развития и роста, то для естественного леса это может свидетельствовать об определенных экологических тенденциях. Для осредненного ряда ШГК деревьев на модельной площадке в лесу за тот же период значимого тренда не выявлено (рис. 5, б).

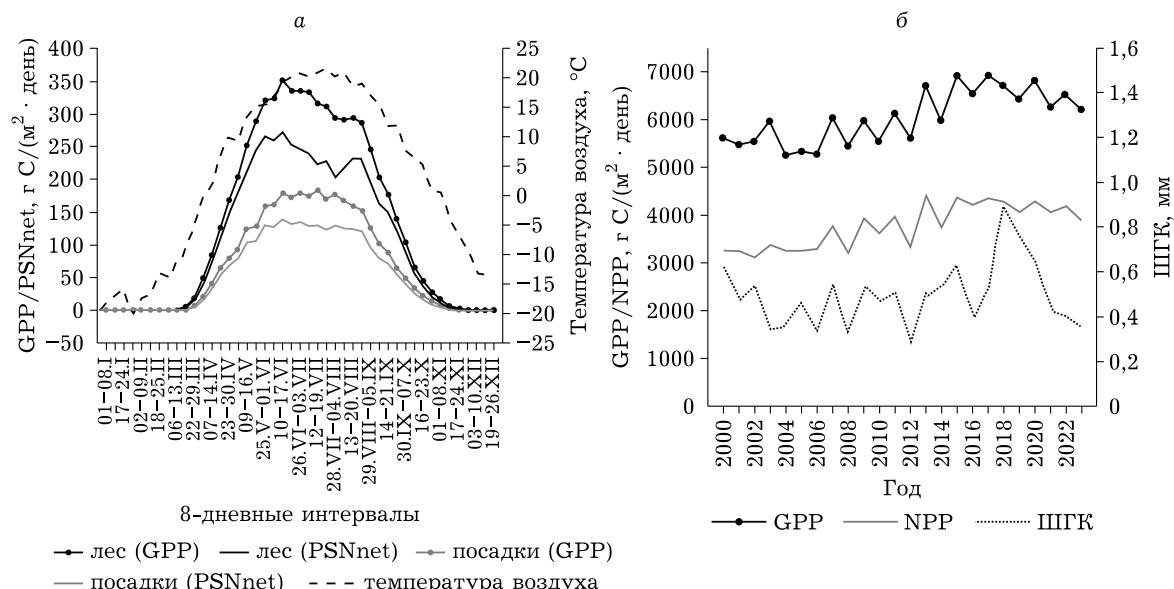


Рис. 5. Характеристика сезонной и многолетней изменчивости значений продуктивности сосны: а – осредненные по 8-дневным срокам значения GPP/PSNnet для площадки естественного леса / посадок и температуры воздуха (ГМС Славгород) за 2000–2023 гг., б – многолетняя динамика годовых значений GPP/NPP и осредненной ШГК для лесного участка

Климатические факторы, определяющие продуктивность деревьев

Отмечена зависимость валовой первичной продукции и чистого фотосинтеза от климатических условий весны и осени (рис. 6). В период активной вегетации, когда устанавливается температурный оптимум (среднесуточная температура выше +10 °C), лимитирующее воздействие климатических факторов на эти процессы уменьшается или нейтрализуется. При этом наибольшее регуляторное значение для фотосинтеза и производства валовой первичной продукции имеет температура воздуха. Ее влияние преимущественно стимулирующее (положительная связь), но для модельного участка, расположенного в естественном лесу, отмечено отрицательное воздействие температур летних месяцев, прежде всего на процесс фотосинтеза кроны. Увеличение осадков оказывает ограничивающее воздействие на производство первичной продукции и фотосинтез, которое также проявляется в весенне-осенний период, но слабее по сравнению с температурным фактором.

Установлено, что температура и осадки определенного периода могут влиять на будущую продуктивность дерева: для лесного участка прослеживается влияние температуры и осадков на производство первичной

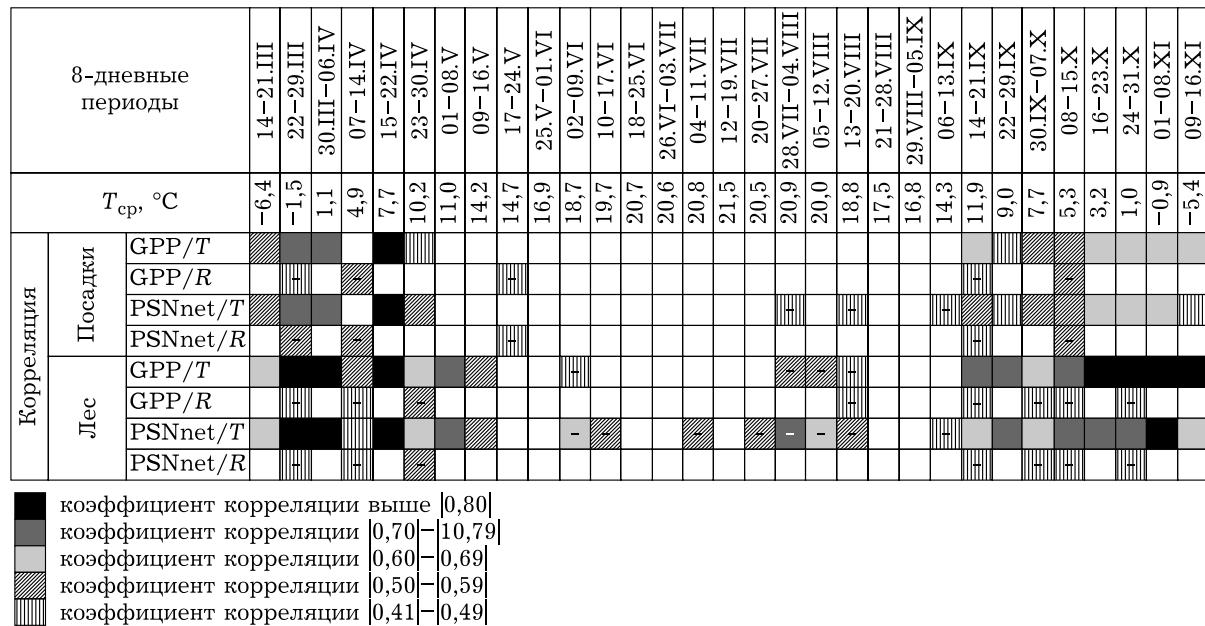


Рис. 6. Корреляция осредненных 8-дневных значений GPP и PSNnet для леса и посадок со средней температурой (T) и суммой осадков (R) за период 2000–2023 гг. (|0,41| – порог значимости коэффициентов корреляции при $p < 0,05$). Минус (-) означает отрицательную связь

продукции на один-два 8-дневных периода вперед. Также осадки января – февраля положительно влияют на производство GPP деревьев в лесу в мае, создавая запас почвенной влаги в период начала активной вегетации.

Годовые значения валовой и чистой первичной продукции для участка естественного леса продемонстрировали положительную связь только с осадками ноября прошлого года ($r = 0,43$ и $0,50$ соответственно), а для посадок – отрицательную зависимость от количества осадков второй половины мая ($r = -0,45$ и $-0,46$). Выявлена связь максимальных (для каждого года) значений GPP/PSNnet также с осадками прошлого ноября (для лесного массива $r = 0,49–0,56$, для посадок $r = 0,42–0,44$). Таким образом, максимально интенсивную продуктивность древостоя в значительной степени определяет снежный покров в начале зимы как защита от промерзания почвы и формирования надежного источника влаги при таянии весной.

В ходе дендроклиматического анализа установлены значимые корреляционные связи с температурой воздуха конца вегетационного периода прошлого года (рис. 7) для обеих хронологий. При этом для ДКХ SevL выявлена значимость температуры июня и ГТК сентября прошлого года, а для ДКХ SevP – зна-

чимая связь с годовой суммой осадков и ГТК вегетационного периода. Значимость одновременно температуры воздуха (отрицательная связь) и ГТК (положительная связь) сентября предыдущего года для роста деревьев (SevL) определяется тем, что тепло в конце вегетационного периода приводит к потерям потенциальной влаги в почве перед зимним покоем и, как следствие, снижению прироста на будущий год.

Анализ взаимосвязи показателей продуктивности древостоя

Выявлена значимая связь радиального прироста деревьев, произрастающих в лесу (SevL), со значениями GPP и фотосинтеза с начала июня по начало июля (рис. 8, a), а в посадках (SevP) – только во второй половине июня. Хронология SevL (лес) также показала связь с годовыми значениями GPP и NPP ($r = 0,6$). При временном сдвиге SevL (на 2 года вперед) обнаружены более высокие коэффициенты корреляции с годовыми значениями GPP и NPP ($r = 0,69$ и $0,66$ соответственно). Для посадок такой задержки связи выявлено не было.

Корреляция GPP и PSNnet с расчетным C_t для естественного леса показала ту же

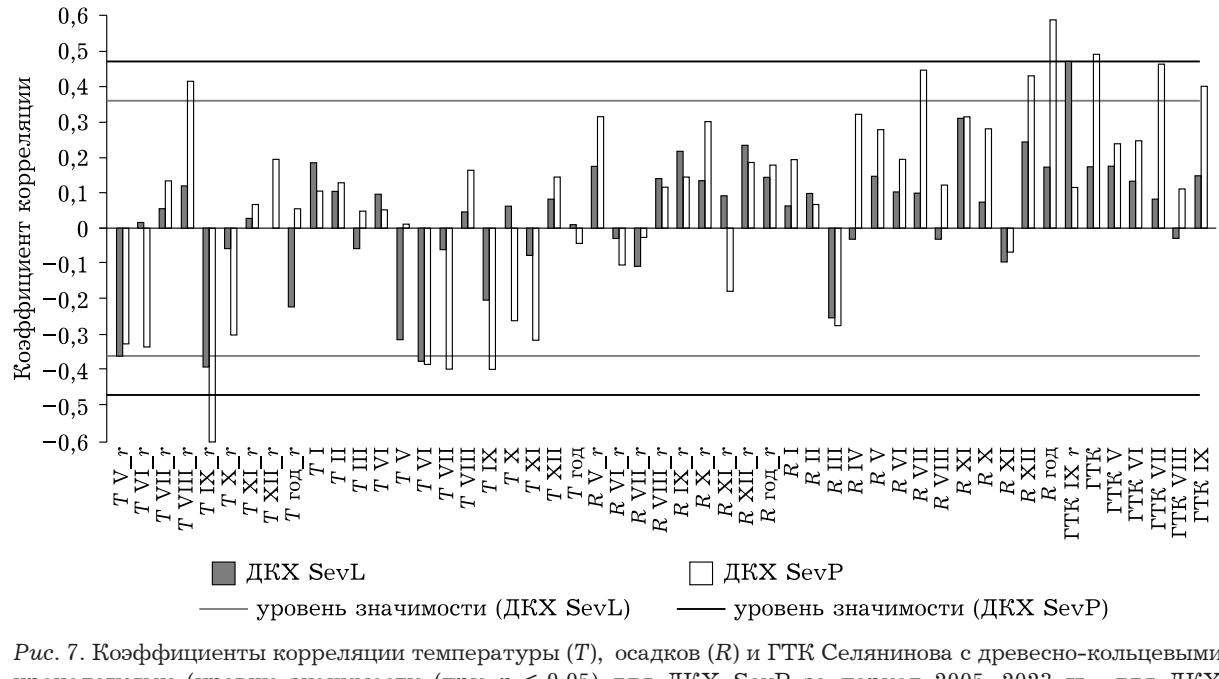


Рис. 7. Коэффициенты корреляции температуры (T), осадков (R) и ГТК Селянинова с древесно-кольцевыми хронологиями (уровни значимости (при $p < 0,05$) для ДКХ SevP за период 2005–2023 гг., для ДКХ SevL – за 1994–2023 гг.

Римские цифры – месяцы; r – значения прошлого года

зависимость, что и ДКХ (аналогичный период и величина коэффициента). Для посадок установлена тесная связь ежегодного депонирования C_t (расчетные значения) с показателями первичной продукции (ДЗЗ) в течение всего вегетационного периода (рис. 8, б), а также в целом за год. Наиболее высокие связи отмечены для июня – начала июля: суммы валовой первичной продукции ($r = 0,96$) и фотосинтеза ($r = 0,89$) с C_t за этот период демонстрируют максимально высокие коэффициенты корреляции.

При временном сдвиге ряда C_t , полученном на основе SevL, на 2 года вперед отмечается увеличение коэффициента корреляции с годовыми значениями GPP (0,58) и NPP (0,51), для посадок такого эффекта не установлено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в наборе климатических факторов, лимитирующих образование первичной продукции и радиальный рост деревьев, определяются биотической спецификой этих процессов. Важность метеорологических условий весны и осени для формирования первичной продукции также отмечалась ранее [Puchi et al., 2024], в том числе для интенсивности фо-

тосинтеза и стволового дыхания деревьев [Суворова и др., 2015]. Отсутствие традиционных дендроклиматических связей для ДКХ засушливых местообитаний [Малышева (Рыгалова), Быков, 2011] можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, удаленность ГМС Славгород от изучаемых полигонов может обуславливать различия в количестве осадков (в степной зоне в теплый период года осадки часто имеют конвективный характер и выпадают локально). Это также может быть причиной более слабой корреляции осадков (по сравнению с температурой) со значениями GPP и PSNnet (см. рис. 6). Подобный эффект удаленного расположения источника метеоданных отмечался ранее [Chiesi et al., 2005]. Во-вторых, отсутствие значимых коэффициентов корреляции с режимом увлажнения для лесной ДКХ (SevL) можно объяснить тем, что зрелые деревья имеют развитую корневую систему, обеспечивающую питание посредством грунтовых вод. По этой же причине молодняк сосны, который еще не сформировал мощный корневой аппарат, больше зависит от прихода атмосферной влаги. На влияние гидрогеологических и эдафических условий на радиальный рост сосны в ленточных борах указывалось ранее [Агафонов и др., 2021].

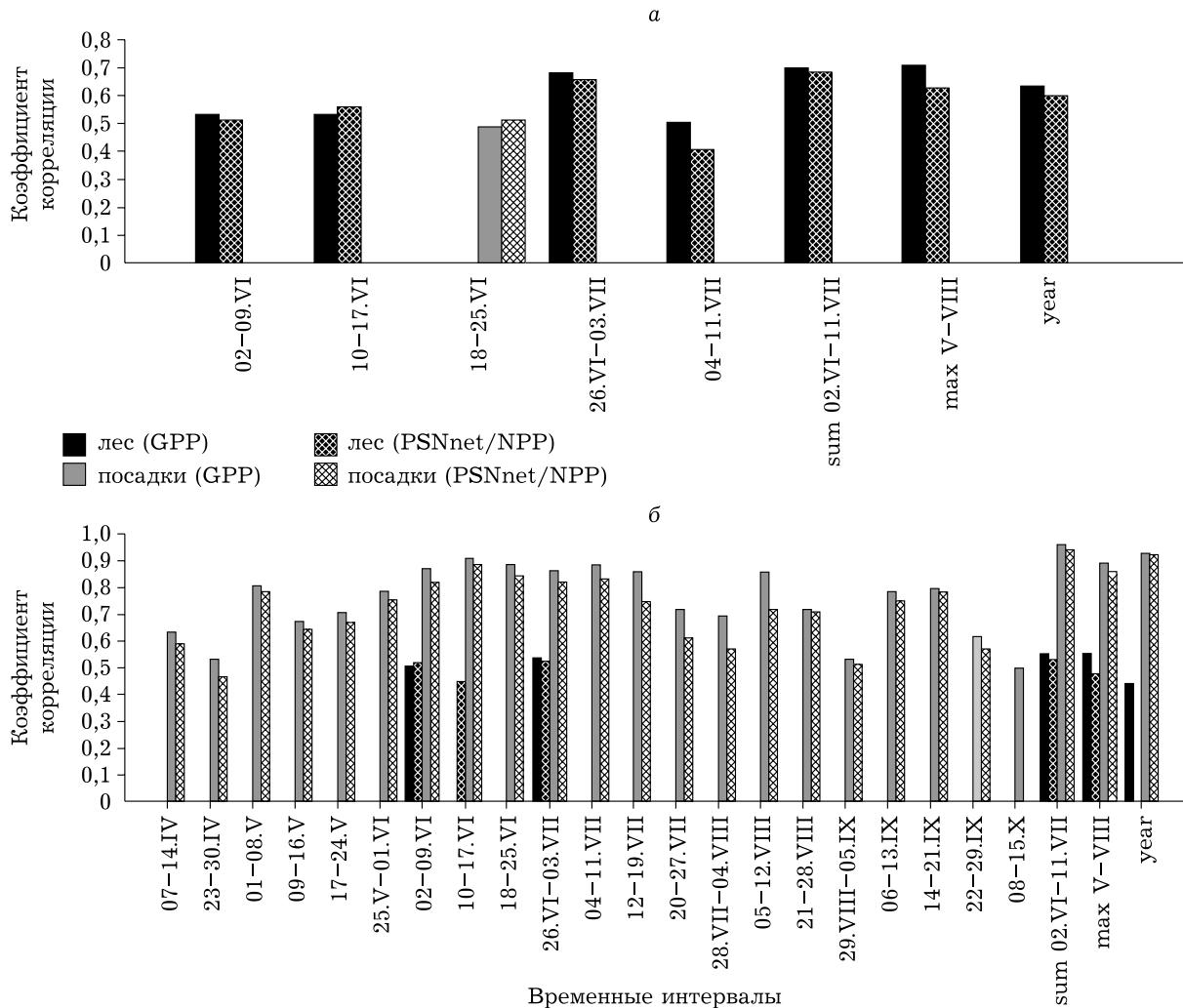


Рис. 8. Коэффициенты корреляция (значимы при $p < 0,05$) первичной продукции древостоя с ДКХ (а) и значением стволового углерода (б) для участков в лесу и на посадках. PSNnet приведен для 8-дневных интервалов, NPP – для года

Проведенный расчет ежегодного приращения C_t на основе древесно-кольцевых рядов показал результативность для одновозрастных лесных участков. Выполненная оценка фитомассы лесопосадок, которая предваряет расчеты C_t , сопоставима с ранее полученнымными лесохозяйственными данными на основе прямого обследования модельных деревьев в посадках сосны в Ключевском районе Алтайского края [Маленко и др., 2015]. Это верифицирует наши расчетные значения. Зная расстояние между деревьями в ряду и ширину междурядья, рассчитаны густота деревьев (около 4100 экз./га) и объем ежегодного депонирования C_t в молодых лесопосадках (около 2100 кг С га/год в стволовой фракции в среднем за последние 5 лет). Эти цифры со-

ответствуют величине NPP участка, зафиксированной с помощью ДЗЗ (~2800 кг С га/год за последние 5 лет), которая используется и для роста дерева, и для плодоношения и пр. [Vicente-Serrano et al., 2020], а также значениям, приведенных для подобных территорий [Volkov et al., 2023]. Сопоставимые результаты (с применением дендрохронологических и спутниковых данных) по депонированию углерода в лесах России получены впервые.

Одновременно были определены ограничения метода. Так, на данном этапе не удалось установить связь расчетного C_t для спелого разновозрастного леса с GPP/NPP, полученными дистанционно. Можно предположить несколько причин этого. Во-первых, разрешение снимков MODIS таково, что в один пиксел

ВЫВОДЫ

попадает квадрат 500×500 м, на котором произрастают деревья разных возрастных генераций. Отмечается [Xu et al., 2017; Lutz et al., 2018], что продуктивность лесов определяют прежде всего крупные и доминантные деревья в древостое. Этот подход изначально был взят в работе за основу. Однако результат исследования показал необходимость расширения выборки на участке естественного леса. Важность обеспечения надежной представленности деревьев разного возраста в выборке для точной оценки продуктивности обоснована в ряде статей [Nehrbass-Ahles et al., 2014; Xu et al., 2019; Wang et al., 2023]. Во-вторых, при расчетах C_t высота старовозрастных деревьев использовалась как константа в связи с малой скоростью роста вверх. Для молодняка изменение высоты дерева во времени в расчетах было учтено. Применение для спелого леса той же формулы, что и для посадок, невозможно из-за различной скорости роста древесного растения вверх на разных этапах жизни, что, по нашему мнению, может привести к накоплению ошибки для деревьев возрастом 120 лет и старше.

Отмеченный в ходе работы двухлетний сдвиг связи для лесного участка между полющаемым кроной объемом углерода и аккумулированным в древесине может быть определен длительной трансформацией части вещества внутри дерева. Это указывает на опосредованность связи между сравниваемыми показателями. Эффект запаздывания прироста ствола дерева относительно образования первичной продукции отмечался рядом исследователей [Kaufmann et al., 2008; Babst et al., 2014; Wong et al., 2021], а ранее также нами для связи ДКХ и NDVI (нормализованный дифференцированный вегетационный индекс) в схожих природно-климатических условиях [Рыгалова и др., 2024].

Использование годичного прироста деревьев для изучения и реконструкции первичной продукции и секвестрации углерода сопряжено с рядом проблем (методические сложности, масштабирование, аллометрическая неопределенность и неопределенность выборки [Babst et al., 2018]). Однако ряд исследователей [Bunn et al., 2013; Babst et al., 2014; Dye et al., 2016] указывают на преимущества и необходимость развития этого научного направления, а выявляемые проблемы определяют векторы новых исследований.

1. В ходе исследования установлены различия между видами продуктивности деревьев в естественном лесу и на лесопосадках. Для молодняка сосны показатели фотосинтеза и валовой первичной продукции были в 2 раза ниже в силу менее развитой кроны, а абсолютный прирост ствола по радиусу в 6 раз больше, чем у спелых деревьев за период 2000–2023 гг. Связь между образованием первичной продукции и ШГК установлена для периода июнь – начало июля (лесной участок) и второй половины июня (посадки).

2. Расчет ежегодного приращения углерода в стволе сосны показал, что за последние 5 лет в среднем одно дерево аккумулирует от 525 г С/год (посадки) до 565 г С/год (лес). Для молодых посадок сосны это соответствует ~ 2 т С га/год за последние 5 лет, что сопоставимо с годовыми значениями NPP данного древостоя. Расчетные значения стволового углерода для посадок сосны обыкновенной продемонстрировали тесную связь (коэффициент корреляции от 0,70 до 0,96) с показателями GPP/PSNnet/NPP вегетационного периода. Высокий уровень согласованности результатов дистанционного зондирования и дендрохронологических исследований позволяет использовать их для взаимной верификации и расширяет возможности для достоверной количественной оценки секвестрации углерода.

Благодарности

Авторы благодарят за консультацию по вопросу расчета фитомассы деревьев доктора сельскохозяйственных наук, заведующего кафедрой лесного хозяйства Алтайского государственного аграрного университета А. А. Маленко.

Вклад авторов

Рыгалова Н. В. – разработка концепции, сбор, обработка и измерение полевого материала, проведение исследования, подготовка и редактирование текста статьи; Мордвин Е. Ю. – сбор и обработка данных дистанционного зондирования, подготовка раздела статьи, редактирование текста; Бондарович А. А. – сбор полевого материала, подготовка раздела статьи, редактирование текста.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, вы-

полняемых в Алтайском государственном университете, проект FZMW-2023-0007).

Соблюдение этических стандартов

В настоящей работе не содержатся какие-либо исследования с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Л. И., Гурская М. А., Кукарских В. В., Бубнов М. О., Дэви Н. М., Галимова А. А. Островные боры Южного Урала и ленточные боры Алтая как объекты дендроклиматических исследований // Экология. 2021. № 5. С. 325–334. [Agafonov L. I., Gurskaya M. A., Kukarskikh V. V., Bubnov M. O., Devi N. M., Galimova A. A. Insular Pine Forests of the Southern Urals and Ribbon Pine Forests of the Altai as Objects of Dendroclimatic Research // Russian Journal of Ecology. 2021. N 52 (5). P. 349–357]. https://elibrary.ru/download/elibrary_46428064_22101113.pdf
- Алтайский край. Атлас. Т. И. М., Барнаул: ГУГК, 1978. 222 с.
- 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.
- Лесотаксационный справочник / сост. Б. И. Грошев, С. Г. Синицын, П. И. Мороз, И. П. Сеперович. М.: Лесная пром-сть, 1980. 288 с.
- Маленко А. А., Усольцев В. А., Субботин К. С. Надземная фитомасса деревьев сосны в культурах ленточных боров Западной Сибири // Вестн. Алт. гос. аграрн. ун-та. 2015. № 1 (123). С. 60–65. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22625762_78289315.pdf
- Малышева (Рыгалова) Н. В., Быков Н. И. Дендроклиматический анализ ленточных боров Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 6. С. 68–77. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17245798_64861276.pdf
- Матвеев С. М., Литовченко Д. А. Дендроклиматология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Усманского бора Воронежской области // Лесотехн. журн. 2023. Т. 13, № 4 (52). Ч. 2. С. 110–136. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20
- Оленин С. М., Мазепа В. С. Климатически обусловленная динамика радиального прироста сосны в ленточных борах Казахстана // Временные и пространственные изменения климата и годичные кольца деревьев. Каунас; Вильнюс, 1987. Ч. II. С. 53–61.
- Павлов И. Н., Барабанова О. А. Влияние географического происхождения сосны обыкновенной на форму ствola // Лесной и химический комплекс: проблемы и решения: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 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 // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 98–104. doi: 10.15372/SJFS20160410
- Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. М.: МГЭИК: ВМО, 2003. 330 с
- Рыгалова Н. В., Быков Н. И., Шигимага А. А. Радиальный рост древесных растений в экстразональных и антропогенных ландшафтах сухой степи Западно-Сибирской равнины // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28, № 1 (90). С. 73–79. doi: 10.24412/1993-3916-2022-1-73-79 [Rygalova N. V., Bykov N. I., Shigimaga A. A. Radial growth of woody plants in extrazonal and anthropogenic landscapes of the dry steppe of the Western Siberian plain // Arid Ecosystems. 2022. Vol. 12, N 1. P. 61–67.]
- 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. 2024. Т. 30, № 2 (99). С. 36–44. doi: 10.24412/1993-3916-2024-2-36-44 [Rygalova N. V., Plutalova T. G., Martynova Ya. V. Assessment of productivity indicators of plant communities of the steppe zone in Western Siberia obtained by remote sensing and dendrochronology // Arid Ecosystems. 2024. Vol. 14, N 2. P. 169–176].
- Специализированные массивы // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2023. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 31.03.2023).
- Суворова Г. Г., Осколков В. А., Стасова В. В., Антоно娃 Г. Ф. Соотношение ростовой активности, дыхательных затрат ствола и фотосинтетической продуктивности кроны сосны обыкновенной // Изв. Иркут. гос. ун-та. 2015. Т. 11. Сер. Биология. Экология. С. 2–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23438304>
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа 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.
- Anderegg W. R., Trugman A. T., Badgley G., Anderson C. M., Bartuska A., Cais P., ... Randerson J. T. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests // Science. 2020. Vol. 368 (6497). doi: 10.1126/science.aaaz7005
- Babst F., Alexander M., Szejner P., Bouriaud O., Klesse S., Roden J., Cais Ph., Poulter B., Frank D., Moore D., Trouet V. A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle // Oecologia. 2014. Vol. 176. doi: 10.1007/s00442-014-3031-6
- Babst F., Bodesheim P., Charney N., Andrew D., Friend A. D., Girardin M. P., Klesse S., Evans M. E. K. When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight // Quater. Sci. Rev. 2018. Vol. 197. P. 1–20. doi: 10.1016/j.quascirev.2018.07.009
- Bouriaud O., Breda N., Dupouey J.-L., Granier A. Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European Beech // Can. J. Forest Res. 2005. Vol. 35. P. 2920–2933. doi: 10.1139/X05-202
- 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 Res. Lett. 2013. Vol. 8. 035034 (8pp). doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035034
- 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 Meteorol. 2005. Vol. 135 (1–4). P. 22–34. doi: /10.1016/j.agrformet.2005.09.011
- Dian Yu., Guo Z., Liu H., Lin H., Huang L., Han Z., Zhou J., Teng M., Cui H., Wang P. A new index integrating forestry and ecology models for quantitatively characterizing forest carbon sequestration potential ability in a subtropical region // Ecol. Indicat. 2024. Vol. 158. P. 111358. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111358.
- Dye A., Barker Plotkin A., Bishop D., Pederson N., Poulter B., Hessl A. Comparing tree-ring and permanent plot estimates of aboveground net primary production in three eastern US forests // Ecosphere. 2016. Vol. 7 (9). e01454. doi: 10.1002/ecs2.1454
- Kaufmann R., D'Arrigo R., Paletta L., Tian H., Jolly W., Myneni R. Identifying Climatic Controls on Ring Width: The Timing of Correlations between Tree Rings and NDVI // Earth Interactions. 2008. Vol. 12 (14). P. 1–14. doi: 10.1175/2008EI263.1
- 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. doi: 10.3390/f14071336
- Lutz J. A., Furniss T. J., Johnson D. J., Davies S. J., Allen D., Alonso A., Anderson-Teixeira K. J., Andrade A., Baltzer J., Becker K. M. Global importance of large-diameter trees // Global Ecol. and Biogeogr. 2018. Vol. 27. P. 849–864. doi: 10.1111/geb.12747
- Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Eds.: E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 364 p.
- MOD17A2HGF MODIS / Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061>
- MOD17A3HGF MODIS / Terra annual Gross and Net Primary Production (GPP and NPP) L4 Global 500 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. URL: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061>
- 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 Biol. 2014. Vol. 20 (9). P. 2867–2885. doi: 10.1111/geb.12599
- Puchi P. F., Khomik M., Helgason W., Arain M. A., Castagneri D. Different climate conditions drive variations in gross primary productivity and woody biomass accumulation in a temperate and a boreal conifer forest in Canada // Agricultural and Forest Meteorol. 2024. Vol. 355. P. 110125. doi: 10.1016/j.agrformet.2024.110125
- Rocha A. V., Goulden M. L., Dunn A. L., Wofsy S. C. On linking interannual tree ring variability with observation of whole-forest CO₂ flux // Global Change Biol. 2006. Vol. 12 (8). P. 1378–1389. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01179.x
- 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.
- Vicente-Serrano S. M., Martín-Hernández N., Camarero J. J., Gazol A., Sánchez-Salguero R., Peña-Gallardo M., Kenawy A., Dominguez-Castro F., ... Galván D. Linking tree-ring growth and satellite-derived gross primary growth in multiple forest biomes. Temporal-scale matters // Ecol. Indicat. 2020. Vol. 108. 105753. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105753
- Volkov A., Belan L., Bogdan E., Suleymanov A., Tuktarov I., Shagaliev R., Muftakhina D. Spatio-Temporal Analysis of Forest Growing Stock Volume and Carbon Stocks: A Case Study of Kandry-Kul Natural Park, Russia // Land. 2023. Vol. 12. P. 1441. doi: 10.3390/land12071441
- 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 // Ecol. Indicat. 2023. Vol. 146. 109713. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109713
- 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. 112635. doi: 10.1016/j.rse.2021.112635
- 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 // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. 1945. doi: 10.1038/s41598-017-02022-6
- Xu K., Wang X., Liang P., Wu Y., An H., Sun H., Wu P., Wu X., Li Q., Guo X., Wen X., Han W., Liu Ch., Fan D. A new tree-ring sampling method to estimate forest productivity and its temporal variation accurately in natural forests // Forest Ecol. and Management. 2019. Vol. 433. P. 217–227. doi: 10.1016/j.foreco.2018.10.066

Productivity and carbon sequestration of *Pinus sylvestris* L. ribbon forests in the dry steppe of Western Siberia according to dendrochronology and MODIS satellite measurements

N. V. RYGAJOVA, E. YU. MORDVIN, A. A. BONDAROVICH

*Altai State University
61, Lenin ave., Barnaul, 656049, Russia
E-mail: natalia.ml@mail.ru*

Changes in the productivity of *Pinus sylvestris* L. were analyzed by remote sensing (gross and net primary production/photosynthesis) and dendrochronology (radial trunk growth) methods on two different-aged forest plots of ribbon pine forests in the dry steppe of Western Siberia. For both plots (young reforestation plantings and natural forest) a significant positive trend of primary production volume change over the period 2000–2023 was revealed. Differences in the set of climatic factors limiting stand primary production volume (spring and fall temperature and precipitation) and radial growth of pine were determined (last September temperatures are significant for pine of different ages, the sum of annual precipitation and Selyaninov hydrothermal coefficient of the growing season are also significant for young trees, and June temperature is also significant for mature forest). Correlations between the width of annual growth of model trees and primary stand production in June and early July for natural forest and in the second half of June for plantations were established. Calculations of the annual volume of carbon sequestration by trees based on tree-ring and biometric data showed that on average over the last 5 years, pine in the table fraction deposited from 525 g C/year (young plantings) to 565 g C/year (mature trees). The results of calculations of carbon sequestration volumes (for single-age pine plantations) are comparable in absolute terms and correlate with the values of primary stand production obtained remotely.

Key words: carbon sequestration, tree ring width, ribbon pine forests, Scots pine, dry steppe, gross and net primary production, MODIS.