

**Измерения характеристик природного композита древесины
методом аннигиляции позитронов на основе
имитационной модели годичного кольца***

К.П. Арефьев¹, Б.Г. Агеев², А.В. Батрагин¹, С.Л. Бондаренко³,
Ю.С. Бордулев¹, Р.С. Лаптев¹, Д.А. Савчук³, В.А. Сапожникова²,
С.Г. Стучебров¹, И.Г. Устинова¹, Цуй Цзянь¹, А.Д. Ломыгин¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

³ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

Рассматривается простейшая аддитивно-агрегатная модель, согласно которой в дендрохронологическом сигнале хвойных деревьев суммируются сигналы от трех основных агрегатных компонент – древесного вещества, воды и углекислого газа. Представлена интерпретация результатов измерений с использованием позитронной аннигиляционной спектроскопии, а также их сравнение с измерениями, полученными другими методами. Показаны новые возможности для изучения процессов, происходящих в деревьях и экосистеме.

Ключевые слова: *позитронная аннигиляционная спектроскопия, углекислый газ, имитационная модель, дендрохронологический сигнал, древесное вещество.*

Введение

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) – метод исследования структуры и свойств материалов путем изучения аннигиляционных характеристик позитронов с электронами вещества [1]. Измерения при помощи ПАС позволяют оценить свойства структуры древесины и ее дефекты, концентрацию различных элементов, плотность, могут быть экспертами состояния и перспектив дальнейшего роста.

Для интерпретации результатов измерений ПАС необходима имитационная модель, которая бы предварительно указывала на элементный состав древесного композита. Это модель годичного кольца, нарастающего каждый год древесного слоя ствола дерева. Модель учитывает взаимодействие между этими компонентами и их влияние на макро- и микромеханические свойства древесины, такие как механическая прочность, упругость, деформируемость и т.д. Учет структуры и соотношений компонент, а также их межфазных взаимодействий важен для объяснения и моделирования свойств древесины и устойчивости растущего дерева.

В модели также должны быть учтены особенности древесины, связанные с ее пористой структурой. Пористость древесины влияет на ее массу, плотность, теплопроводность и другие свойства. Кроме того, при моделировании природного композита древесины следует учитывать воздействие окружающей среды, включая влажность и температуру, а также внешние факторы, такие как механические нагрузки и воздействие вредителей.

В работе представлена простейшая аддитивная модель, предполагающая, что дендрохронологический сигнал является результатом суммирования сигналов трех основных компонент разной природы: древесного вещества, воды и углекислого газа. Такое разложение дендрохронологического отклика помогает лучше понять связь структуры годичного кольца с изменениями окружающей среды [2, 3].

В современных исследованиях при анализе растущего в естественных условиях дерева практически не используются свойства древесины как природного полимера и композита. Однако информация о структуре годичных колец и декомпозиция на отдельные элементы, ответственные за прирост, влажность и прочность, может оказаться более информативной, чем декомпозиция дендрохронологического сигнала (ДС) на климатические компоненты различной природы [4].

Измерения годичных колец методами ПАС и оптико-акустической спектроскопии позволяют выделить в серии измерений концентрацию углекислого газа и воды. Рентгенографический метод при помощи специальных алгоритмов позволяет визуализировать структуру древесины, а совре-

* Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

менное программное обеспечение – перевести графическое изображение в численные характеристики.

Цель работы – интерпретация результатов измерений структурных компонент стволовой древесины (древесное вещество, вода и углекислый газ) методом ПАС сопоставлением с результатами измерений характеристик древесины другими методами. В целом измерение композитного состава годовичных колец играет важную роль в получении информации о прошлых климатических условиях и экологических факторах, формирующих деревья.

Композитная модель ДС учитывает большее число биологических процессов, происходящих в годовичных кольцах хвойных деревьев, и обладает большим потенциалом для исследования и понимания прошлых климатических изменений, природных катастроф и технологических воздействий на древесину. Сравнение данных измерений с климатическими и радиационными показателями позволяет выявить связи между внешними факторами и процессом заполнения клеток древесины водой и углекислым газом. Например, при анализе наблюдается, что в условиях повышенного уровня ультрафиолетовой радиации (УФ-В) количественное заполнение водой может быть ниже, чем в условиях низкого уровня радиации. Это говорит о негативном влиянии УФ-В-излучения на процесс фотосинтеза и регуляции водного баланса. Надлежащее заполнение клеток древесины водой и углекислым газом является важным для нормального развития и роста деревьев. Отклонения от оптимальных значений могут привести к снижению продуктивности дерева (характеристика: содержание древесного вещества в годовичном кольце) и уязвимости деревьев перед различными стрессовыми факторами (пористость, пустоты).

Измерения методами позитронной аннигиляционной спектроскопии [5–8], компьютерной рентгеновской томографии (КТ) [9] и оптико-акустической спектроскопии (ОАС) [10] были выполнены на установках Томского политехнического университета (ТПУ) и Института оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН). Метод КТ позволяет исследовать структуру древесины в 3D-формате с микронным разрешением и оценить плотность годовичных колец. При помощи метода ОАС в годовичных кольцах измеряется содержание углекислого газа CO_2 , образованного в древесине в результате процессов дыхания.

Плотность древесины является ключевым параметром оценки природных процессов, расчета объема лесных запасов и запаса углерода, изучения физиологии деревьев и процесса формирования древесины. Реакция древесины на абиотические стрессы часто проявляется в значительном утолщении стенки растительной клетки, отраженном в изменениях плотности ее колец. По данным изменений плотности кольца можно восстановить картину климата в прошлом [11–13].

Полученные результаты могут быть использованы для изучения влияния различных факторов на рост и развитие древесины. Впоследствии эти данные могут быть использованы для исследования климата, поскольку годовичные кольца позволяют датировать изменения характеристик по временной шкале.

Материалы и методы измерений

Для образцов была выбрана древесина спиля сосны кедровой сибирской (рис. 1) комнатно-сухой влажности (8–12%) без видимых дефектов (для образцов свежей древесины влажность существенно выше 30–40%). Дерево выросло на юге Томской области (56°25' с.ш., 85°06' в.д., д. Трубачево).

Каждое годовичное кольцо ствола, образуемое в течение одного сезона вегетации в зоне умеренного климата, визуально делится на две зоны, клетки которых, называемые у хвойных трахеидами, отличаются друг от друга. Функция живых трахеид – транспорт воды и минеральных веществ от корней в крону, отмерших – механическая, опорная. В начале сезона формируется зона ранней древесины с почти квадратными на срезе клетками с тонкими оболочками, или стенками. В конце сезона образуется зона поздней древесины с прямоугольными на срезе клетками с толстыми стенками. В пределах одного кольца четкой границы между этими зонами нет, одна зона постепенно переходит в другую. На томографических изображениях это выглядит как плавный переход светло-серого цвета в темно-серый (рис. 2, а). Зато граница между соседними кольцами, образованными в смежные годы, обозначена четко, что используется при датировке данных.

Каждая клетка кольца состоит из протоплазмы, окруженной трехслойной оболочкой: наружный слой – из целлюлозы, средний – из гемицеллюлозы, внутренний – из лигнина. Молекулы этих веществ объединяет наличие углеродосодержащих цепочек. В оболочке клетки имеются поры, че-

рез которые внутрь клетки транспортируются вещества, растворенные в воде. Вода в живой древесине играет важнейшую роль в поддержании жизнедеятельности дерева [14, 15].

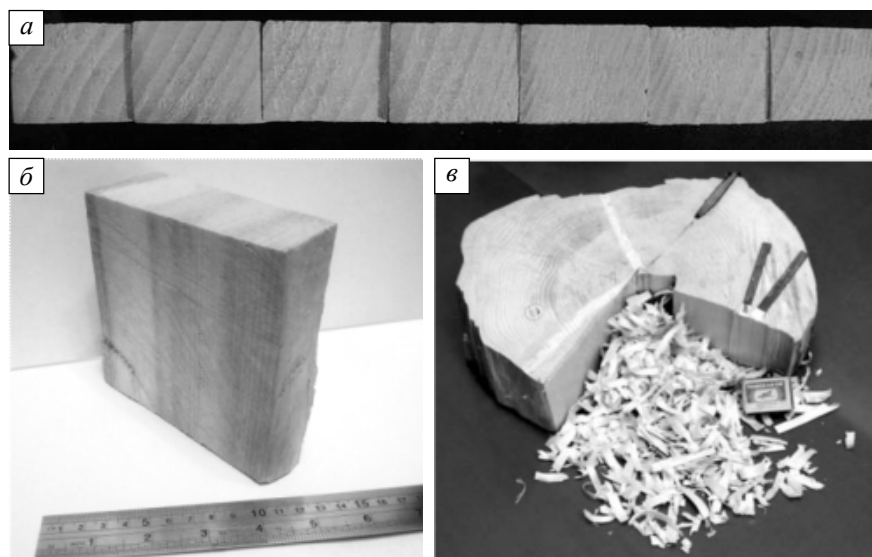


Рис. 1. Образцы древесины сосны кедровой сибирской (д. Трубачево, Томская область), подготовленные для анализа методами ПАС (а), КТ (б) и ОАС (в)

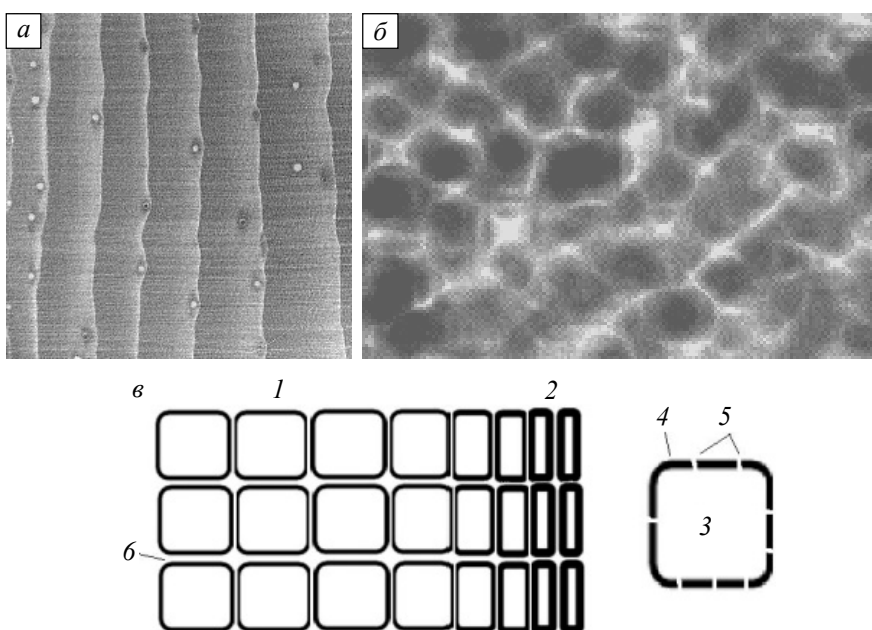


Рис. 2. Структура древесины сосны кедровой сибирской (д. Трубачево, Томская область): а – томограмма кубика сосны кедровой сибирской 6 мкм; б – увеличение томограммы в программе Photoshop; в – схема клетки древесины и ее расположение в структуре. Обозначения: 1 – крупные клетки ранней древесины с тонкими стенками; 2 – мелкие клетки поздней древесины с толстыми стенками; 3 – протоплазма клетки, основные компоненты которой вода и углекислый газ; 4 – оболочка (стенка) клетки; 5 – пора

Древесина – это материал, состоящий из нескольких компонент, представленных в различных агрегатных состояниях. Например, таблетка из прессованного древесного порошка может включать две компоненты: углерод и пустоты, причем их соотношение зависит от качества прессования. В образце древесины с сохраненной природной структурой выделяют три компоненты: угле-

род, а также основные наполнители – воду и углекислый газ, которые заполняют пустоты внутри материала.

Методика измерений методом ПАС

Для анализа использован гибридный цифровой комплекс позитронной спектроскопии с системой внешней синхронизации на основе модуля спектрометрии времени жизни позитронов (СВЖП), разработанный в Инженерной школе ядерных технологий ТПУ. Разрешение по времени модуля СВЖП составляет (172 ± 6) пс, скорость счета – (110 ± 30) событий в секунду. В качестве источника позитронов применен ^{44}Ti с активностью 1.38 МБк и максимальной энергией позитронов 1.47 МэВ. Для каждого образца набрано по четыре спектра времени жизни позитронов с общей статистикой $3 \cdot 10^6$ событий. Обработка данных осуществлена с использованием программного обеспечения LT10 (10.2.2.2) по мультиэкспоненциальной модели. В расчетах учитываются три компонента времени жизни позитронов (τ_1 , τ_2 , τ_3) и их относительные интенсивности (I_1 , I_2 , I_3). Для повышения точности компоненты τ_2 и τ_3 объединялись для всех четырех спектров каждого образца, компонента τ_1 объединялась для всех спектров образцов. Коррекция вклада источника позитронов (~ 16%) выполнена с использованием эмпирической функции, специфичной для данного источника и используемого спектрометрического модуля. Для источника компоненты аннигиляции составили: $\tau_{и1} = (145 \pm 1)$ пс (50.4%), $\tau_{и2} = (393 \pm 4)$ пс (42.3%), $\tau_{и3} = (1351 \pm 13)$ пс (7.3%).

Метод ПАС позволяет оценить характеристики трех структурных состояний годовых колец. Твердотельная компонента τ_1 содержит углеродные соединения лигнина и целлюлозы. Кроме углерода древесного вещества (50%), стенка клетки также содержит углерод, растворенный в воде (27%). Суммарную удельную массу углерода в объеме можно сопоставить с интенсивностью аннигиляции позитронов в общем спектре (I_1). Компонента жидкой фазы древесины τ_2 представлена связанной водой с растворенным в ней углекислым газом и водой в свободных полостях. Влажность образца может оцениваться по интенсивности аннигиляции позитронов в общем спектре (I_2). Пустоты или свободный объем, заполненный в образце в основном углекислым газом CO_2 – продуктом дыхания живых клеток, оцениваются по интенсивности аннигиляции в общем спектре (I_3) [11].

Модель годового кольца древесины, основанная на измерении компонентов времени жизни позитронов, позволяет выделить ключевые структурные компоненты кольца: древесное вещество, воду и углекислый газ. Процентное содержание этих компонентов определяет спектр дендрохронологического сигнала, который, в свою очередь, характеризует отклики деревьев на изменения окружающей среды. Зная процентное соотношение компонентов, образующих древесину в кольце, можно на основе суммирования временных рядов отдельных компонентов оценить структурные изменения.

ОАС-метод обнаружения остаточного углекислого газа в годовых кольцах

Образованный дыханием живых клеток ствола углекислый газ в растворенном виде вместе с ксилемным соком поднимается вверх к кроне. Часть его может быть вновь использована живыми клетками, а часть может диффундировать в атмосферу. При отмирании клеток неизрасходованный CO_2 остается в стволе. Многочисленные эксперименты показали наличие распределения остаточного CO_2 по годовым кольцам с концентрацией выше концентрации атмосферного CO_2 [15].

На установке ИОА СО РАН пары воды и углекислый газ извлекались из образцов древесины вакуумом. Измерения остаточного CO_2 проводились лазерным оптико-акустическим газоанализатором на трех линиях генерации CO_2 -лазера Р (20), Р (16), Р (14) 10-микронной полосы.

Для проверки того, что исследуемый CO_2 является продуктом дыхания клеток годовых колец, был проведен изотопный анализ углерода в составе CO_2 . Известно, что наземные растения имеют отношения стабильных изотопов углерода $(-22) \div (-32)\text{‰}$, а для атмосферы эта величина равна -8.5‰ . Полученные данные попадали в стандартный диапазон: $(-22) \div (-32)\text{‰}$, что подтверждает биологическую природу остаточного CO_2 .

Изотопный состав углерода древесины, водорода и кислорода воды измерялся в аккредитированной лаборатории изотопных методов ТФ ФГУП СНИИГГИМС (аттестат РОСС RU 001/517930).

Данные, полученные методом ОАС, использовались для сравнения с данными измерений CO_2 методом ПАС.

КТ-измерения плотности и структуры древесины

В основе метода компьютерной рентгеновской томографии лежит математическая реконструкция внутренней структуры образца древесины по измерениям поглощения рентгеновского излучения, многократно облучающего исследуемый объект в разных пересекающихся областях.

Поглощение излучения в веществе зависит от его плотности. Для количественной оценки рентгеновской плотности в эксперименте использовалась шкала относительных единиц, показывающая степень ослабления излучения в материале. Плотность изображения представлена в относительных единицах от 0 до 255 шкалы индексированных цветов, причем 0 – пустое пространство, черный цвет, 255 – максимальная плотность материала, белый цвет. При калибровке индексированных цветов на реальную плотность вещества были получены значения в диапазоне около 190 единиц КТ для воды (0.998 г/см^3), 150 КТ для смолы, значения индексов древесного вещества колебались в пределах 0–190. Плотность реконструированного изображения годовичных колец складывается из плотности древесного вещества, воды и свободного пространства; средняя по объему образца плотность сосны кедровой сибирской составила 0.4 г/см^3 . В целях биоиндикации результаты КТ-измерений образцов древесины могут быть датированы. Год взятия спила – это год последнего годовичного кольца у коры. Границы колец определяются по томограмме, где переходы одного кольца к другому визуально различимы.

Данные измерений методом КТ использовались для сопоставления с данными измерений характеристик древесины, полученных методом ПАС.

Интерпретация результатов измерений, полученных методом ПАС

Внедрение позитронов в исследуемый образец с последующей регистрацией характеристик гамма-излучения при аннигиляции позволяет использовать позитроны в качестве зонда древесины. Проникая из источника в древесину, позитроны термализуются, свободно диффундируют и аннигилируют, в основном, с электронами среды в областях материала с низкой плотностью.

Эксперименты по оценке биоиндикационных характеристик древесины следует проводить при одинаковых температуре и давлении. Параметры спектра аннигиляции позитронов зависят от структуры полимеров. Возможные каналы аннигиляции позитронов и электронов среды в твердом веществе включают аннигиляцию позитронов в квазисвободных столкновениях с электронами вещества или образование связанной квантово-механической системы электрона и позитрона – позитрония. Последний процесс преимущественно происходит в жидких или газообразных средах [16, 17].

Ослабление потока позитронов при прохождении кубика толщиной 2 см происходит по экспоненциальному закону $I_+ = I_0 \cdot \exp(-\mu \rho z)$, где μ – массовый коэффициент поглощения позитронов; ρ – плотность образца (древесины); I_0 – интенсивность падающего, а I_+ – прошедшего излучения.

Аппаратура регистрирует распределение, представляющее собой суперпозицию нескольких состояний аннигиляции позитронов. Интенсивность временных компонент аннигиляции позитронов зависит от интенсивностей этих состояний: $N(t) = \int R(t) \sum_{i=1}^n I_i \exp\left(-\frac{x_1}{\tau_i}\right) dt$, где $R(t)$ – аппаратная функция; n – число компонент спектра; набор характеристик времен τ_i (нс) и соответствующих им статистических весов или интенсивностей компонент I_i (%) [17].

При росте доли твердотельной компоненты в древесине вероятность аннигиляции позитрона в материале, как и плотность стенок клеток древесного вещества, возрастают. Часть позитронов аннигилирует с электронами на поверхности углеродосодержащих молекул древесной клетки. Зона с высокой электронной плотностью (лигнино-целлюлозная древесная сетка годовичного кольца) характеризуется коротким временем жизни позитрона $\tau_1 = 340\text{--}400$ пс. Данная компонента совпадает с временем жизни позитронов, измеренных для таблеток из прессованных порошков лигнина и целлюлозы (около 380 пс). Позитроны, не захваченные древесной матрицей, попадают в зоны с меньшей электронной плотностью (с образованием ортопозитрония): пустоты, в которых находят-

ся связанная вода или растворенный в воде CO_2 . При этом временные компоненты для этих состояний возрастают. Время жизни ортопозитрония (τ_2) в питательном растворе составляет 900–1200 пс. Компоненту (I_2, τ_2) для сухой древесины в процентном соотношении можно сопоставить с влажностью древесины, а рассчитанные по данным характеристики могут быть связаны с диаметром клетки и порами в стенке клетки. Интенсивность аннигиляции ортопозитрония (I_3) со средой, содержащей углекислый газ, незначительна и в процентном соотношении соответствует среднему содержанию CO_2 в древесине. При этом время жизни ортопозитрония в свободных полостях трахеид достигает 1850 пс.

Большинство теорий, описывающих взаимодействие физической системы «древесина – вода», имеют феноменологический и описательный характер [18]. Взаимодействие между первой и второй компонентами приводит к изменению свойств обеих: древесное вещество при увлажнении переходит из застеклованного состояния в коллоидное, а вода – из свободного состояния в связанное. Относительная плотность древесины будет представлять собой долю твердого вещества в материале. В среднем твердотельная фракция древесины содержит 0.5 единиц углерода в древесной матрице и 0.27 единиц растворенного в воде углерода.

Таким образом, позитронная аннигиляционная спектроскопия является чувствительным методом для определения пористости древесины [19]. На основе данных о пористости, связанной с дыханием клеток, можно оценить влияние атмосферных и климатических факторов, а также анализировать годичный прирост и структуру древесины.

Анализ и сравнение результатов измерений, полученных методами ПАС, ОАС и КТ

При пересчете по процентному содержанию в зарегистрированном спектре ПАС I_1 в единицах КТ (относительная плотность) для семи образцов получаем ряд значений твердотельной составляющей древесины в годичных кольцах с равномерным распределением по временной шкале за период с 1927 по 2007 г. (рис. 3, а). Значения I_2 и I_3 в спектре ПАС сопоставлены с относительной влажностью и содержанием CO_2 годичного кольца и интерполированы с годичным шагом в интервале 1927–2007 гг. и сглажены по 5 точкам FFT-фильтром (рис. 3, б, в).

На рис. 4 представлены относительные результаты сравнения измерений содержания CO_2 методами ПАС и ОАС для образцов с одного и того же дерева для периода 1927–1994 гг. Наилучшее совпадение данных достигается для измерений на линии лазера Р (16), значимая корреляция временных рядов составляет 0.72.

На рис. 5 показаны следующие данные по Томской области:

- интенсивности компонент времени жизни позитронов I_1, I_2, I_3 из эксперимента ПАС для сосны кедровой сибирской;
- MXD – максимальная плотность годичных колец, что соответствует процентному содержанию древесной составляющей;
- ОСО (общее содержание озона) – средние за теплое полугодие значения с 1979 по 2007 г. по спутниковым данным [4];
- CO_2 в древесине – показатель сухости (аридности) климата IDM (индекс де Мартона) – глобальный рост температуры повсеместно вызывает увеличение сухости климата, что приводит к сокращению CO_2 в древесине. Индекс де Мартона находится как частное полугодовой (за теплый сезон) суммы осадков в мм (P) и суммы средней годовой температуры (T), увеличенной на 10, т.е. по формуле $\text{IDM} = P/(T+10)$.

Приведенные выше данные различной природы стандартизовались (в терминах индексов) по формуле

$$\text{Index}(t) = [X(t) - \text{mean}] / \text{STD}, \quad (1)$$

где $X(t)$ – значение показателя; mean – среднее значение показателя; STD – среднее квадратическое отклонение. Временные интервалы (t) – разные, что связано с наличием разных диапазонов измерений исходных данных.

Тренды на рис. 5 нелинейные, падающие и растущие и демонстрирующие синхронные изменения климатических параметров и данных, получены методом ПАС для отдельных компонент древесины: дерево (I_1) – MXD, вода (I_2) – ОСО; CO_2 (I_3) – IDM.

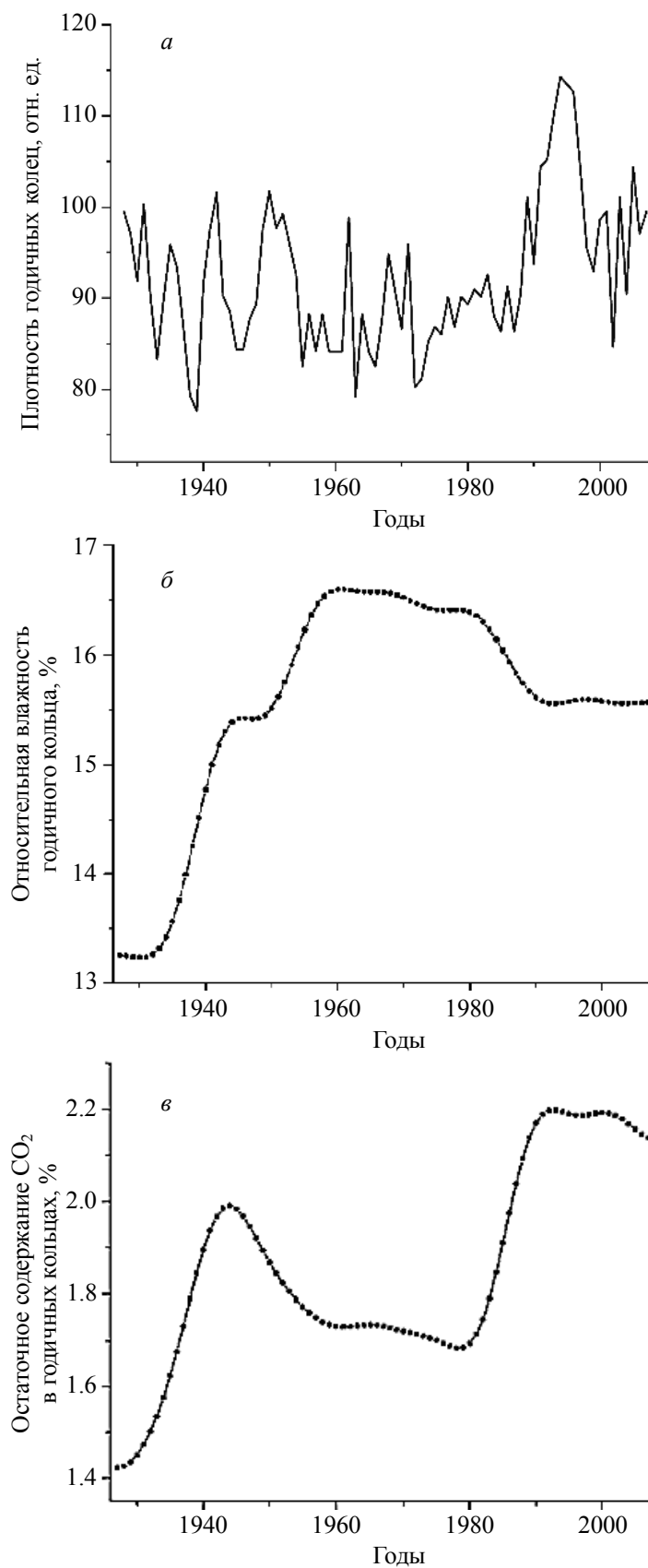


Рис. 3. Временные ряды индексированных компонент древесины сосны кедровой сибирской (д. Трубачево, Томская область) с 1927 по 2007 г.: *a* – плотность годовичных колец; *б* – влажность годовичных колец; *в* – остаточная концентрация CO₂ годовичных колец



Рис. 4. Временные ряды остаточного CO_2 в относительных единицах с 1927 по 1994 г. для сосны кедровой сибирской (д. Трубачево, Томская область): по данным ПАС (I_3) (толстая кривая); ОАС (тонкая кривая)

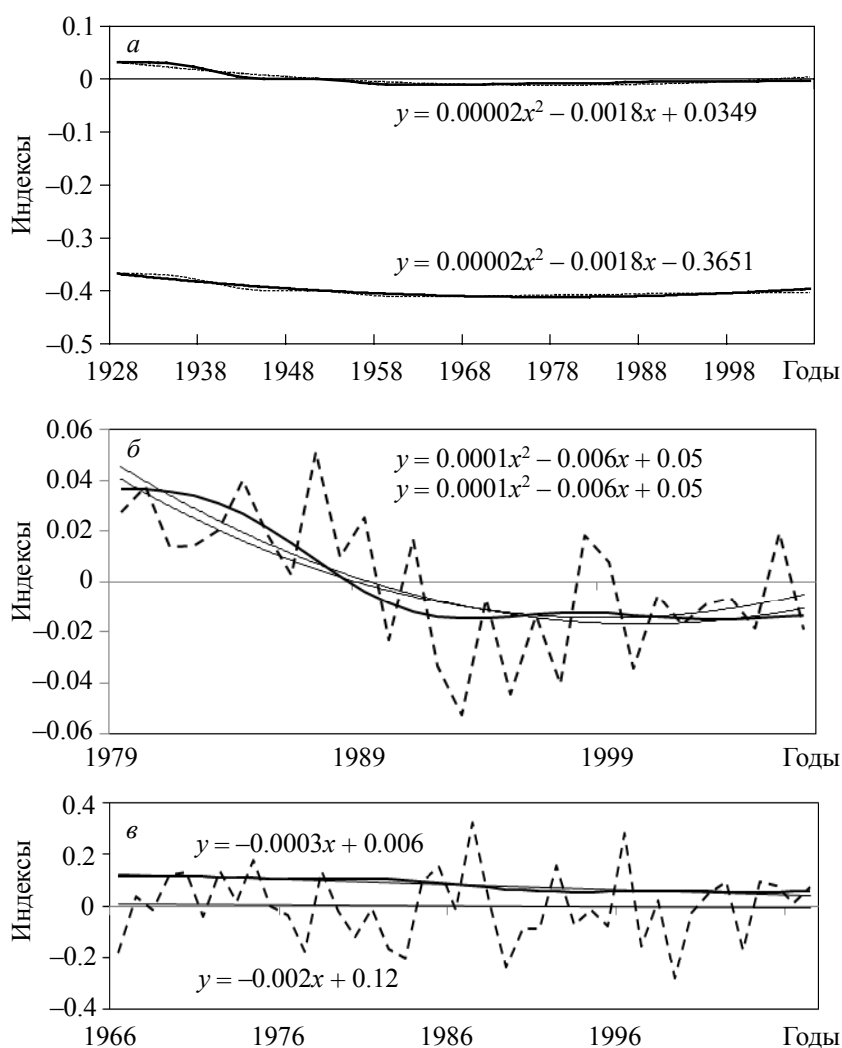


Рис. 5. Систематические составляющие (тренды индексов) для интенсивностей компонент времени жизни позитронов (I_1 , I_2 , I_3) и текущего параметра (MXD, OCO, CO_2) за вычетом среднего значения (тонкая кривая) для: а – древесной компоненты I_1 (толстая сплошная кривая) и MXD (штриховая кривая); б – водной компоненты I_2 (толстая сплошная кривая) и OCO (штриховая кривая); в – газообразной компоненты I_3 (толстая сплошная кривая) и CO_2 (штриховая кривая). Оценки коэффициентов уравнений (трендов) получены методом наименьших квадратов

Оценка применимости методики измерений ПАС для изучения структуры древесины

Применимость предложенной методики может быть ограничена условиями, когда изучаемые образцы древесины имеют значительные вариации в микроструктуре или содержат нестабильные включения других элементов, таких как загрязнители. Кроме того, метод ПАС чувствителен к размеру пор и составу древесины, что может затруднить анализ в случаях, когда структура древесины варьируется в зависимости от типа породы или климатических условий. Тем не менее проведенные сравнительные исследования с традиционными методами компьютерной томографии и оптико-акустической спектроскопии подтвердили корреляцию результатов (например, для содержания CO_2 коэффициент корреляции составил 0.72), что указывает на высокую надежность данных, полученных методом ПАС.

Данная методика особенно эффективна при исследовании природных композитов с четко выраженной пористой структурой и стабильным химическим составом. В тех случаях, когда требуется изучение материалов с более сложными и неоднородными структурами, может потребоваться дополнительное использование других методов анализа для уточнения результатов.

Заключение

По результатам сравнения измерений характеристик образцов стволовой древесины одного и того же дерева – сосны кедровой сибирской, а также таблеток лигнина и целлюлозы методами ПАС, КТ и ОАС были сделаны следующие выводы:

- диагностические измерения времени жизни позитрона τ_1 в таблетках лигнина и целлюлозы позволяют заключить, что измеряется аннигиляция позитронов в древесном веществе;
- аннигиляция ортопозитрония, выраженная временной компонентой τ_2 , происходит в воде, обнаруженной в порах стенок клетки диаметром 0.47 нм. Характеристика данного параметра – относительная влажность древесины в годовичных кольцах;
- временная компонента τ_3 связана с аннигиляцией ортопозитрония в порах, заполненных CO_2 . В данном случае характеристика представляет остаточное содержание CO_2 в годовичных кольцах. Также стоит отметить, что корреляция результатов измерений CO_2 методами ПАС и ОАС составляет 0.72;
- данные ПАС с послойным разбиением древесины (2 см) формируют ряд с неравномерной временной шкалой, которая обусловлена большим разбросом ширины годовичных колец. В данном случае число колец по ширине 2 см варьируется от 3 до 21.

В работе представлены результаты поиска откликов дерева в компонентах древесины различной природы, которые меняются под воздействием окружающей среды. При этом направления трендов сохраняются для всех трех компонент.

Таким образом, проведенный анализ измерений характеристик годовичных колец на основе имитационной модели природного композита древесины сосны кедровой сибирской позволил интерпретировать результаты измерений методом ПАС. Эти результаты имеют важное значение для дендрохронологии и изучения изменений климата, а также могут быть использованы в лесоведении и лесном хозяйстве. Несмотря на высокую эффективность предложенной методики, ее применимость может быть ограничена в условиях значительных вариаций микроструктуры древесины или нестабильных включений других элементов. Однако сравнительные исследования с традиционными методами КТ и ОАС показали высокую корреляцию данных, подтверждая надежность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Графутин В.И., Илюхина О.В., Козлов Ю.Ф. и др. // НиКа. – 2013. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-prirody-kontsentratsiy-i-razmerov-nanoobektov-v-tehnicheski-vaznyh-materialah-i-nanomaterialah-metodami-pozitronnoy> (дата обращения: 04.03.2024).
2. Stoffel M., Corona C. // Tree-Ring Research. – 2014. – V. 70. – No. 1. – P. 3.
3. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 56. – DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282.
4. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 174. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-izmeneniy-stratosfernogo-ozona-v-tayozhnoy-zone-na-osnove-singulyarnogo-spektralnogo-analiza> (дата обращения: 14.03.2024).

5. Panzarasa G., Consolati G., Scavini M., et al. // C – J. Carbon Res. – 2019. – V. 5. – No. 1. – P. 6. – DOI: 10.3390/c5010006.
6. West D.H.D., McBrierty V.J., Delaney C.F.G. // Appl. Phys. – 1979. – V. 18. – P. 85.
7. Nuruddin Md., Chowdhury R., Lopez-Perez N., et al. // ACS Appl. Mater. Interfac. – 2020. – V. 12. – No. 21. – P. 24380. – DOI: 10.1021/acsami.0c05738.
8. Mendis G.P. // Purdue University, Pro Quest Dissertations Publishing. – 2017. – URL: http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res_dat=xri:pqm&rft_dat=xri:pqdiss:10269498 (дата обращения: 04.03.2024).
9. Bondarenko S.L., Batranin A.V., Smirnov S.V., Stuchebrov S.G. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 211(1). – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012044> (дата обращения: 11.03.2019).
10. Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Ageev B.G., et al. // Dokl. EarthSci. – 2013. – V. 450. – Part 2. – P. 652. – URL: [u-godichnyh-kolets-hvoynih-proizrastayushih-v-razlichnyh-topoekologicheskikh](https://www.godichnyh-kolets-hvoynih-proizrastayushih-v-razlichnyh-topoekologicheskikh) (дата обращения: 05.11.2024).
11. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: монография. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ), 2020. – 179 с. – URL: <https://h.twirpx.one/file/4105269/>.
12. Гавриков В.Л. Рост леса: уровни описания и моделирования. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 176 с. – URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/342968/reading> (дата обращения: 19.12.2024).
13. Бабушкина Е.А., Ваганов Е.А., Силкин П.П. // Журнал Сибирского федерального университета. Биология 2. – 2010. – № 3. – С. 159.
14. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений: пер. с англ. И.Г. Завадской и др. – М.: Лесная промышленность, 1983. – 462 с.
15. Агеев Б.Г., Груздев А.Н., Матяшенко Г.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 11. – С. 1007. – URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=150248&ARTICLE_ID=150262 (дата обращения: 19.07.2019).
16. Илюхина О.В., Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В. // НиКа. – 2017. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-razмеров-nanoobjektov-v-poristyh-sistemah-defektnyh-materialah-i-nanomaterialah-na-osnove-kremniya-i-v-obluchennyh-metallah-i> (дата обращения: 23.07.2020).
17. Графутин В.И., Прокопьев Е.П. // УФН. – 2002. – Т. 172. – Вып. 1. – С. 67.
18. Чудинов Б.С. Вода в древесине / отв. ред. д.т.н. проф. В.А. Баженов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/cudinvoda/index.htm>.
19. Арефьев К.П., Бондаренко А.Л., Бондаренко С.Л. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 11/2. – С. 261.

Поступила в редакцию 13.06.2024,
принята в печать 18.12.2024.

Арефьев Константин Петрович, д.ф.-м.н., профессор Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ, e-mail: kpu@tpu.ru;

Агеев Борис Григорьевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. лаборатории атмосферной абсорбционной спектроскопии ИОА СО РАН, e-mail: ageev@iao.ru;

Батранин Андрей Викторович, к.т.н., доцент Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности НИ ТПУ, e-mail: batranin@tpu.ru;

Бондаренко Светлана Леонидовна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. лаборатории физики средней атмосферы ИМКЭС СО РАН, e-mail: bond_sl@inbox.ru;

Бордулев Юрий Сергеевич, к.ф.-м.н., науч. сотр. Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ, e-mail: bordulev@tpu.ru;

Лаптев Роман Сергеевич, к.т.н., доцент Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ, e-mail: laptevrs@tpu.ru;

Савчук Дмитрий Анатольевич, к.б.н., ст. науч. сотр. лаборатории динамики и устойчивости экосистем ИМКЭС СО РАН, e-mail: savchuk@imces.ru;

Сапожникова Валерия Александровна, ведущ. инженер лаборатории атмосферной абсорбционной спектроскопии ИОА СО РАН, e-mail: sapo@iao.ru;

Стучебров Сергей Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов НИ ТПУ, e-mail: stuchebrov@tpu.ru;

Устинова Ирина Георгиевна, к.т.н., доцент Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ, e-mail: igu@tpu.ru;

Цуй Цзян, аспирант Отделения математики и информатики Школы базовой инженерной подготовки НИ ТПУ, e-mail: ttszyan@mail.ru;

Ломыгин Антон Дмитриевич, ассистент Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ, e-mail: adl4@tpu.ru.

Measurements of the characteristics of a natural wood composite by positron annihilation based on a simulation model of the annual ring

K.P. Aref'ev¹, B.G. Ageev², A.V. Batratin¹, S.L. Bondarenko³,
Y.S. Bordulev¹, R.S. Laptev¹, D.A. Savchuk³, V.A. Sapozhnikova²,
S.G. Stuchebrov¹, I.G. Ustinova¹, Cui Jian¹, A.D. Lomygin¹

¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

³ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Abstract: The article considers the simplest additive-aggregate model, according to which the signals from 3 main aggregate components – woody substance, water, and carbon dioxide are summed up in the dendrochronological signal of coniferous trees. The interpretation of the results of measurements using positron annihilation spectroscopy and their comparison with the results of measurements obtained by other methods are presented. New possibilities for studying the processes occurring in trees and the ecosystem are shown.

Keywords: positron annihilation spectroscopy, carbon dioxide, simulation model, dendrochronological signal, woody substance.

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the state budget theme No. 121031300156-5.

For citation: Aref'ev K.P., Ageev B.G., Batratin A.V., Bondarenko S.L., Bordulev Y.S., Laptev R.S., Savchuk D.A., Sapozhnikova V.A., Stuchebrov S.G., Ustinova I.G., Cui Jian, Lomygin A.D. (2025) Measurements of the characteristics of a natural wood composite by positron annihilation based on a simulation model of the annual ring. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 68(1). pp. 40–51. DOI: 10.17223/00213411/68/1/5

REFERENCES

1. Grafutin V.I., Ilyukhina O.V., Kozlov Yu.F., et al. (2013) *Scientific Journal «Nadezhnost' i kachestvo»*. 10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-prirody-kontsentratsiy-i-razmerov-nanoobektov-v-tehnicheski-vaznykh-materialah-i-nanomaterialah-metodami-pozitronnoy> (date of access: 04.03.2024). (In Russian.)
2. Stoffel M., Corona C. (2014) *Tree-Ring Research*. 70(1). p. 3.
3. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Ustinova I.G. (2023) *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 334(12). p. 56. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4282 (In Russian.)
4. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Ustinova I.G. (2022) *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 333(3). p. 174. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-izmeneniy-stratosfernogo-ozona-v-tayozhnoy-zone-na-osnove-singulyarnogo-spektralnogo-analiza> (date of access: 14.03.2024). (In Russian.)
5. Panzarasa G., Consolati G., Scavini M., et al. (2019) *C - Journal of Carbon Research*. 5(1). p. 6. DOI: 10.3390/c5010006
6. West D.H.D., McBrierty V.J., Delaney C.F.G. (1979) *Journal of Applied Physics*. 18. p. 85.
7. Nuruddin Md., Chowdhury R., Lopez-Perez N., et al. (2020) *ACS Applied Materials & Interfaces*. 12(21). p. 24380. DOI: 10.1021/acsami.0c05738
8. Mendis G.P. (2017) *Purdue University, Pro Quest Dissertations Publishing*. URL: http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&res_dat=xri:pqm&rft_dat=xri:pqdiss:10269498 (date of access: 04.03.2024).
9. Bondarenko S.L., Batratin A.V., Smirnov S.V., Stuchebrov S.G. (2018) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 211(1). URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012044> (date of access: 11.03.2019).
10. Sapozhnikova V.A., Gruzdev A.N., Ageev B.G., et al. (2013) *Doklady Earth Sciences*. 450. Part 2. p. 652. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012013413000652> (date of access: 05.11.2024).
11. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. (2020) *Kvalimetriya fitomassy lesnykh derev'ev: plotnost' i sodержanie sukhogo veshchestva* [Qualimetry of forest tree phytomass: density and dry matter content]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University. URL: <https://h.twirpx.one/file/4105269/> (In Russian.)
12. Gavrikov V.L. (2013) *Rost lesa: urovni opisaniya i modelirovaniya* [Forest growth: levels of description and modeling]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/342968/reading> (date of access: 19.12.2024). (In Russian.)
13. Babushkina E.A., Vaganov E.A., Silkin P.P. (2010) *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* 2. 3. p. 159. (In Russian.)
14. Kramer Paul J., Kozlowski Theodore T. (1979) *Physiology of Woody Plants*. New York: Academic Press.
15. Ageev B.G., Gruzdev A.N., Matyashenko G.V. et al. (2012) *Optika atmosfery i okeana*. 25. 11. p. 1007. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=150248&ARTICLE_ID=150262 (date of access: 19.07.2019). (In Russian.)
16. Ilyukhina O.V., Prokop'ev E.P., Funtikov Yu.V. (2017) *Scientific Journal «Nadezhnost' i kachestvo»*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-razmerov-nanoobektov-v-poristyyh-sistemah-defektnykh-materialah-i-nanomaterialah-na-osnove-kremniya-i-v-obluchennykh-metallakh> (date of access: 23.07.2020). (In Russian.)

17. Grafutin V.I., Prokop'ev E.P. (2002) *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 172(1). p. 67. (In Russian.)
18. Chudinov B.S. (1984) *Voda v drevesine* [Water in wood]. Novosibirsk: Nauka. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/cudin voda/index.htm> (In Russian.)
19. Aref'ev K.P., Bondarenko A.L., Bondarenko S.L., et al. (2014) *Izvestiya vuzov. Fizika*. 57(11/2). p. 261. (In Russian.)

The article was submitted 13.06.2024,
accepted for publication 18.12.2024.

Aref'ev Konstantin P., Dr.Sc., Professor of TPU, e-mail: kpu@tpu.ru;
Ageev Boris G., Ph.D., Senior Researcher of IAO SB RAS, e-mail: ageev@iao.ru;
Batranin Andrey V., Ph.D., Associate Professor of TPU, e-mail: batranin@tpu.ru;
Bondarenko Svetlana L., Ph.D., Senior Researcher of IMCES SB RAS, e-mail: bond_sl@inbox.ru;
Bordulev Yuriy S., Ph.D., Researcher of TPU, e-mail: bordulev@tpu.ru;
Laptev Roman S., Ph.D., Associate Professor of TPU, e-mail: laptevrs@tpu.ru;
Savchuk Dmitry A., Ph.D., Senior Researcher of IMCES SB RAS, e-mail: savchuk@imces.ru;
Sapozhnikova Valeriya A., Leading Engineer of IAO SB RAS, e-mail: sapo@iao.ru;
Stuchebrov Sergiy G., Ph.D., Associate Professor of TPU, e-mail: stuchebrov@tpu.ru;
Ustinova Irina G., Ph.D., Associate Professor of TPU, e-mail: igu@tpu.ru;
Cui Jian, Postgraduate Student of TPU, e-mail: ttszyan@mail.ru;
Lomygin Anton D., Assistant of TPU, e-mail: adl4@tpu.ru.