

УДК 630*812.14+630*161.4

ТЮКАВИНА Ольга Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ботаники, общей экологии и природопользования института естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Автор 45 научных публикаций

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ г. АРХАНГЕЛЬСКА

Все живые организмы находятся в состоянии непрерывного теплообмена с окружающей средой. Инфракрасное излучение от них несет огромное количество информации, не доступной для большинства живых организмов. Поэтому инфракрасные методы широко применяются для оценки состояния живого организма.

Для измерения инфракрасного излучения сосны использовали тепловизер. Исследования проводили в городских посадках сосны обыкновенной.

Температура стволов деревьев изменяется синхронно с температурой окружающего воздуха, но не совпадает с ней. Пониженная температура стволов по сравнению с температурой окружающего воздуха в подготовительный к вегетации период является защитным механизмом от преждевременной физиологической активности. Когда же происходит биохимическая перестройка, подготовка к видимому росту, дерево защищается от возможных кратковременных отрицательных температур повышением температуры ствола.

Температура ветвей ниже температуры ствола дерева. Аккумуляция тепла в ветвях сосны запаздывает по сравнению со стволом.

Температура хвои в апреле, мае, июне ниже температуры ствола дерева. В июле и октябре температуры хвои и ствола выравниваются. Отклонение температуры хвои от температуры ствола сосны зависит от освещенности и влажности воздуха, что указывает на влияние интенсивности транспирации. Учитывая, что динамика изменения температур хвои согласуется с сезонным ходом транспирации сосны, разницы температур хвои и ствола являются индикатором физиологической активности дерева. Выравнивание температур хвои и ствола указывает на завершение интенсивных ростовых процессов в вегетационный период.

Таким образом, тепловидение позволяет установить физиологическую активность дерева.

Ключевые слова: температура ствола, температура хвои, температура ветвей, тепловизер, сосна обыкновенная.

Существование организма в биосфере планеты протекает в непрерывном контакте с окружающей средой. Можно выделить два фактора, связанных с существованием живого организ-

ма в среде: тепловой (энергетический) обмен и обмен информацией [1]. Тепловой обмен складывается из конвекции, теплопроводности и, в основном, из теплопередачи с помощью

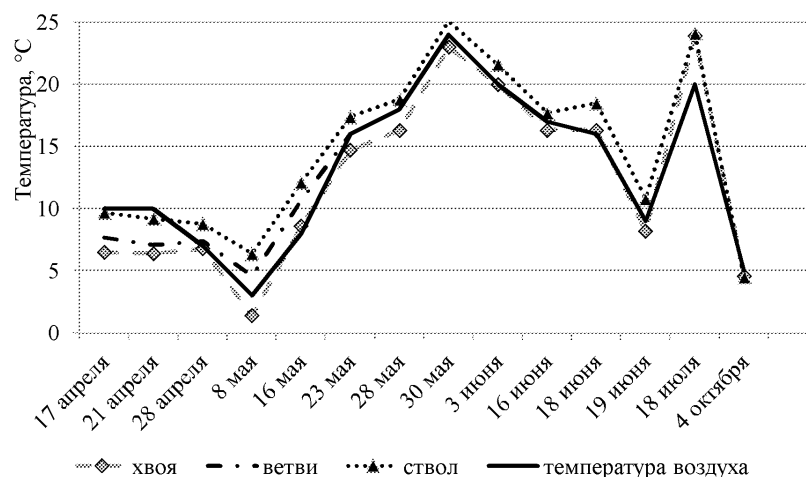
излучения. Инфракрасный диапазон электромагнитных волн расположен между видимым и радиодиапазоном и занимает область от 0,75 до 750 мкм [2]. Инфракрасное излучение с длиной волн 0,75–1,5 мкм (ближнее) формируется источниками, генерирующими тепло [3]. Дальнее инфракрасное излучение (10–1000 мкм) излучается всеми естественными телами с интенсивностью, зависящей от температуры, состояния поверхности [4]. Все тела обладают инфракрасным излучением, которое несет огромное количество информации, не доступной для большинства живых организмов. Для его измерения используют тепловизеры. Инфракрасные методы находят применение в изучении роста и оценки состояния растения [2, 5, 6, 7–14]. В основном они связаны с выявлением гнили, внутренних полостей в стволах деревьев [7–11, 13, 14]. Недостаточно исследована связь изменений инфракрасного излучения ассимиляционного аппарата и физиологического состояния растения. От изменения поглощения и отражения инфракрасных лучей в ассимиляционном аппарате зависит адаптация растения в целом к изменяющимся условиям среды.

Цель исследований – проанализировать температурный режим сосны обыкновенной в условиях г. Архангельска.

Материалы и методы. Температуру поверхности стволов деревьев измеряли тепловизером в 5-кратной повторности при удалении от дерева на каждый метр. Замеры производили с северной стороны, на высоте 1,3 м, в послеполуденные часы согласно методике В.Н. Карасёва и М.А. Карасёвой [15]. Исследования проводились при влажности воздуха не более 80 % и освещенности не более $45 \cdot 10^3$ Лкс. В большинстве случаев освещенность составляла от $10 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$ Лкс. Температуру воздуха измеряли термометром. Влажность воздуха измеряли психрометром Ассмана, скорость ветра определяли анемометром У-5, освещенность – люксметром Ю116.

Исследования проводились в городских посадках сосны – в сквере Северного (Арктического) федерального университета, на набережной Северной Двины. Измерения температуры выполнены на 11 деревьях сосны обыкновенной. Деревья средневозрастные, средняя высота – 16 м, средний диаметр – 14 см. Всего проведено 1870 замеров температуры за 14 дней в течение вегетационного периода.

Результаты и обсуждение. Динамика температур стволов деревьев синхронно повторяет изменение температур воздуха (см. рисунок). Связь между данными показателями очень высокая,



Динамика температуры воздуха, стволов, ветвей и хвои сосны обыкновенной

достоверная ($r = 0,97$, $t = 92$) (табл. 1). Деревья – пойкилотермные организмы, поэтому температура окружающего воздуха играет особенно важную роль. Если она превышает температуру деревьев, то к нагреванию излучением добавляется нагревание путем конвекции. В противном случае будут иметь место потери тепла [5]. Температура деревьев не совпадает полностью с температурой воздуха. До 28 апреля температура стволов была ниже температуры воздуха на 0,3–1 °С, после 28 апреля стабильно превышала температуру окружающего воздуха в среднем на 2,5 °С. В конце вегетационного периода (октябрь) температура стволов сосны также была ниже температуры воздуха на 0,3–1,0 °С. До 21 апреля ростовые процессы еще не начались, а 4 октября еще не начался интенсивный листопад у лиственных пород, т. е. в первом случае отмечается окончание вынужденного покоя, а во втором – начало глубокого покоя.

Следовательно, переходные периоды между состоянием покоя и вегетации характеризуются понижением температуры стволов деревьев по сравнению с температурой окружающего воздуха, что препятствует активным физиологическим процессам и является защитным

механизмом растений. После установления стабильно положительных температур воздуха в клетках растений происходит биохимическая перестройка, заключающаяся в распаде комплексных соединений, увеличении содержания моносахаридов, освобождении ферментов. Продолжительность биохимической перестройки зависит от времени протекания биохимической реакции с образованием достаточного количества необходимых для роста веществ [16]. По завершении данных процессов дерево теряет устойчивость к воздействию низких отрицательных температур. Период с 8 по 16 мая характеризуется максимальным превышением температурой ствола температуры воздуха (4 °С). 23 мая отмечено формирование побега текущего года. Следовательно, период начала активного роста сопровождается аккумуляцией тепла в древесном стволе. Таким образом, превышение температурой ствола температуры воздуха может указывать на возрастание физиологической активности дерева и является защитным механизмом от воздействия крайних температур.

Отмечается умеренная криволинейная достоверная зависимость температуры ствола со-

Таблица 1

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ХВОИ И СТВОЛА СОСНЫ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Показатели корреляционного анализа	Освещенность, Лк		Влажность воздуха, %		Температура воздуха, °С	
	Температура хвои, °С	Температура ствола, °С	Температура хвои, °С	Температура ствола, °С	Температура хвои, °С	Температура ствола, °С
r	-0,23	-0,12	-0,23	-0,32	0,97	0,97
m_r	0,18	0,18	0,18	0,17	0,01	0,01
t	1,27	0,64	1,27	1,87	87,00	92,40
η	0,38	0,42	0,56	0,64	0,97	0,97
m_η	0,16	0,16	0,13	0,11	0,01	0,01
t	2,32	2,69	4,40	5,69	98,80	100,10

Примечание: r – коэффициент корреляции, m_r – основная ошибка коэффициента корреляции, t – достоверность, η – корреляционное отношение, m_η – основная ошибка корреляционного отношения

БИОЛОГИЯ

сны от освещенности ($\eta = 0,42$, $t = 2,7$) и значительная криволинейная достоверная связь с влажностью воздуха ($\eta = 0,64$, $t = 5,7$). В ясный солнечный день температура ствола с освещенной стороны поднимается до 60 °С. Но измерения проводились с северной стороны, и здесь температура ствола в ясный или солнечный день в 2–3 раза отличалась от температуры на южной стороне. Инфракрасное излучение поглощается парами воды в воздухе, что приводит к охлаждению поверхности. Таким образом, и влажность воздуха, и освещенность корректирует значения теплового излучения дерева, но ведущим фактором, влияющим на инфракрасное излучение дерева, является температура воздуха.

Температура ветвей на протяжении периода измерений была меньше температуры ствола. Различие достоверно и составляло от 1,4 до 2 °С (табл. 2). До 28 апреля температура вет-

вей была ниже температуры воздуха, причем аккумуляция тепла в ветвях запаздывает по сравнению с аккумуляцией в стволах деревьев. Так, 28 апреля температура ствола превышает температуру воздуха, а температура ветвей выравнивается с ней. В дальнейшем температура и стволов, и ветвей превышает температуру окружающей среды. Это указывает на более раннее начало биохимической перестройки в стволах деревьев по сравнению с ветвями.

Температура хвои на протяжении всего периода измерений меньше температуры воздуха или равна ей. Наибольшее различие в температурах отмечается в период вынужденного покоя (17 и 21 апреля). Однако динамика теплового излучения хвои совпадает с изменением температур окружающего воздуха, отмечается очень высокая достоверная корреляционная зависимость ($r = 0,97$, $t = 87$).

Таблица 2

ДИНАМИКА РАЗНИЦ ТЕМПЕРАТУР СТВОЛА, ВЕТВЕЙ И ХВОИ СОСНЫ В ТЕЧЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА

Дата	Разница между температурой ствола и хвои		Разница между температурой ветвей и хвои		Разница между температурой ствола и ветвей	
	°С	<i>t</i>	°С	<i>t</i>	°С	<i>t</i>
17.04	3,2	5,5	1,2	1,2	2,0	2,1
21.04	2,8	10,0	0,7	2,5	2,1	7,5
28.04	2,0	4,0	0,6	1,2	1,4	2,5
8.05	5,0	6,6	3,2	3,8	1,8	1,7
16.05	3,5	9,7	2,1	3,1	1,4	2,2
23.05	2,7	8,7	1,3	3,2	1,4	2,8
28.05	2,5	4,0	–	–	–	–
30.05	2,1	3,0	–	–	–	–
3.06	1,6	2,3	–	–	–	–
16.06	1,4	2,3	–	–	–	–
18.06	2,2	2,3	–	–	–	–
19.06	2,6	3,2	–	–	–	–
18.07	0,2	0,2	–	–	–	–
4.10	–0,1	0,7	–	–	–	–

Примечание: *t* – достоверность различия: $t_{st} = 2,1$ при вероятности безошибочного заключения $p = 0,95$; $t_{st} = 2,1$ при $p = 0,99$; $t_{st} = 2,1$ при $p = 0,999$.

Температура хвои на протяжении исследуемого вегетационного периода также была ниже температуры ствола дерева. Существенное достоверное различие до 3,5 °С отмечается в апреле, мае, июне. В июле и октябре показатель выравнивается с температурой ствола сосны. Охлаждение хвои по сравнению с другими органами дерева связано с транспирацией [17, 18]. Динамика разниц температур ствола и хвои сосны в течение вегетационного периода согласуется с сезонным ходом транспирации сосны в северной тайге [19]. Так, максимум транспирации приходится на май–июнь. Транспирация контролируется самим растением [20, 21], ее интенсивность связана с ростовыми процессами [19], которые в условиях северной тайги в основном завершаются в течение июня – первой декады июля [22]. Таким образом, отклонение температуры хвои от температуры ствола является показателем как интенсивности работы хвои, так и индикатором фенологического развития деревьев. Выравнивание температуры хвои и температуры ствола может указывать на завершение интенсивных ростовых процессов.

Отклонение температуры хвои от температуры ствола сосны зависит от освещенности, связь значительная достоверная ($r = 0,65$, $t = 5,9$). Чем выше освещенность, тем ниже температура хвои и больше различие с температурой ствола. Отмечается значительная криволинейная достоверная связь данного

показателя с влажностью ($\eta = 0,53$, $t = 4,1$). Не выявлено достоверного влияния температуры воздуха на отклонение температуры хвои от температуры ствола. Указанные зависимости также подтверждают связь отклонения температур хвои от температуры ствола с транспирацией, т. к. ведущим фактором, определяющим интенсивность транспирации, является солнечная радиация [17, 23] и в северной подзоне выявлены умеренные зависимости интенсивности транспирации с влажностью воздуха [19]. С температурой воздуха очень высокая теснота корреляционной связи у показателей и хвои, и ствола дерева, поэтому их разница выпадает из общей закономерности сопоставления с интенсивностью транспирации хвои.

Выводы.

1. В переходные периоды между покоем и вегетацией температура стволов сосны ниже температуры окружающего воздуха на 0,3–1 °С, в период вегетации – выше в среднем на 2,5 °С.

2. Температура ветвей в апреле и мае ниже температуры ствола сосны на 1,4–2 °С.

3. Температура хвои ниже температуры ствола дерева (разница до 3,5 °С) в апреле, мае, июне.

4. Отклонение температуры хвои от температуры ствола сосны зависит от освещенности, связь значительная достоверная ($r = 0,65$; $t = 5,9$).

Список литературы

1. Марков М.Н. Применение инфракрасного излучения. М., 1968. 168 с.
2. Борисов Ю.П. Инфракрасное излучение. М., 1976. 56 с.
3. Смит Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения / пер. с англ. В.И. Иванова. М., 1959. 448 с.
4. Анго М.А. Инфракрасное излучение / пер. с фр. В.М. Скобелева. М.; Л., 1957. 81 с.
5. Леконт Ж. Инфракрасное излучение. М., 1958. 584 с.
6. Овсянникова Н.В., Феклистов П.А., Волкова Н.В., Мелехов В.И., Тараканов А.М., Мерзленко М.Д. Температура древесины ели обыкновенной // Лесн. журн. 2013. № 1. С. 38–42.
7. Busse G. Lock-in Thermography // Nondestructive Testing Handbook. Vol. 3: Infrared and Thermal Testing. 3rd ed. / eds. X. Maldague, P.O. Moore. Columbus; Ohio, 2001. P. 318–327.
8. Catena A., Catena G. Overview of Thermal Imaging for Tree Assessment // Arboric. J. 2008. Vol. 30. P. 259–270.

9. Catena G. A New Utilization of Thermal Infrared Radiation in Studying Vegetation // *Advanced Infrared technology and Applications* / eds. G.M. Carlomagno, C. Corsi. Firenze, 1993. P. 395–401.

10. Catena G., Catena A. Termography for the Evaluation of Cavities and Pathological Tissues in Trees (Evidenziazione mediante la termografia di cavita e tessuti degradati negli arberi) // *Agricoltura Ricerca*. 2000. № 185. P. 47–64.

11. Catena G., Palla L., Calalano M. Thermal Infrared Detection of Cavities in Trees // *Eur. J. of Forest Pathol.* 1990. Vol. 20(4). P. 201–210.

12. Christersson L., Sandstedt R. Short Term Temperature Variation in Needles of *Pinus silvestris* L. // *Canad. J. Forest. Res.* 1978. Vol. 8. P. 480–482.

13. Luong P.M. Infrared Thermography of Damage in Wood // 10th Symp. NDT of wood. Lausanne, 1996. P. 175–185.

14. Tanaka T., Divos F. Thermographic Inspection of Wood // 12th Symp. NDT of Wood. Sopron, 2000. P. 439–447.

15. Карасёв В.Н., Карасёва М.А. Эколого-физиологическая диагностика хвойных пород. Йошкар-Ола, 2013. 216 с.

16. Русаленко А.И. Годичный прирост деревьев и влагообеспеченность. Мн., 1986. 238 с.

17. Веретенников А.В. Физиология растений с основами биохимии. Воронеж, 1987. 256 с.

18. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М., 1983. 464 с.

19. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне Европейской тайги. Архангельск, 1997. С. 140.

20. Судачкова Н.Е. Водный режим и состояние корневых систем подроста хвойных древесных растений в горных условиях // Физиология и экология древесных растений. Свердловск, 1965. С. 81–84.

21. Терёшин Ю.А. Особенности водного режима и роста сосны и березы в различных типах леса Ильменского заповедника: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1968. 41 с.

22. Мелехов И.С., Мелехова Т.А. О влиянии осушения болотных сосняков на формирование древесины // Лесн. журн. 1958. № 4. С. 16–28.

23. Феклистов П.А., Тюкавина О.Н. Особенности ассимиляционного аппарата, водного режима и роста деревьев сосны в осушенных сосняках. Архангельск, 2014. 179 с.

References

1. Markov M.N. *Primenenie infrakrasnogo izlucheniya* [Application of Infrared Radiation]. Moscow, 1968. 168 p.

2. Borisov Yu. P. *Infrakrasnoe izluchenie* [Infrared Radiation]. Moscow, 1976. 56 p.

3. Smith R.A., Jones F.E., Chasmar R.P. *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*. London, 1957.

4. Angot M.A. Le rayonnement infra-rouge. *Memorial de l'artillerie Francaise*, 1955.

5. Lekont Zh. *Infrakrasnoe izluchenie* [Infrared Radiation]. Moscow, 1958. 584 p.

6. Ovsyannikova N.V., Feklistov P.A., Volkova N.V., Melekhov V.I., Tarakanov A.M., Merzlenko M.D. *Temperatura drevesiny eli obyknovnoy* [The Wood Temperature of a Norway Spruce]. *Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 38–42.

7. Busse G. Lock-in Thermography. *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 3. Infrared and Thermal Testing*. Ed. by X. Maldague, P.O. Moore. Columbus; Ohio, 2001, pp. 318–327.

8. Catena A., Catena G. Overview of Thermal Imaging for Tree Assessment. *Arboric. J.*, 2008, vol. 30, pp. 259–270.

9. Catena G. A New Utilization of Thermal Infrared Radiation in Studying Vegetation. *Advanced Infrared Technology and Applications*. Ed. by G.M. Carlomagno, C. Corsi. Firenze, 1993, pp. 395–401.

10. Catena G., Catena A. Termography for the Evaluation of Cavities and Pathological Tissues in Trees (Evidenziazione mediante la termografia di cavita e tessuti degradati negli arberi). *Agricoltura Ricerca*, 2000, no. 185, pp. 47–64.

11. Catena G., Palla L., Calalano M. Thermal Infrared Detection of Cavities in Trees. *Eur. J. of Forest Pathol.*, 1990, vol. 20(4), pp. 201–210.

12. Christersson L., Sandstedt R. Short Term Temperature Variation in Needles of *Pinus silvestris* L. *Canad. J. Forest. Res.*, 1978, vol. 8, pp. 480–482.

13. Luong P.M. Infrared Thermography of Damage in Wood. *10th Symp. NDT of Wood*. Lausanne, 1996, pp. 175–185.

14. Tanaka T., Divos F. Thermographic Inspection of Wood. *12th Symp. NDT of Wood*. Sopron, 2000, pp. 439–447.

15. Karasev V.N., Karaseva M.A. *Ekologo-fiziologicheskaya diagnostika khvoynykh porod* [Eco-Physiological Diagnostics of Softwood]. Yoshkar-Ola, 2013. 216 p.

16. Rusalenko A.I. *Godichnyy prirost derev'ev i vlogoobespechennost'* [Annual Growth of Trees and Moisture]. Minsk, 1986. 238 p.
17. Veretennikov A.V. *Fiziologiya rasteniy s osnovami biokhimii* [Plant Physiology with the Principles of Biochemistry]. Voronezh, 1987. 256 p.
18. Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Fiziologiya drevesnykh rasteniy* [Physiology of Woody Plants]. Moscow, 1983. 464 p.
19. Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. *Biologicheskie i ekologicheskie osobennosti rosta sosny v severnoy podzone Evropeyskoy taygi* [Biological and Ecological Characteristics of Pine Growth in the Northern Subzone of the European Taiga]. Arkhangelsk, 1997, p. 140.
20. Sudachkova N.E. *Vodnyy rezhim i sostoyanie kornevykh sistem podrosta khvoynykh drevesnykh rasteniy v gornykh usloviyakh* [Water Regime and State of the Undergrowth Root Systems of Coniferous Plants in Mountains]. *Fiziologiya i ekologiya drevesnykh rasteniy* [Physiology and Ecology of Woody Plants]. Sverdlovsk, 1965, pp. 81–84.
21. Tereshin Yu.A. *Osobennosti vodnogo rezhima i rosta sosny i berezy v razlichnykh tipakh lesa Il'menskogo zapovednika: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Features of Water Regime and Pine and Birch Growth in Different Forest Types in the Ilmen Reserve: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Sverdlovsk, 1968. 41 p.
22. Melekhov I.S., Melekhova T.A. *O vliyaniy osusheniya bolotnykh sosnyakov na formirovanie drevesiny* [On the Draining Effect of Bog Pine Forests on Wood Formation]. *Lesnoy zhurnal*, 1958, no. 4, pp. 16–28.
23. Feklistov P.A., Tyukavina O.N. *Osobennosti assimilyatsionnogo apparata, vodnogo rezhima i rosta derev'ev sosny v osushennykh sosnyakakh* [Features of Assimilation Apparatus, Water Regime and Growth of Pine Trees in the Drained Pine Forests]. Arkhangelsk, 2014. 179 p.

Tyukavina Ol'ga Nikolaevna

Institute of Natural Sciences and Technology, Northern (Arctic)
Federal University named after M.V. Lomonosov

TEMPERATURE REGIME OF A SCOTS PINE IN A CLIMATE OF ARKHANGELSK

All living organisms are in a state of continuous heat exchange with the environment. They emit the infrared radiation, which transfers a huge amount of information not available to the majority of living organisms. IR methods are widely used to assess the state of the organisms. The pine temperature was measured by the infrared camera. All investigations were carried out in the urban plantings of Scots pine. The trunks temperature simultaneously changes with the ambient temperature, but not identical with it. Low trunk temperature in the preparatory period of the vegetation development is a defense mechanism against the anticipatory physiological activity. During a biochemical alteration process and apparent growth preparation a tree is protected from possible short-time negative temperatures by rising the trunk temperature. The branches temperature is lower than the trunk temperature. The heat accumulation in the pine branches is behind compared with the trunk. The needle temperature in April, May and June is lower than the trunk temperature. In July and October the temperatures of needle and a trunk are equal. Deviation of the needle temperature from the trunk temperature depends on the light intensity and air humidity. This fact is indicative of the evapotranspiration rate influence. As the needle temperatures keep in step with a seasonal trend of pine evapotranspiration the difference in temperatures of the needle and a trunk is an indicator of the physiological activity of a tree. The needle and trunk temperature equalization indicates the finalization of intensive growth processes at the vegetation period. Thus, IR imaging allows establishing the physiological activity of a tree.

Keywords: *trunk temperature, needle temperature, branches temperature, infrared camera, Scots pine.*

Контактная информация:

адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17;

e-mail: tyukavina@agtu.ru