

## Сезонные изменения температуры в стволе живого дерева (на примере сосны)

Д. А. Романов<sup>1</sup>, И. В. Рябинин<sup>2</sup>, А. Н. Романов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: zzzromanovzzz@mail.ru

<sup>2</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия  
E-mails: cgsiena@gmail.com, romanov\_alt@mail.ru

Деревья на протяжении своего жизненного цикла испытывают влияние разных природных факторов. На физиологические особенности дерева значительное воздействие оказывает его температура. Измерение температуры деревьев представляется актуальным и востребованным в разных отраслях науки и техники. В данной работе приведены результаты сезонных и суточных изменений температуры в стволе дерева породы сосна (*Pinus*) в период с октября по апрель. Для измерения температуры в стволе дерева использовались датчики TMP1075. Сбор данных с температурных датчиков осуществлялся с помощью базовой станции, работающей под управлением микроконтроллера STM32L431. Результаты измерений записывались на флэш-карту и через приёмопередатчик SX1278 отправлялись на приёмную станцию с аналогичным приёмопередатчиком и доступом к глобальной сети. На приёмной стороне была организована база данных. Опрос температурных датчиков осуществлялся с периодичностью 1 мин. Были исследованы суточные вариации температуры на поверхности и в стволе дерева в зимний и весенний периоды. Радиальные зависимости температуры в стволе дерева аппроксимированы полиномом 2-й степени. Показано, что радиальные зависимости температуры в стволе дерева, зависящие от температуры окружающей среды, существенно различаются. Разница температур между поверхностными и глубинными слоями в стволе дерева достигала 12 °С. Полученные результаты указывают, что по измеренной температуре окружающей среды может быть рассчитана температура в стволе дерева на разной глубине.

**Ключевые слова:** дерево, ствол, температура, сезонная динамика, суточная динамика

Одобрена к печати: 22.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-142-154

### Введение

Деревья играют важную роль в жизнедеятельности человечества, во многом определяя качество жизни людей, являясь важным природным ресурсом для баланса экосистем, развития и озеленения городов. На протяжении своего жизненного цикла деревья испытывают влияние разнообразных природных факторов (сезонность, гидрологические и климатические изменения, лесные пожары, засухи, переувлажнение и затопление лесов) и антропогенное воздействие (загрязнение воздуха, выпадение кислотных дождей, деградация почв). Соответственно, возникает необходимость в мониторинге физиологического состояния леса, осуществляемом как традиционными наземными методами (визуальные наблюдения отдельных деревьев или групп деревьев, измерение температуры, плотности, влажности древесины), так и на основе дистанционного зондирования в разных диапазонах электромагнитных волн (Tuominen et al., 2009). Сохранение деревьев стало серьёзной проблемой для всего мирового сообщества.

В значительной мере физиологическое состояние дерева зависит от температуры окружающей среды ( $t_0$ ), обуславливающей сезонную динамику водного режима дерева и оказывающей влияние на формирование годичных колец и ежегодный прирост деревьев (Берри и др., 1983; Долгова и др., 2019; Журавлева и др., 2020; Иванов и др., 2021; Камалова и др., 2018; Кухта и др., 2014; Усольцев, Цепордей, 2021; Цельникер, 1996). Величина  $t_0$  — основной лимитирующий фактор начала весенних фенологических фаз (Марченко, Иванов, 2021). Сроки

наступления большей части фенофаз у древесной растительности в значительной степени зависят от  $t_0$ , в меньшей — от влажности воздуха, атмосферных осадков и солнечной радиации (Кищенко, 2020). Влияние  $t_0$  на прирост деревьев изучено в разных регионах Российской Федерации (Данчева и др., 2020; Магда, Ваганов, 2006; Николаева, Савчук, 2014; Ойдупаа и др., 2004; Пинаевская, 2018; Пинаевская и др., 2020; Тюкавина, 2015).

От температуры дерева ( $t$ ) зависит растворимость минеральных солей и органических веществ, присутствующих в древесной воде, а также сезонная динамика водного режима дерева (Бенькова, 2005; Тихова и др., 2017; Тихонова и др., 2017; Тишин и др., 2014), интенсивность водного обмена и фотосинтез (Карасев и др., 2017, 2020). Совместные измерения  $t$  и влажности стволов деревьев позволяют оценить их санитарное состояние (Килюшева, Овсянникова, 2013; Левин и др., 2021; Овсянникова и др., 2013), осуществить экологический мониторинг лесных массивов (Камалова и др., 2015; Матвеев и др., 2017). Сезонная динамика  $t$  может быть использована для обнаружения дефектов внутреннего гниения живых деревьев (Yue et al., 2018). По измеренной  $t$  можно идентифицировать повреждённые ткани и отличать их от здоровых тканей (Vidal, Pitarma, 2019). От степени устойчивости к высоким температурам зависит восприимчивость деревьев к инфекционным болезням (Скуратов, Крюкова, 2015).

Помимо воздействия на физиологические характеристики дерева,  $t$  оказывает заметное влияние на сроки вылета и заселения деревьев стволовыми вредителями (Мешкова и др., 2015). У заражённых деревьев температура ствола значительно выше, чем у незаражённых (Majdak et al., 2021).

Мониторинг  $t$  стволов дерева важен для оценки устойчивости деревьев к засухе. В антропогенной среде (особенно вблизи городских свалок, на улицах с интенсивной транспортной нагрузкой) действие высоких  $t$  на древесные растения усиливается (Кузьмичёв, Овчаренко, 2012). Наряду с осадками и скоростью ветра  $t$  является базовым параметром для определения скорости высыхания горючих материалов и оценки вероятности возникновения пожаров (Евсикова и др., 2020; Матвеев и др., 2015). От  $t$  стволов и крон деревьев зависят яркостные характеристики леса в микроволновом (Калинкевич и др., 2011; Санников и др., 2017) и инфракрасном (ИК) (Бунина и др., 2020; Bian et al., 2018; Pitarma et al., 2019; Vidal, Pitarma, 2019; Webster et al., 2016) диапазонах. По данным регулярных спутниковых наблюдений в ИК-диапазоне за лесными пожарами, за последние 20 лет площади, пройденные лесными пожарами, достигали в 2003, 2012 и 2018 гг. 10 млн га (Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2019).

Из приведённых выше результатов фундаментальных и прикладных научных исследований следует вывод об актуальности и востребованности высокоточных измерений  $t$  в разных отраслях науки и техники. Вместе с тем во многих случаях  $t$  деревьев оценивается по  $t_0$ , измеренной на ближайшей к месту исследований метеорологической станции. При этом предполагается, что средняя  $t$  дерева равна средней  $t_0$  (Тарасов, 2010), а  $t$  структурных частей древесного растения, характерные размеры которых не превышают некоторого критического значения, равна мгновенной  $t_0$  (Тарасов, 2011).

## Методика исследований и использованная аппаратура

В настоящей работе приведены результаты измерений сезонных вариаций температуры снаружи и внутри ствола дерева в период с октября по апрель. В качестве объекта исследования было выбрано дерево породы сосна (*Pinus*), весьма распространённой на территории Северной Евразии и являющейся также основной породой деревьев в реликтовых сосновых борах Алтайского края. Высота исследуемого дерева — 19,2 м, диаметр ствола — 0,6 м (на высоте 1 м от поверхности земли), географические координаты: 53,2762° с. ш., 83,7482° в. д. Для измерения температуры в стволе дерева на высоте 1,5 м от поверхности земли буром просверливалось отверстие диаметром 0,6 см и глубиной 20 см. В это отверстие вставлялась непроводящая текстолитовая планка длиной 25 см и шириной 0,6 см, изготовленная по размеру сделанного отверстия. На планке укреплялись 5 температурных датчиков TMP1075, размещённых на расстоянии 5 см друг от друга (рис. 1, см. с. 144).

В стволе дерева датчики размещались таким образом, чтобы крайний датчик (S5 на рис. 1), предназначенный для измерения  $t_0$ , был вне ствола дерева. Снаружи отверстие с вставленными датчиками герметично заделывалось садовым варом для предотвращения влияния температуры окружающей среды на внутренние слои дерева. В среднем датчик температуры потребляет 2,7 мкА. Погрешность температурных датчиков в интервале от  $-40$  до  $+50$  °C не превышала  $\pm 0,5$  °C (<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp1075.pdf>).

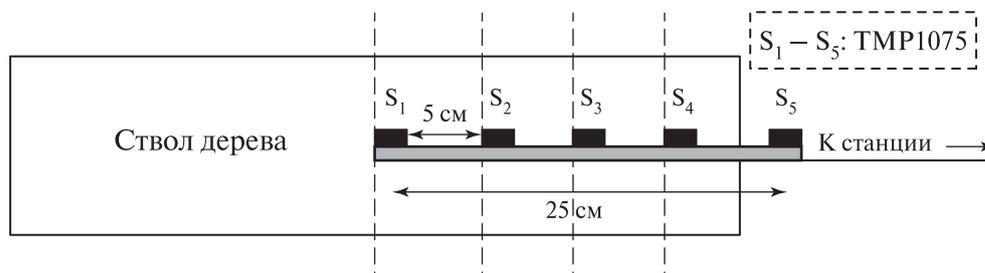


Рис. 1. Схема установки температурных датчиков для измерения температуры в стволе дерева

Сбор данных с температурных датчиков осуществлялся с помощью базовой станции, принципиальная схема которой представлена на рис. 2. Результаты измерений записывались на флэш-карту и через беспроводной приёмопередатчик SX1278, обеспечивающий сверхдальнюю связь с расширенным спектром и высокую устойчивость к помехам при минимальном потреблении тока. Используя запатентованную технику Semtech модуляции LoRa (англ. **Long Range**), данный приёмопередатчик может достичь чувствительности более  $-148$  дБм. Таким образом, LoRa-модуляция, использующая расширенный спектр линейной частотной модуляции (ЛЧМ) с данными, кодируемыми широкополосным ЛЧМ-сигналом, позволяла значительно улучшить чувствительность приёмника по сравнению с обычной частотной модуляцией (Прокоруев et al., 2021). Данные с температурных датчиков отправлялись на приёмную станцию с аналогичным приёмопередатчиком и доступом к глобальной сети. На приёмной стороне для дальнейшей обработки измеренных параметров температуры была организована база данных.

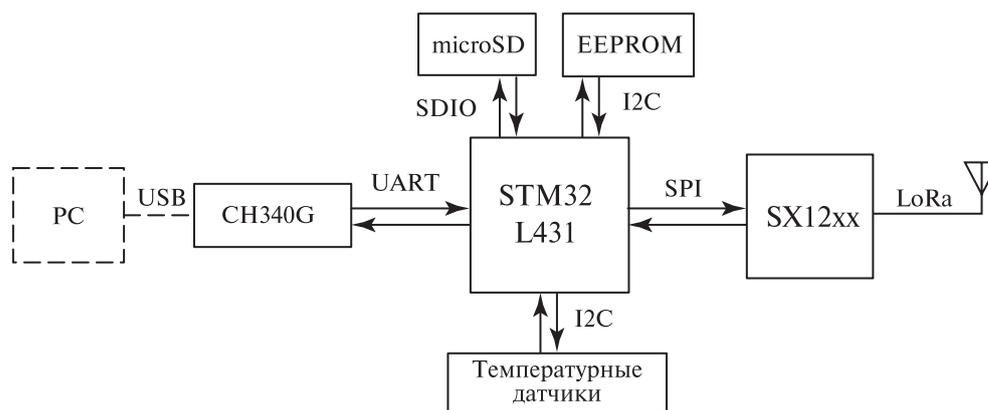


Рис. 2. Принципиальная схема базовой станции

Базовая станция работает под управлением микроконтроллера STM32L431 производства ST Microelectronics с высокопроизводительным ядром ARM Cortex-M4. Семейство STM32L4 было выбрано из-за комбинации высокой производительности и сверхмалого потребления. Также важным аспектом было наличие всех необходимых интерфейсов для работы периферии, в том числе I2C (англ. Inter-Integrated Circuit), SDIO (англ. Secure Digital Input Output), SPI (англ. Serial Peripheral Interface), UART (англ. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Другим ключевым требованием было наличие «батареяного» режима, когда микроконтроллер отключает всю периферию, кроме часов реального времени и 32 резервных регистров. В данном режиме микроконтроллер потребляет около 200 нА (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l431cb.pdf>). Часы реального времени выводят микроконтроллер из режима на короткий промежуток времени ( $\sim 1,5\text{--}2$  с) для опроса датчиков и отправки данных через радиоканал каждую минуту. Помимо этого, микроконтроллер имеет возможность коммутировать питание всех функциональных блоков с помощью  $p$ -канального MOSFET-транзистора (англ. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) с ультранизким током утечки  $\sim 10$  пА (<https://www.vishay.com/docs/66597/sip32431.pdf>), что даёт возможность сильно сократить энергопотребление в промежутках между измерениями.

В качестве радиопередатчика использовался чип SX1278 производства Semtech, потребляющий 0,2 мкА в режиме сна, 10,8 мА в режиме приёма и 120 мА в режиме передачи максимальной мощности (+20 дБм) ([https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rc1/QnUuV9TviODKUgt\\_rpBIPz.EZA\\_PNK7Rpi8HA5..Sbo](https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rc1/QnUuV9TviODKUgt_rpBIPz.EZA_PNK7Rpi8HA5..Sbo)).

Источником питания базовой станции выступал блок аккумуляторов Li-Ion (англ. lithium-ion — литий-ионный) форм-фактора 18650 и общей ёмкостью 10 200 мАч, что представляется достаточным для обеспечения 85 ч непрерывной отправки данных на максимальной мощности или же до пяти лет работы станции в режиме сбалансированного мониторинга (используя режим сна между измерениями).

Микросхема CH340G предназначена для преобразования UART-интерфейса в USB (англ. Universal Serial Bus — универсальная последовательная шина) для вывода отладочной информации на персональный компьютер и возможности обновления прошивки без программатора. В данной ревизии базовой станции микросхема CH340G запитывается от USB и не соединена с общей линией питания, следовательно, во время измерений данная микросхема не потребляет ток, что также увеличивает время автономной работы базовой станции.

Опционально имеется возможность обновления прошивки через радиоканал. Также была заложена возможность хранения конфигурации устройства во внешней EEPROM-памяти (англ. Electrically Erasable Programmable Eead-Only Memory), но в данной ревизии базовой станции было достаточно ресурсов микроконтроллера.

## Результаты исследований и обсуждение

Измерения радиальной температуры в стволе дерева велись с октября по апрель. На *рис. 3* (см. с. 146) приведена сезонная динамика изменений  $t_0$  (на поверхности дерева) и  $t_{20}$  (в стволе дерева на глубине  $r = 20$  см). Видно, что значения  $t_0$  и  $t_{20}$  в большинстве случаев различаются. Причём  $t_{20}$  может быть как меньше, так и больше  $t_0$ . Разница температур, зафиксированных за исследуемый интервал времени ( $\Delta t$ ), достигала 12 °С. Численные значения  $t$  на глубине 5, 10, 15 см находились в диапазоне между значениями  $t_0$  и  $t_{20}$ .

На *рис. 4* (см. с. 146) приведена динамика суточной температуры в стволе дерева в зимний (январь) (см. *рис. 4а*) и весенний (март) (см. *рис. 4б*) периоды на поверхности дерева (1) и на глубине 20 см (2). Видно, что суточные зависимости  $t_0$  и  $t_{20}$  имеют циклический характер, причём находятся в противофазе друг к другу, при этом максимальные (минимальные) значения  $t_0$  соответствуют минимальным (максимальным) значениям  $t$  внутри дерева. То есть возникает ситуация, когда повышение/понижение  $t_0$  соответствует понижению/повышению  $t$  внутри ствола дерева. Одной из причин подобного эффекта может быть запаздывание распространения тепловой волны в древесной массе от поверхности внутрь дерева, а также наложение встречных тепловых волн, идущих от поверхности внутрь дерева и изнутри дерева к поверхности (от нагретой области к более холодной).

При быстром изменении  $t_0$  температура внутри ствола изменяется с некоторой задержкой, зависящей как от физических характеристик древесины, так и от скорости изменения  $t_0$ . Из анализа экспериментальных данных следует, что суточные вариации  $t$  внутри ствола дерева довольно стабильны ( $\Delta t_{20} \approx 0\text{--}2$  °С) по сравнению с суточными вариациями  $t_0$  ( $\Delta t_0 \approx 3\text{--}7$  °С).

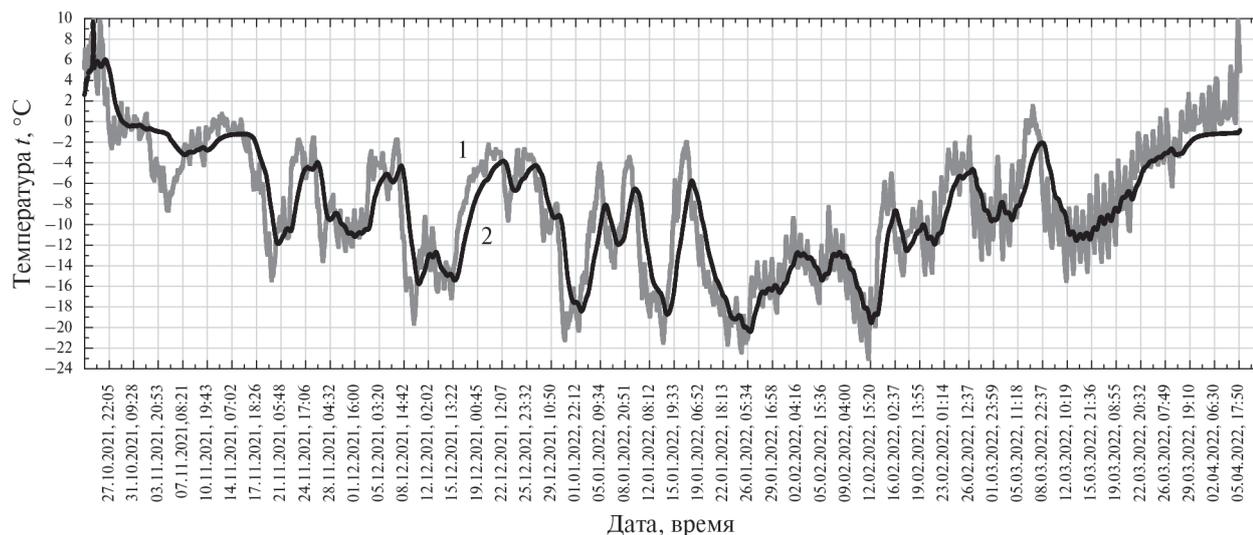
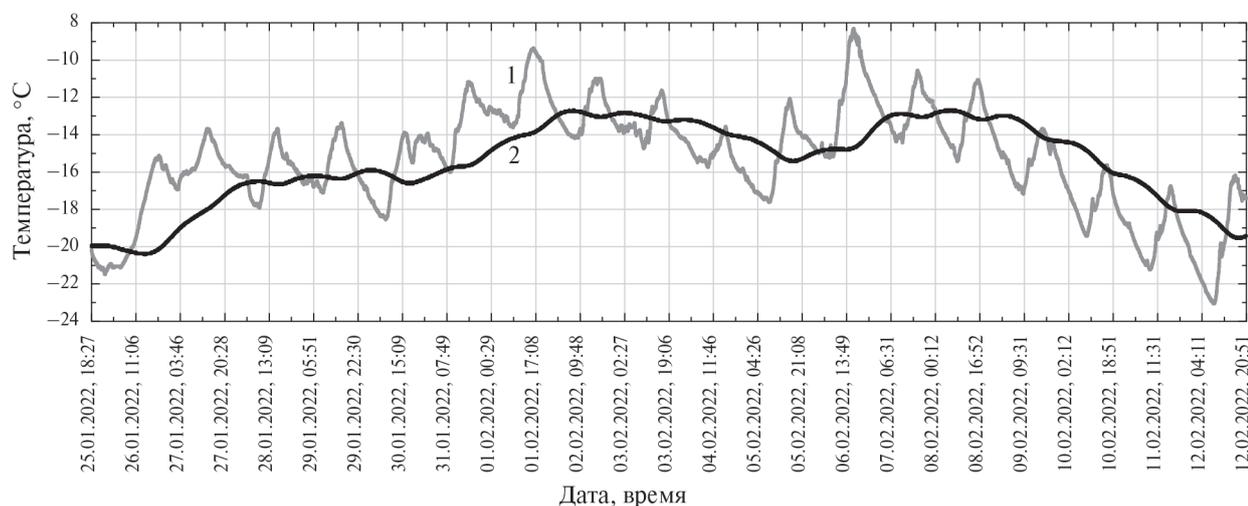
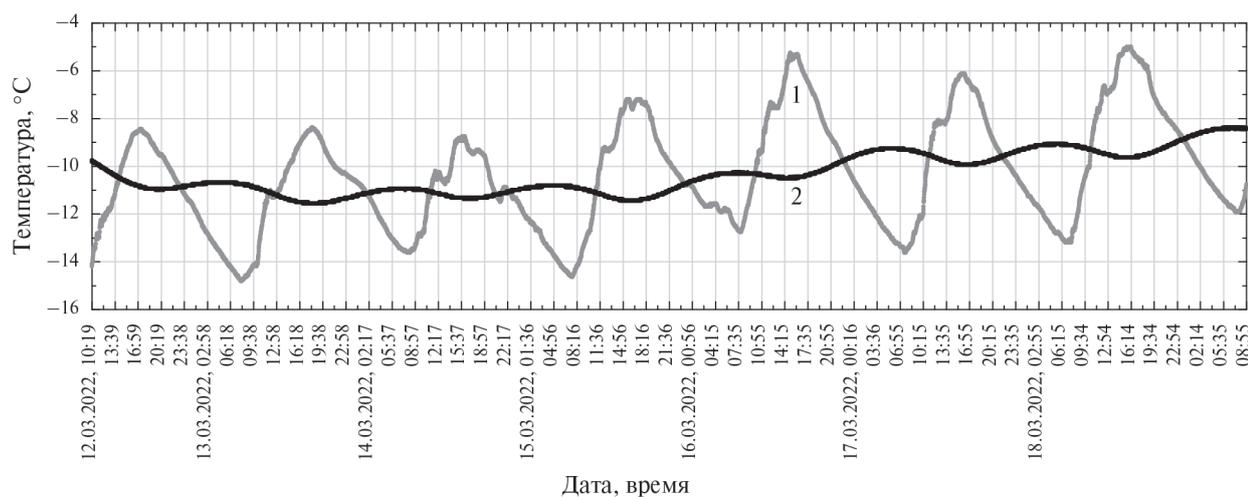


Рис. 3. Сезонные вариации  $t_0$  (1) и  $t_{20}$  (2)



a



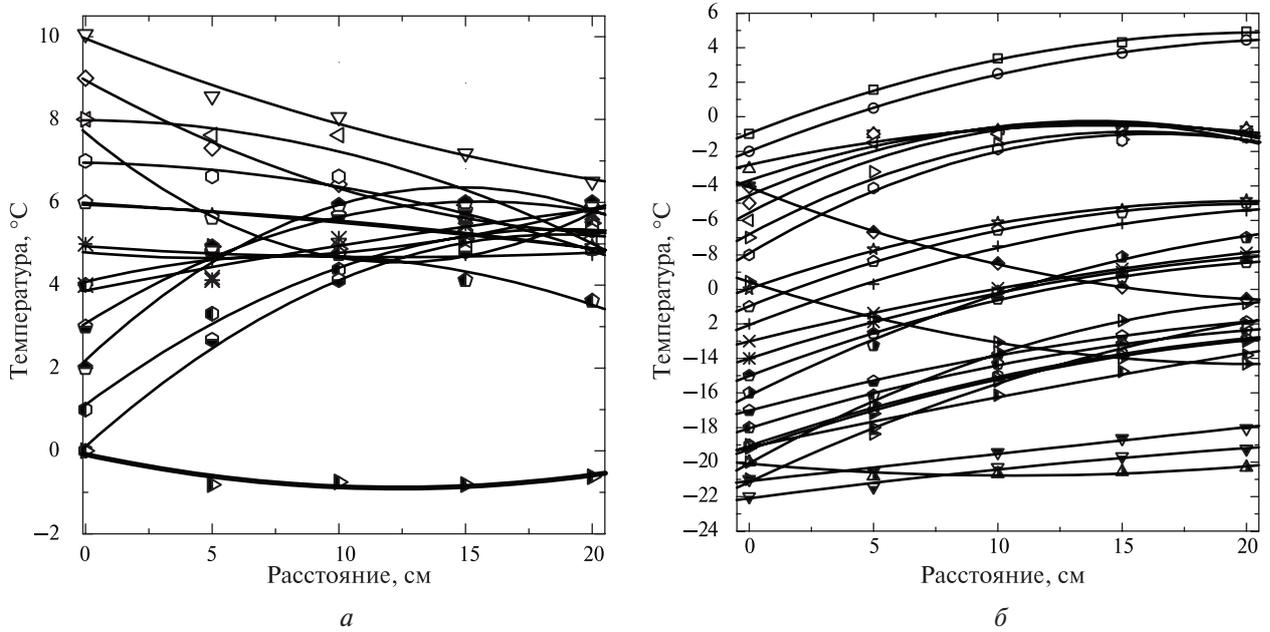
б

Рис. 4. Суточные вариации температуры в зимний (январь) (а) и весенний (март) (б) периоды на поверхности дерева (1) и на глубине 20 см (2)

Для примера на *рис. 5* приведены зависимости  $t(r)$  в стволе дерева от расстояния до поверхности, изменяющиеся нелинейным образом и аппроксимированные полиномом 2-й степени:

$$t = A + Br + Cr^2,$$

где  $A, B, C$  — эмпирические коэффициенты (*таблица*), рассчитанные с использованием пакета компьютерных программ Origin 6.1.



*Рис. 5.* Зависимости  $t(r)$  в стволе дерева от расстояния до поверхности:  $a - t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $b - t \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Эмпирические коэффициенты  $A, B, C$

$t_0$	$A$	$B$	$C$	$\sigma$	$R$
10	9,95357	-0,24143	0,00357	0,24	0,98
9	8,94643	-0,33732	0,00768	0,13	0,99
8	7,98393	-0,00232	0,00732	0,41	0,95
7	6,95893	0,00982	-0,00482	0,24	0,96
6	5,98929	-0,04071	0,0007	-0,18	0,92
5	4,93929	-0,04321	0,00179	0,13	0,56
5	4,79286	-0,05464	0,00536	0,43	0,71
4	3,87143	0,11893	-0,00107	0,28	0,93
3	3,08036	0,37786	-0,01214	0,2	0,986
2	2,18929	0,57054	-0,01946	0,42	0,97
1	1,11429	0,45054	-0,01196	0,24	0,99
0	0,10536	0,54786	-0,01464	0,24	0,99
-1	-0,96607	0,56393	-0,01357	0,11	0,99
-2	-2,00357	0,56768	-0,01232	0,06	0,999
-3	-2,7875	0,32125	-0,01125	0,44	0,90
-4	-3,67857	0,48018	-0,01732	0,67	0,89
-5	-4,5500	0,6225	-0,0225	0,94	0,87
-6	-5,54821	0,74804	-0,02696	0,95	0,91

$t_0$	$A$	$B$	$C$	$\sigma$	$R$
-7	-6,79464	0,76536	-0,02464	0,48	0,98
-8	-7,89107	0,84893	-0,02607	0,3	0,99
-9	-9,95357	0,50018	-0,01232	0,14	0,998
-10	-10,96786	0,57839	-0,01411	0,09	0,999
-12	-12,05893	0,56107	-0,01143	0,13	0,999
-13	-13,00357	0,35268	-0,00482	0,02	0,999
-14	-13,99107	0,46393	-0,00857	0,03	0,999
-15	-15,00357	0,54893	-0,01107	0,06	0,999
-16	-16,1500	0,7125	-0,0125	0,32	0,996
-17	-17,01607	0,37893	-0,00607	0,06	0,999
-18	-18,03929	0,44446	-0,00804	0,1	0,999
-19	-19,25893	0,49357	-0,00893	0,15	0,998
-20	-20,06071	0,80304	-0,01696	0,14	0,999
-21	-21,14821	0,67679	-0,01071	0,31	0,996
-21	-21,10893	0,15982	-0,00002	0,23	0,983
-22	-22,09464	0,18786	-0,00214	0,20	0,985

Примечание:  $\sigma$  — стандартное отклонение;  $R$  — коэффициент детерминации.

Из приведённых графиков и таблицы видно, что эти зависимости существенным образом различаются. Для примера на рис. 6 приведены зависимости  $t(r)$  с  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ . Видно, что при фиксированной  $t_0$  разброс  $t$  на глубине 20 см составляет  $14^\circ\text{C}$ . Причина таких значительных различий может быть связана с разной тепловой предысторией дерева, определяющей разную скорость проникновения тепловой волны внутрь ствола. При резких изменениях  $t_0$  внутренние слои ствола стабилизируют  $t$ , выступая в роли термостата.

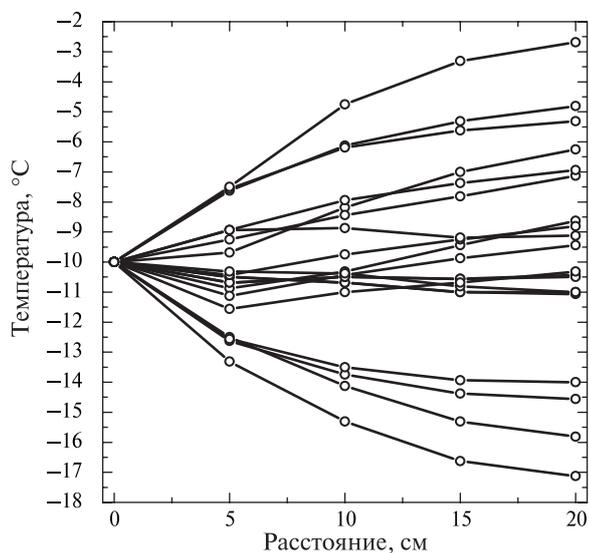


Рис. 6. Зависимость температуры в стволе дерева от расстояния до поверхности

Из анализа графиков следует вывод о неоднозначности определения  $t$  с помощью зависимостей  $t(r)$  с известной  $t_0$ . Выбор соответствующей зависимости  $t(r)$  может быть осуществлён с использованием не мгновенных зависимостей  $t(r)$ , а осреднённых за некоторый промежуток времени (от одного до нескольких часов), подбираемый экспериментально с учётом направленности изменений  $t_0$  (повышение/понижение) в зависимости от скоростей изменения  $t_0$  и  $t$ .

На рис. 7 (см. с. 149) приведена скорость ( $V$ ) изменения  $\Delta t$  в слоях дерева 0–5 и 15–20 см, определённая из соотношений  $V_{0-5} = (t_0 - t_5)/5$  и  $V_{15-20} = (t_{15} - t_{20})/5$ . Видно, что величина  $V_{0-5}$  изменяется в пределах  $2^\circ\text{C}$ , в то время как вариации  $V_{15-20}$  не превышают  $0,5^\circ\text{C}$ .

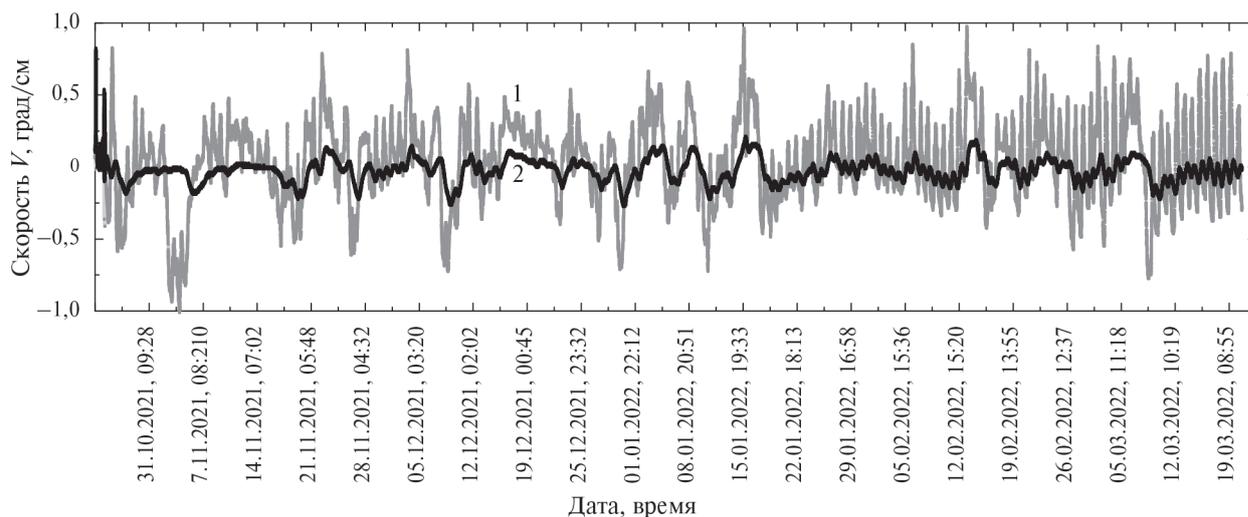


Рис. 7. Скорость изменения температуры в слоях дерева 0–5 см (1) и 15–20 см (2)

## Заключение

Приведённые результаты экспериментальных исследований сезонных и суточных вариаций температуры в стволе дерева не претендуют на полноту и всеобщность, так как относятся к измерениям на одном дереве (*Pinus*). В то же время полученные результаты указывают, что измеренные значения  $t_0$  позволяют рассчитать температуру в стволе дерева на разной глубине. Установленные эмпирические зависимости  $t(r)$  могут быть использованы для расчёта  $t$  в стволах деревьев. Выбор правильной зависимости основывается на изучении тепловой предыстории дерева. Для каждого значения  $t_0$  может существовать несколько зависимостей  $t(r)$ . За рамками исследований осталось изучение зависимостей  $t(r)$  для других пород деревьев, а также для больных и заражённых вредителями деревьев.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-20041 (<https://rscf.ru/project/22-17-20041/>).

## Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Луляя Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Бенькова А. В. Влияние погодных факторов на прирост доминирующих и супрессивных деревьев *Abies Sibirica* Ledeb и *Picea Obovata* Ledeb. в среднем течении р. Енисей // Сибирский эколог. журн. 2005. Т. 12. № 1. С. 45–49.
3. Берри Б. Л., Либерман А. А., Шиятов С. Г. Восстановление и прогноз температур северного полушария по колебаниям индексов прироста деревьев на полярной границе леса // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: «География». 1983. № 4. С. 41–47.
4. Бунина Ю. Е., Пономарёв С. А., Чапурский Л. И. Эмпирическая модель суточного хода радиационных температур растительных покровов в летний период // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: материалы 6-й Всероссийской науч. конф. Санкт-Петербург, 16–18 сент. 2020. СПб., 2020. С. 175–179.
5. Данчева А. В., Залесов С. В., Муканов Б. М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в сосняках Казахского Мелкосопочника // Международ. научно-исслед. журн. 2020. № 3–1(93). С. 68–76.
6. Долгова Е. А., Соломина О. Н., Мацковский В. В., Добрянский А. С., Семеняк Н. А., Шпунт С. С. Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Изв. Российской акад. наук. Серия геогр. 2019. № 2. С. 41–50.
7. Евсикова Н. Ю., Лисицын В. И., Терехина И. В. Стохастический анализ флуктуаций температуры в лесах // Актуальные направления науч. исслед. XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8. № 1(48). С. 48–52. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-48-52.

8. Журавлева И. В., Тишин Д. В., Чижикова Н. А., Искандиров П. Ю. Ксилогенез сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) в условиях среднего Поволжья // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. 38. № 1–2. С. 28–33.
9. Иванов В. П., Марченко С. И., Нартов Д. И., Балухта Л. П. Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) при ингибировании // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2021. № 1(379). С. 69–81. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81.
10. Калинин А. А., Крылова М. С., Каковкина А. Ю., Слюсарев В. И. Исследование сезонной динамики водного режима сосновых деревьев для интерпретации результатов радиолокационных аэросъемок // Лесоведение. 2011. № 4. С. 39–47.
11. Камалова Н. С., Лисицын В. И., Евсикова Н. Ю., Лемешко А. Ю., Кузнецов А. В. Оценка экологической безопасности лесных массивов с помощью цифровых технологий // Актуальные направления науч. исслед. XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-2 (13-2). С. 132–136.
12. Камалова Н. С., Евсикова Н. Ю., Камалов Н. Р. Исследование изменений среднесуточной температуры в течение года и их влияния на физико-химические процессы в стволах деревьев // Актуальные направления науч. исслед. XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 3(39). С. 92–96.
13. Карасев В. Н., Карасева М. А., Романов Е. М., Мухортов Д. И. Термоэкспресс-метод ранней диагностики физиологического состояния сосны обыкновенной // Экология. 2017. № 2. С. 92–99.
14. Карасев В. Н., Карасева М. А., Мухортов Д. И. Диагностика физиологического состояния хвойных деревьев по биоэлектрическим и температурным показателям // Лесоведение. 2020. № 2. С. 162–174.
15. Килушева Н. В., Овсянникова Н. В. Температура стволов сосны обыкновенной // Науч. итоги года: достижения, проекты, гипотезы. 2013. № 3. С. 101–104.
16. Кищенко И. Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Карелия) // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2020. № 3(375). С. 72–82.
17. Кузьмичёв А. М., Овчаренко А. А. Оценка засухоустойчивости древесных насаждений в среднем Прихоперье // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2012. Т. 14. № 1–8. С. 1971–1974.
18. Кухта А. Е., Румянцев Д. Е., Пучинская Д. В. Влияние климатических факторов на радиальный и линейный прирост сосны обыкновенной в условиях заповедника «Кивач» // Вестн. Московского гос. ун-та леса — Лесной вестн. 2014. Т. 18. № 5. С. 88–91.
19. Левин С. В. Исследования особенностей формирования температуры и влажности стволов деревьев сосны обыкновенной при контактном способе изучения // Тр. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2021. № 91. С. 187–192.
20. Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Бурицев М. А., Дмитриев В. В., Сенько К. С., Крашенинникова Ю. С. Лесные пожары на территории России: особенности пожароопасного сезона 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 356–363. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-356-363.
21. Магда В. Н., Ваганов Е. А. Климатический отклик прироста деревьев в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2006. № 5. С. 92–100.
22. Марченко А. А., Иванов А. В. Влияние изменения климата на фенологическое развитие древесных растений в г. Уссурийске // Проблемы региональной экологии. 2021. № 2. С. 5–9. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-2-5-9.
23. Матвеев Н. Н., Камалова Н. С., Евсикова Н. Ю., Лисицын В. И. Мониторинг распределения температуры при прогнозировании лесных пожаров // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5. № 4(20). С. 16–25. DOI: 10.12737/17398.
24. Матвеев Н. Н., Евсикова Н. Ю., Камалов Н. Р. Контроль пожаробезопасности лесных массивов с помощью цифровых технологий // Актуальные направления науч. исслед. XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 1(27). С. 226–229.
25. Мешкова В. Л., Зинченко О. В., Скрыльник Ю. Е., Аристова А. И. Сроки развития стволовых вредителей сосны в левобережной Украине // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад. 2015. № 211. С. 59–75.
26. Николаева С. А., Савчук Д. А. Климатогенная реакция деревьев сосны на юге Томской области // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер.: Биология. 2008. Т. 1. № 4. С. 400–413.
27. Овсянникова Н. В., Феклистов П. А., Волкова Н. В., Мелехов В. И., Тараканов А. М., Мерзленко М. Д. Температура древесины ели обыкновенной // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2013. № 1(331). С. 38–42.
28. Ойдуна О. Ч., Ваганов Е. А., Наурызбаев М. М. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // Лесоведение. 2004. № 6. С. 14–24.
29. Пинаевская Е. А. Влияние климатических параметров на формирование радиального прироста сосны на северной границе ареала европейского севера России // Вестн. Красноярского гос. аграр. ун-та. 2018. № 2(137). С. 208–214.

30. Пинаевская Е. А., Пахов А. С., Гусева А. С., Ганич Е. С. Изменчивость роста и «климат-реакции» сосны обыкновенной на приарктической территории // Арктич. исслед.: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: материалы 2-й междунар. научно-практич. конф. Архангельск, 11–14 нояб. 2020. Архангельск: Изд. центр АЗ+, 2020. С. 403–407.
31. Санников С. П., Побединский В. В., Бородулин И. В., Побединский А. А. Метод радиочастотного мониторинга лесного фонда // Лесной вестн. 2017. Т. 21. № 2. С. 45–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-45-54.
32. Скуратов И. В., Крюкова Е. А. Влияние высоких температур на состояние древесных растений и их патогенов в защитных насаждениях Нижнего Поволжья // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2(26). С. 37–43.
33. Тарасов С. И. Моделирование теплового обмена древесных растений: начальные и граничные условия, ксилемный транспорт // Успехи соврем. биологии. 2010. Т. 130. № 1. С. 38–49.
34. Тарасов С. И. Моделирование теплового обмена древесных растений: геометрия и внутренние источники тепла // Вестн. ин-та биологии Коми науч. центра Уральского отделения РАН. 2011. № 9. С. 24–28.
35. Тихова Г. П., Придача В. Б., Сазонова Т. А. Влияние температуры и относительной влажности воздуха на динамику водного потенциала деревьев *Betula pendula* (betulaceae) // Сибирский лесной журн. 2017. № 1. С. 56–64. DOI: 10.15372/SJFS20170106.
36. Тихонова Н. А., Тихонова И. В., Анискина А. А., Лоскутов С. Р., Семякин Д. А. Результаты сравнения низкотемпературных экзо- и эндотерм при замерзании воды и плавлении льда в тканях 2-летней хвои у некоторых видов хвойных деревьев // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35. № 3–4. С. 53–60.
37. Тишин Д. В., Чижикова Н. А., Чугунов Р. Г. Радиальный прирост сосны (*Pinus sylvestris* L.) верховых болот как индикатор локальных изменений климата // Вестн. Московского гос. ун-та леса — Лесной вестн. 2014. Т. 18. № 5. С. 177–182.
38. Тюкавина О. Н. Температурный режим сосны обыкновенной в условиях г. Архангельска // Вестн. Северного (Арктического) федерального ун-та. Сер.: Естественные науки. 2015. № 2. С. 73–79.
39. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Прогнозирование биомассы стволов сосновых деревьев естественных древостоев и лесных культур в связи с изменением климата // Сибирский лесной журн. 2021. № 2. С. 72–81. DOI: 10.15372/SJFS20210207.
40. Цельникер Ю. Л. Влияние температуры на сроки распускания и скорость роста листа у лиственных деревьев // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1996. Т. 16. С. 164–176.
41. Bian Z., Cao B., Li H., Du Y., Xiao Q., Liu Q. The effect of trunks on directional brightness temperatures of a leafless forest using a geometrical optical model // Proc. IGARSS'2018. 2018. P. 3947–3950. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517583.
42. Majdák A., Jakuš R., Blaženec M. Determination of differences in temperature regimes on healthy and bark-beetle colonised spruce trees using a handheld thermal camera // iForest — Biogeosciences and Forestry. 2021. V. 14. No. 3. P. 203–211. <https://doi.org/10.3832/ifer3531-014>.
43. Pitarma R., Crisostomo J., Ferreira M. E. Contribution to Trees Health Assessment Using Infrared Thermography // Agriculture. 2019. V. 9(8). Art. No. 171. 14 p. <https://doi.org/10.3390/agriculture9080171>.
44. Prokopyev V. Yu., Bakanov S. S., Bodrov V. K., Chernodarov E. N., Doroshkin A. A., Gorev V. N., Kolesnikova A. Yu., Kozlov A. S., Kus O. N., Melkov A. V., Mitrokhin A. A., Morsin A. A., Nazarenko A. E., Neskoro-dev I. V., Pelemeshko A. V., Prokopyev Yu. M., Romanov D. A., Shilov A. M., Shirokih M. V., Sidorchuk A. A., Styuf A. S., Zadorozhny A. M. NORBY CubeSat nanosatellite: design challenges and the first flight data // J. Physics: Conf. Ser. 2021. V. 1867. Art. No. 012038. 11 p. <http://doi:10.1088/1742-6596/1867/1/012038>.
45. Tuominen J., Lipping T., Kuosmanen V., Haapanen R. Remote Sensing of Forest Health // Geoscience and Remote Sensing / ed. Pei-Gee P. H. 2009. 25 p. DOI: 10.5772/8283.
46. Vidal D., Pitarma R. Infrared thermography applied to tree health assessment: A review // Agriculture. 2019. V. 9(7). Art. No. 156. 15 p. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070156>.
47. Webster C., Rutter N., Zahner F., Jonas T. Modeling subcanopy incoming longwave radiation to seasonal snow using air and tree trunk temperatures // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. No. 3. P. 1220–1235. <http://doi.org/10.1002/2015JD024099>.
48. Yue X., Wang L., Shi X., Xu M., Zhu Z. Investigations on the Effects of Seasonal Temperature Changes on the Electrical Resistance of Living Trees // Forests. 2018. V. 9(9). Art. No. 550. 15 p. <https://doi.org/10.3390/f9090550>.

## Seasonal changes in temperature in the trunks of a living tree (by the example of pine)

D. A. Romanov<sup>1</sup>, I. V. Ryabinin<sup>2</sup>, A. N. Romanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia  
E-mail: zzzromanovzzz@mail.ru

<sup>2</sup> Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia  
E-mails: cgsiena@gmail.com, romanov\_alt@mail.ru

Trees are persistently exposed to various natural effects. Physiological characteristics of a tree significantly depend on its temperature. In different branches of science and technology, measuring the tree temperature is relevant and in demand. This paper presents the results of seasonal and daily temperature changes (October–April) in a trunk of a pine (*Pinus*) tree. To measure the temperature, TMP1075 sensors were used. Data collection from temperature sensors was carried out by means of a base station controlled by the STM32L431 microcontroller. The measurement results were recorded on a flash card and sent via an SX1278 transceiver to a receiving station with a similar unit and access to the global network. The database was organized on the receiving side. Sampling of temperature sensors was performed at one-minute intervals. We studied diurnal temperature variations on the tree surface and in its trunk in winter and spring. Radial temperature dependences in the tree trunk were approximated by a quadric polynomial. They depended on the ambient temperature and differed significantly. The temperature difference between the surface and deep layers of the tree trunk reached 12 °C. The obtained results indicate that the measured ambient temperatures can be used in calculations of temperatures in a tree trunk at different depths.

**Keywords:** tree, trunk, temperature, seasonal dynamics, daily dynamics

Accepted: 22.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-142-154

### References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
2. Benkova A. V., Influence of Weather Factors on the Increment of Dominant and Suppressive Trees of *Abies sibirica* Ledeb. and *Picea obovata* Ledeb. in the Middle Reaches of the Yenisei River, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 1, pp. 45–49 (in Russian).
3. Berri B. L., Liberman A. A., Shiyatov S. G., The reconstruction and forecast of temperatures in the northern hemisphere according to fluctuations in the growth indices of trees on the polar tree limit, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. 5: Geografiya*, 1983, No. 4, pp. 41–47 (in Russian).
4. Bunina Yu. E., Ponomarev S. A., Chapurskii L. I., Empirical model of the daily change of radiation temperatures of vegetation cover during the summer period, *Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoynaniya prirodnoi sredy: materialy VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* (Problems of military-applied geophysics and control of the state of the natural environment, Proc. 6<sup>th</sup> All-Russia Scientific Conf.), Saint Petersburg, 16–18 Sept. 2020, Saint Petersburg, 2020, pp. 175–179 (in Russian).
5. Dancheva A. V., Zalesov S. V., Mukanov B. M., Influence of climatic factors on radial growth of trees in pine forests of Kazakh upland, *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2020, No. 3-1(93), pp. 68–76 (in Russian), DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.93.3.010>.
6. Dolgova E. A., Solomina O. N., Matskovsky V. V., Dobryansky A. S., Semenyak N. A., Shpunt S. S., Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser. geograficheskaya*, 2019, No. 2, pp. 41–50 (In Russian), <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>.
7. Evsikova N. Yu., Lisitsyn V. I., Terekhina I. V., Stochastic analysis of temperature fluctuations in forests, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2020, Vol. 8, No. 1(48), pp. 48–52 (in Russian), DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-48-52. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-48-52.
8. Zhuravleva I. V., Tishin D. V., Chizhikova N. A., Iskandirov P. Yu., Xylogenesis of scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in the conditions of the middle Volga region, *Khvoynye boreal'noi zony*, 2020, Vol. 38, No. 1-2, pp. 28–33 (in Russian).

9. Ivanov V. P., Marchenko S. I., Nartov D. I., Balukhta L. P., Radial Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Inhibition, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2021, No. 1(379), pp. 69–81 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81.
10. Kalinkevich A. A., Krylova M. S., Kakovkina A. Yu., Slyusarev V. I., Investigation of seasonal dynamics of water regime of pine trees for interpretation of radar survey results, *Lesovedenie*, 2011, No. 4, pp. 39–47 (in Russian).
11. Kamalova N. S., Lisitsyn V. I., Evsikova N. Yu., Lemeshko A. Yu., Kuznetsov A. V., Assessment of ecological safety of forest areas using digital technologies, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, Vol. 3, No. 2-2(13-2), pp. 132–136 (in Russian), DOI: 10.12737/4340.
12. Kamalova N. S., Evsikova N. Yu., Kamalov N. R., Investigation of changes of average daily temperature during a year and their impact on physico-chemical processes in tree trunks, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2018, Vol. 6, No. 3(39), pp. 92–96 (in Russian).
13. Karasev V. N., Karaseva M. A., Romanov E. M., Mukhortov D. I., Rapid thermal method for early diagnosis of the physiological state of scots pine trees, *Russian J. Ecology*, 2017, Vol. 48, No. 2, pp. 109–115, DOI: 10.7868/S036705971702007X.
14. Karasev V. N., Karaseva M. A., Mukhortov D. I., Coniferous trees bioelectric and temperature diagnostics, *Lesovedenie*, 2020, No. 2, pp. 162–174 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114820010088.
15. Kilyusheva N. V., Ovsyannikova N. V., Temperature of Scots pine trunks, *Nauchnye itogi goda: dostizheniya, proekty, gipotezy*, 2013, No. 3, pp. 101–104 (in Russian).
16. Kishchenko I. T., The effect of climatic factors on the seasonal development of coniferous forest-forming species in the taiga zone (Karelia), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 3(375), pp. 72–82 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82.
17. Kuzmichev A. M., Ovcharenko A. A., Assessment of woody plantings drought resistance at middle Prikhoperye, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, Vol. 14, No. 1–8, pp. 1971–1974 (in Russian).
18. Kukhta A. E., Rumyantsev D. E., Puchinskaya D. V., Influence of Climatic Factors on the Radial and Linear Growth of Scotch Pine in the Conditions of the Kivach Nature Reserve, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik*, 2014, Vol. 18, No. 5, pp. 88–91 (in Russian).
19. Levin S. V., Studies of the peculiarities of the formation of temperature and humidity of tree trunks of scots pine in the contact method of study, *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, No. 91, pp. 187–192 (in Russian), DOI: 10.21515/1999-1703-91-187-192.
20. Loupian E. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Burtsev M. A., Dmitriev V. V., Senko K. S., Krashennnikova Yu. S., Forest fires in Russia: specifics of the 2019 fire season, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 356–363 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-356-363.
21. Magda B. N., Vaganov E. A., Climate response on the mountain forest-steppe in Altay-Sayany region, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2006, No. 5, pp. 92–100 (in Russian).
22. Marchenko A. A., Ivanov A. V., Impact of weather variation on phenological development of woody plants in Ussuriysk, *Problemy regional'noi ekologii*, 2021, No. 2, pp. 5–9 (in Russian), DOI: 10.24412/1728-323X-2021-2-5-9.
23. Matveev N. N., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu., Lisitsyn V. I., Monitoring of the temperature distribution in prediction of forest fires, *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2015, Vol. 5, No. 4(20), pp. 16–25 (in Russian), DOI: 10.12737/17398.
24. Matveev N. N., Evsikova N. Yu., Kamalov N. R., Fire safety control by forest massive diagnosis with digital technology, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2017, Vol. 5, No. 1(27), pp. 226–229 (in Russian).
25. Meshkova V. L., Zinchenko O. V., Skrylnik Yu. E., Aristova A. I., Timeline (or timeframe) of development of pine stem pests in the left-bank Ukraine, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2015, No. 211, pp. 59–75 (in Russian).
26. Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Climatogenetic response of pine trees in southern Tomsk oblast, *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Biologiya*, 2008, Vol. 1, No. 4, pp. 400–413 (in Russian).
27. Ovsyannikova N. V., Feklistov P. A., Volkova N. V., Melekhov V. I., Tarakanov A. M., Merzlenko M. D., The temperature of spruce trunks, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2013, No. 1(331), pp. 38–42 (in Russian).
28. Oidupaa O. Ch., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Prolonged changes in summer temperature and radial increment of larch trees at the upper timberline in the Altai-Sayan mountains, *Lesovedenie*, 2004, No. 6, pp. 14–24 (in Russian).
29. Pinaevskaya E. A., The influence of climatic parameters on the formation of radial growth of the pine on the north border of the area of European north of Russia, *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, No. 2(137), pp. 208–214 (in Russian).

30. Pinaevskaya E. A., Pakhov A. S., Guseva A. S., Gapich E. S., Variability of growth and “climate-reaction” of scots pine in the subarctic territory, *Arkticheskie issledovaniya: ot ekstensivnogo osvoeniya k kompleksnomu razvitiyu: Materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Arctic research: from extensive development to integrated development, Proc. II Intern. Scientific and Practical Conf.), Arkhangelsk, 11–14 Nov., 2020, Arkhangelsk, 2020, pp. 403–407 (in Russian).
31. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Borodulin I. V., Pobedinsky A. A., The method of the timber stock radio-frequency monitoring, *Lesnoi vestnik. Forestry Bull.*, 2017, Vol. 21, No. 2, pp. 45–54 (in Russian), DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-45-54.
32. Skuratov I. V., Kryukova E. A., High temperatures influence on woody plants condition and their pathogens in protective stands of lower Volga region, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2015, No. 2(26), pp. 37–43 (in Russian).
33. Tarasov S. I., Modeling of thermal exchange in wood plants: initial and boundary conditions, xylem transport, *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2010, Vol. 130, No. 1, pp. 38–49 (in Russian).
34. Tarasov S. I., Modelling of a heat exchange of wood plants: geometry and internal sources of heat, *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN*, 2011, No. 9, pp. 24–28 (in Russian).
35. Tikhova G. P., Pridacha V. B., Sazonova T. A., The influence of air temperature and relative humidity on dynamics of water potential in *Betula pendula* (betulaceae) trees, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 1, pp. 56–64 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170106.
36. Tikhonova N. A., Tikhonova I. V., Aniskina A. A., Loskutov S. R., Semenyakin D. A., The results of comparison of low-temperature exotherms and endotherm during freezing and melting water in the tissues of 2-year-old needles in some species of coniferous trees, *Khvoynye boreal'noi zony*, 2017, Vol. 35, No. 3–4, pp. 53–60 (in Russian).
37. Tishin D. V., Chizhikova N. A., Chugunov R. G., High-moor bog pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth as an indicator of local climate changes, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik*, 2014, Vol. 18, No. 5, pp. 177–182 (in Russian).
38. Tyukavina O. N., Temperature regime of a scots pine in a climate of Arkhangelsk, *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2015, No. 2, pp. 73–79 (in Russian).
39. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Predicting stem biomass of pine trees in natural and planted forests due to climate change, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2021, No. 2, pp. 72–81 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20210207.
40. Tselniker Yu. L., An influence of temperature on the frondescence data and leaf growth rate of deciduous trees, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 1996, Vol. 16, pp. 164–176 (in Russian).
41. Bian Z., Cao B., Li H., Du Y., Xiao Q., Liu Q., The effect of trunks on directional brightness temperatures of a leafless forest using a geometrical optical model, *Proc. IGARSS'2018*, 2018, pp. 3947–3950, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517583.
42. Majdák A., Jakuš R., Blaženec M., Determination of differences in temperature regimes on healthy and bark-beetle colonized spruce trees using a handheld thermal camera, *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 2021, Vol. 14, No. 3, pp. 203–211, <https://doi.org/10.3832/ifer3531-014>.
43. Pitarma R., Crisostomo J., Ferreira M. E., Contribution to Trees Health Assessment Using Infrared Thermography, *Agriculture*, 2019, Vol. 9(8), Art. No. 171, 14 p., <https://doi.org/10.3390/agriculture9080171>.
44. Prokopyev V. Yu., Bakanov S. S., Bodrov V. K., Chernodarov E. N., Doroshkin A. A., Gorev V. N., Kolesnikova A. Yu., Kozlov A. S., Kus O. N., Melkov A. V., Mitrokhin A. A., Morsin A. A., Nazarenko A. E., Neskorohev I. V., Pelemeshko A. V., Prokopyev Yu. M., Romanov D. A., Shilov A. M., Shirokih M. V., Sidorchuk A. A., Styuf A. S., Zadorozhny A. M., NORBY CubeSat nanosatellite: design challenges and the first flight data, *J. Physics: Conf. Ser.*, 2021, Vol. 1867, Art. No. 012038, 11 p., <http://doi:10.1088/1742-6596/1867/1/012038>.
45. Tuominen J., Lipping T., Kuosmanen V., Haapanen R., Remote Sensing of Forest Health, *Geoscience and Remote Sensing*, Pei-Gee P. H. (ed.), 2009, 25 p., DOI: 10.5772/8283.
46. Vidal D., Pitarma R., Infrared thermography applied to tree health assessment: A review, *Agriculture*, 2019, Vol. 9, Art. No. 156, 15 p., <https://doi.org/10.3390/agriculture9070156>.
47. Webster C., Rutter N., Zahner F., Jonas T., Modeling subcanopy incoming longwave radiation to seasonal snow using air and tree trunk temperatures, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, Vol. 121, No. 3, pp. 1220–1235, <https://doi.org/10.1002/2015JD024099>.
48. Yue X., Wang L., Shi X., Xu M., Zhu Z., Investigations on the Effects of Seasonal Temperature Changes on the Electrical Resistance of Living Trees, *Forests*, 2018, Vol. 9(9), Art. No. 550, 15 p., <https://doi.org/10.3390/f9090550>.