

Г.И. Ложкин, Н.А. Чижикова, Д.В. Тишин, Э.И. Насырова
Казанский (Приволжский) федеральный университет, kpfuecology@gmail.com

РЕГИОНАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ РОСТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В МЕСТООБИТАНИЯХ РАЗНОЙ УВЛАЖНЕННОСТИ

В статье приведены результаты анализа ширины годичных колец 125 деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающей на территории Среднего Поволжья. Сравнены региональные кривые роста сосны обыкновенной, исследованной в разных по степени увлажнения местообитаниях. Анализ показал, что форма кривой радиального роста является характерным признаком, свойственным определенному типу местообитания по уровню влагообеспеченности.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; годичные кольца; болото; суходол; региональная кривая роста.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>

Введение

Годичные кольца деревьев содержат информацию о событиях в природных экосистемах, поэтому их обычно используют для реконструкции параметров внешней среды за длительные интервалы времени с годичным временным разрешением.

Климатическая составляющая в реакции деревьев на условия произрастания проявляется в высокочастотных сигналах хронологий годичных колец, поэтому при выделении климатической составляющей в древесных хронологиях региональные кривые радиального роста применяются для устранения тенденций изменения ширины колец, проявляющейся с возрастом деревьев. Считается, что региональные кривые роста (РКР), используемые для стандартизации измерений древесных колец, отражают внутренние закономерности роста деревьев, связанные с биологическими и возрастными особенностями вида, свойственными рассматриваемой территории (Bontemps, Esper, 2011; Naurzbaev et al., 2004).

Региональные кривые роста используются в классической дендрохронологии в качестве основы для устранения трендов, не связанных с внешними факторами, с применением данных о ширине годичных колец. Региональная кривая роста представляет собой временной ряд, где в качестве шага выступает возраст дерева, а в качестве значений – ожидаемый (усредненный) показатель прироста. При использовании РКР существует некоторая неопределенность в определении возраста: в идеале, при построении региональных кривых каждый из имеющихся индивидуальных рядов со значениями радиального прироста должен начинаться с наиболее молодого кольца, однако на

практике не всегда удается получить значения параметров колец ранних лет, и, как следствие, РКР часто недооценивает значения прироста ранних колец (Briffa, 1992). Тем не менее методы стандартизации с использованием региональной кривой роста превосходят традиционные методы стандартизации с точки зрения сохранения низкочастотной изменчивости во временном ряде, в этом контексте РКР рассматривают как решение проблемы «segment length curse»). При формировании усредненной кривой роста предполагается подавление влияния на оценку размера колец разнонаправленных неклиматических факторов, что делает этот подход привлекательным для использования в стандартизации (Cook, 1995).

Помимо средних значений прироста, интерес вызывают и значения отклонений (Helama, 2004; Helama, 2008). Отмечено, что для более высоких значений ширины годичных колец характерны высокие значения вариации, для показателей плотности эта зависимость выражена слабее. Как правило, растения, произрастающие в более плотных популяциях, показывают отклонение значений ширины радиального прироста выше, чем растения из менее плотных популяций (Weiner, Thomas, 1986). Кроме того, региональная кривая роста в плотных популяциях имеет более вогнутую форму (Helama et al., 2005), то есть значения прироста быстрее переходят от более высоких к более низким.

Часто в целях параметризации региональной кривой прироста подбирают приблизительно описывающие функции, например, модифицированную обратную экспоненту (Fritts, 1969) или кривую Хугершофа (Warren, 1980). Меридиональная и высотная трансекты лиственницы с приме-

нением РКР изучена в работе (Naurzbaev et al., 2004). Средние значения ширины прироста в зависимости от возраста сопоставлялись в рамках каждой из трансект, при этом был отмечен градиент параметров модифицированной обратной экспоненты, описывающей РКР.

В исследовании (Stoll, 1994) значения площади колец прироста сосны обыкновенной соответствовали логнормальному закону распределения. Радиальный прирост особей определялся в первую очередь приростом ранних колец, также значимыми факторами являются возраст и наличие конкуренции; приращение молодых и маленьких деревьев лучше описывалось экспоненциальной моделью, в то время как возрастные особи – сигмоидальной функцией.

У сосны обыкновенной в избыточно-увлажненных местообитаниях обычно наблюдается низкий радиальный прирост годовых колец, что свидетельствует о неблагоприятных почвенно-грунтовых условиях. Вместе с тем, для сосен, произрастающих на болоте, удастся установить связь радиального прироста с климатом. Так, например, общим лимитирующим фактором радиального прироста болотной сосны на территории Марийского Полесья являются погодные условия мая (Тишин и др., 2021).

Целью данной работы являлось выявление особенностей радиального роста с помощью РКР, характерных для сосны обыкновенной, произрастающей в разных типах местообитаний Среднего Поволжья.

Материал и методика исследования

В работе были использованы данные по 125 деревьям сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. с 10 пробных площадок, расположенных в регионах Среднего Поволжья (республики Татарстан, Марий Эл, Ульяновская область) из базы Dendrochron (Тишин, Чижикова, 2013) (рис. 1). Четыре площадки были заложены на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

Первые годы жизни деревьев хуже обеспечены данными, в базе данных мало реально измеренных колец на первом, втором и последующих го-

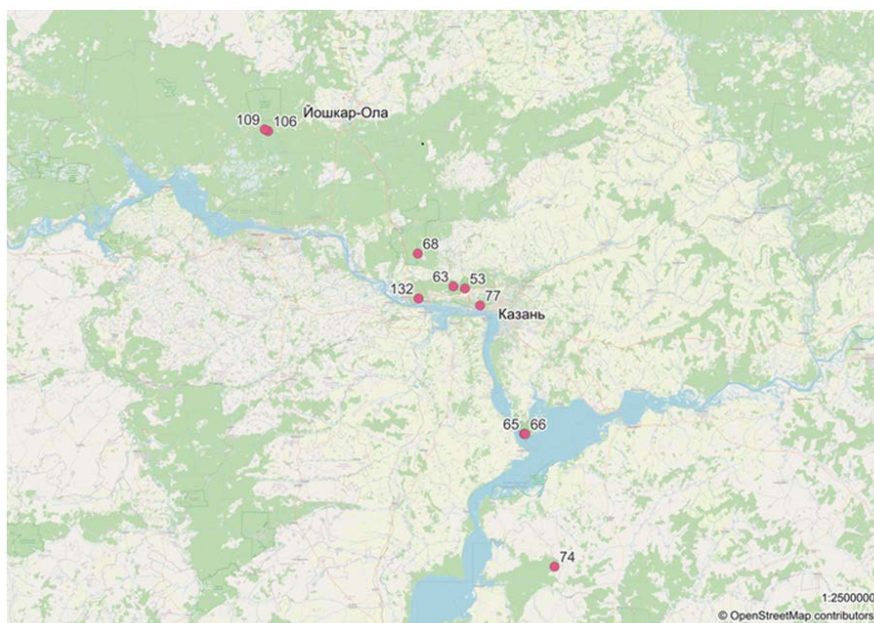


Рис. 1. Местоположение исследуемых участков

Fig. 1. Location of the studied sites

дах жизни. По этой причине для данного периода высока неопределенность оценок размеров колец. Возраст особей уточнялся с использованием метода палетки.

В целом, все исследованные местообитания можно разделить на три категории по уровню влагообеспеченности (влажности почвы): высокое влагообеспечение (сосняки сфагновые), среднее влагообеспечение (сосняки черничники) и низкое влагообеспечение (сосняки лишайниковые). Подробнее информация для каждого местообитания представлена в таблице 1.

Исследуемые участки расположены не на границе ареала сосны обыкновенной, в связи чем можно полагать, что температура не является лимитирующим фактором, ограничивающим ее радиальный прирост. Таким образом, использование региональных кривых роста для удаления возрастного тренда и вычисления индексов радиального роста сосны, произрастающей в Поволжье, можно считать корректным, так как климатический (температурный) тренд оказывает незначительное влияние на кривые роста и не приводит к их искажению.

В работе рассматривались различные методы построения РКР (локальная полиномиальная регрессия, скользящее среднее и др.) на основе данных прироста сосен, произрастающих на сфагновой сплаvine озера Долгое Раифского участка ВКГПБЗ, представленных максимальным объемом выборки – 42 дерева (Тишин, Чижикова, 2013). Показано, что наилучшими свойствами для построения РКР обладает обобщенная регрессионная нелинейная модель (Generalized Linear Model,

Таблица 1. Характеристики исследованных местообитаний
Table 1. Description of studied habitats

ID участка Site ID	Расположение местообитания Habitat location	Характеристика растительности Description of vegetation	Почва Soil	Влажность почвы Soil moisture category
53	Болото «Долгое», Раифский участок ВКГПБЗ, кв. 119/120, Татарстан	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
63	Раифский участок ВКГПБЗ, кв. 25, Татарстан	Сосняк зеленомошный с черникой	Дерново- подзолистая	Средняя
65	Саралинский участок ВКГПБЗ, кв. 43, Татарстан	Сосняк лишайниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
66	Саралинский участок ВКГПБЗ, кв. 49, Татарстан	Сосняк лишайниково- мшистый	Дерново- подзолистая	Низкая
68	Национальный парк «Марий-Чодра», Марий Эл	Сосняк лишайниково- мшистый	Дерново- подзолистая	Низкая
74	Долина р. Утка, Ульяновская область	Сосняк ландышево- вейниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
77	Пригородное лесничество, кв. 90, лесопарк Лебяжье, г. Казань, Татарстан	Сосняк лишайниковый	Дерново- подзолистая	Низкая
106	Болото «Илюшкино», Медведевский район, Марий Эл	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
109	Болото «Дачное», в районе п. Старожильск, Марий Эл	Сосняк сфагново- кустарничковый	Торфяная	Высокая
132	Болото «Маяк», окрестности г. Зеленодольск, Татарстан	Сосняк сфагново- кустарничковый с единичной березой	Торфяная	Высокая

GLM; Dobson, 1990). Все вычисления были проведены с помощью функций и пакетов среды статистического программирования R (R Core team, 2020). В качестве модели, связывающей размер колец с возрастом дерева, была выбрана обобщенная регрессионная модель, реализованная через функцию `glm` пакета `stats` и предполагающая неотрицательные значения гамма-распределенной зависимой переменной. В качестве аппроксиматора нелинейной связи был использован `b-spline` с 4 узлами.

Модели были построены как для каждого местообитания, так и для типов местообитаний, где для каждого уровня влагообеспечения была построена единая модель. Для модели кривой радиального роста деревьев в местообитании с высокой влагообеспеченностью потребовалось ввести веса, обратно пропорциональные количеству деревьев в местообитании, чтобы снизить влияние самого большого (42 дерева) влажного местообитания (болото Долгое, ID 53).

Результаты и их обсуждение

Модели кривых радиального роста, вычисленные для трех уровней влагообеспеченности ме-

стообитаний, представлены на рисунке 2.

Несмотря на недостаток влаги в почве, ширина годовых колец в местообитаниях с низкой влажностью в целом выше, чем в местообитаниях с более высокой влажностью, особенно в начале роста сосны. Можно предположить, что условия сухих лишайниковых сосняков более благоприятны для прорастания сосен и для их роста в целом, чем условия сфагновых болот. В условиях низкой влагообеспеченности для молодых деревьев создается преимущество в росте в связи с небольшой конкуренцией в кустарниковом ярусе. В условиях повышенной влажности торможение ростовых процессов молодого дерева вызвано излишней увлажненностью почв, а также внутривидовой и межвидовой конкуренцией за ресурсы.

Модель местообитания со средней влагообеспеченностью по форме кривой близка к модели с высокой влагообеспеченностью (рис. 2), так как имеет максимум ширины годовых колец, наблюдаемый в возрасте 37 лет (1.7 мм). Однако общий уровень значений ширины колец как в начале, так и к 130 годам (0.77 мм), в большей степени близок к модели с низкой влажностью.

В возрасте свыше 20 лет радиальный прирост

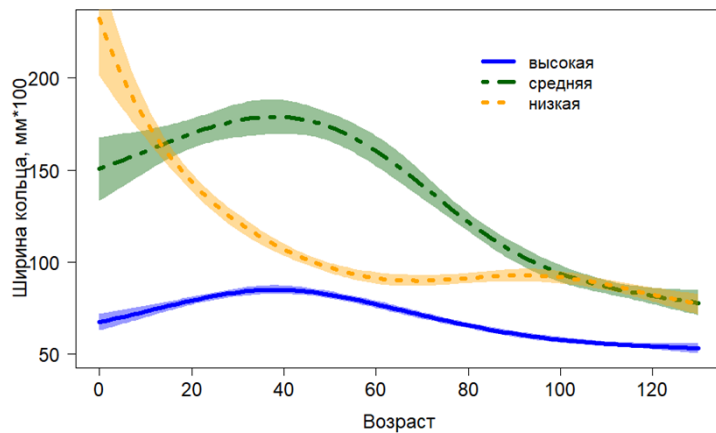


Рис. 2. Сравнение региональных кривых роста, полученных с помощью обобщенной регрессионной модели. Тип линии обозначает влагообеспеченность местообитания

Fig. 2. Comparison of regional growth curves obtained by the generalized regression model. The line type indicates the soil moisture content of the habitat

сосны из среднеувлажненных местообитаний превосходит прирост особей из менее увлажненных. Это можно объяснить недостатком почвенной влаги, проявляющимся в условиях боровых комплексов. Данный вывод согласуется с результатами работы (Иванов и др., 2015), где, в частности, было показано, что повышение уровня воды в оз. Большое Глубокое (г. Казань) привело к заметному увеличению радиального прироста произрастающих в непосредственной близости от береговой зоны экземпляров сосны обыкновенной, по сравнению с деревьями, находящимися на более высоких отметках рельефа.

Следует также отметить необходимость анализа большего числа местообитаний промежуточного уровня влагообеспеченности, чтобы выявить характерный для них спектр форм кривой радиального прироста.

Заключение

Получены модели радиального прироста сосны обыкновенной, соответствующие местообитаниям низкой, средней и высокой влажности в условиях Среднего Поволжья. Форма кривой радиального прироста является признаком, характеризующим уровень влагообеспеченности местообитания и влажности почвы. Кривые с наименьшими размерами колец (менее 1 мм) соответствуют условиям избыточной почвенной влажности (сфагновых болот). Кривая радиального прироста сосны обыкновенной, произрастающей в условиях низкой влажности (местообитания лишайниковых сосняков), характеризуется наибольшими размерами колец в начале роста (2 мм) и последующим монотонным убыванием ши-

рины колец, эта кривая наиболее близка по форме к отрицательной экспоненте. Региональная кривая роста из среднеувлажненных местообитаний показывает максимум прироста в 37–40 лет, после 20 лет она превосходит по приросту деревья из сухих местообитаний. Форма кривой радиального роста колец среднеувлажненных обитаний похожа на форму кривой, характерной для избыточной влажности, с аналогичным пиком в районе 40 лет, однако ее отличает в два раза большая ширина колец.

Полученные модели кривых роста могут быть использованы для подготовки данных о радиальном приросте деревьев (стандартизации, удаления возрастного тренда и вычисления индивидуальных индексов ширины годовых колец) и последующего анализа реакции деревьев на климатические изменения и антропогенные воздействия.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Список литературы

1. Иванов Д.В., Сонин Г.В., Тишин Д.В., Иванова А.Д., Шнепп А.С. Эволюция системы Глубоких озер г. Казани в XX-XXI вв. // Российский журнал прикладной экологии. 2015. №1. С. 31–38.
2. Тишин Д.В., Чижилова Н.А. DENDROCHON. Свидетельство о государственной регистрации №2013621269 от 26.09.2013.
3. Тишин Д.В., Чижилова Н.А., Искандиров П.Ю., Лебедева Г.П. Радиальный прирост годовых колец сосны обыкновенной в условиях болот Марийского Полесья // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №4. С. 20–24.
4. Bontemps J.-D., Esper J. Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France // Dendrochronologia. 2011. Vol. 29. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.09.002>.
5. Briffa K.R., Jones P.D., Bartholin T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales // Climate dynamics. 1992. Vol. 7. P. 111–119. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00211153>.
6. Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies // Holocene. 1995. Vol. 5. P. 229–237. doi: <https://doi.org/10.1177/095968369500500211>.
7. Dobson A. J. An introduction to generalized linear models. London: Chapman and Hall, 1990. 174 p.
8. Fritts H.C., Mosimann J.E., Bortorff C.P. A revised computer program for standardizing tree-ring series // Tree-Ring bulletin. 1969. Vol. 29. P. 15–20.
9. Helama S., Lindholm M., Timonen M., Eronen M. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a

comparison of tree-ring standardization methods // Theoretical and applied climatology. 2004. Vol. 79. P. 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0077-0>.

10. Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., and Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. // International journal of climatology. 2005. Vol. 25. P. 1767–1779. <https://doi.org/10.1002/joc.1215>.

11. Helama S., Vartiainen M., Kolström T., Peltola H., Meriläinen J. X-ray microdensitometry applied to subfossil tree-rings: growth characteristics of ancient pines from the southern boreal forest zone in Finland at intra-annual to centennial time-scales // Vegetation history and archaeobotany. 2008. Vol. 17. P. 675–686. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0147-9>.

12. Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information // Quaternary research. 2004. Vol. 62. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>.

13. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2020. <https://www.R-project.org/>

14. Stoll P., Weiner J. and Schmid B. Growth variation in a naturally established population of *Pinus sylvestris* // Ecology. 1994. Vol. 75 (3). P. 660–670. <https://doi.org/10.2307/1941724>.

15. Warren W.G. On removing the growth trend from dendrochronological data // Tree-ring bulletin. 1980. Vol. 40. P. 35–44.

16. Weiner J., Mallory E.B., Kennedy C. Growth and variability in crowded and uncrowded populations of Dwarf marigolds (*Tagetes patula*) // Annals of botany. 1990. Vol. 65. P. 513–524.

References

1. Ivanov D.V., Sonin G.V., Tishin D.V., Ivanova A.D., Shnepp A.S. Evoliutsiia sistemy Glubokikh ozer g. Kazani v XX-XXI vv. [Evolution of the system of the Deep Lakes of Kazan in the XX-XXI centuries] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2015. No 1. P. 31–38.

2. Tishin D.V., Chizhikova N.A. DENDROCHON. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii №2013621269 ot 26.09.2013. [DENROCHON. Certificate of state registration №2013621269 dated 09.26.2013].

3. Tishin D.V., Chizhikova N.A., Iskandirov P.Iu., Lebedeva G.P. Radialnyi prirost godichnykh kolets sosny obyknovЕННОй v usloviakh bolot Mariiskogo Polesia [Radial increase in Scots pine annual rings under the conditions of the bogs of the Mari Polesye] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021. No 4. P. 20–24.

4. Bontemps J.-D., Esper J. Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France // Dendrochronologia. 2011. Vol. 29. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.09.002>

5. Briffa K.R., Jones P.D., Bartholin T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales // Climate dynamics. 1992. Vol. 7. P. 111–119. <https://doi.org/10.1007/BF00211153>.

6. Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies // Holocene. 1995. Vol. 5. P. 229–237. doi: <https://doi.org/10.1177/095968369500500211>.

7. Dobson A. J. An introduction to generalized linear models. London: Chapman and Hall, 1990. 174 p.

8. Fritts H.C., Mosimann J.E., Bortorff C.P. A revised computer program for standardizing tree-ring series // Tree-Ring bulletin. 1969. Vol. 29. P. 15–20.

9. Helama S., Lindholm M., Timonen M., Eronen M. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods // Theoretical and applied climatology. 2004. Vol. 79. P. 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0077-0>.

10. Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., and Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. // International journal of climatology. 2005. Vol. 25. P. 1767–1779. <https://doi.org/10.1002/joc.1215>

11. Helama S., Vartiainen M., Kolström T., Peltola H., Meriläinen J. X-ray microdensitometry applied to subfossil tree-rings: growth characteristics of ancient pines from the southern boreal forest zone in Finland at intra-annual to centennial time-scales // Vegetation history and archaeobotany. 2008. Vol. 17. P. 675–686. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0147-9>.

12. Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information // Quaternary research. 2004. Vol. 62. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>.

13. R core team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2020. <https://www.R-project.org/>

14. Stoll P., Weiner J. and Schmid B. Growth variation in a naturally established population of *Pinus sylvestris* // Ecology. 1994. Vol. 75 (3). P. 660–670. <https://doi.org/10.2307/1941724>.

15. Warren W.G. On removing the growth trend from dendrochronological data // Tree-ring bulletin. 1980. Vol. 40. P. 35–44.

16. Weiner J., Mallory E.B., Kennedy C. Growth and variability in crowded and uncrowded populations of Dwarf marigolds (*Tagetes patula*) // Annals of botany. 1990. Vol. 65. P. 513–524.

Lozhkin G.V., Chizhikova N.A., Tishin D.V., Nasyrova E.I. **Regional growth curves of *Pinus sylvestris* L. in habitats of different humidity.**

The article presents the analysis of tree-ring width of 125 individuals of *Pinus sylvestris* L., sampled in 10 sites of the Middle Volga region. The regional growth curves for Scots pine growing in three types of habitats differing in soil moisture were compared. The analysis showed that the shape of the radial growth curve is a characteristic feature of the moisture content of the habitat. The resulting models of growth curves can be further used to prepare data on the radial growth of trees and subsequent analysis of the response of trees to climate change and anthropogenic impacts.

Keywords: *Pinus sylvestris* L.; annual rings; bog; dry, regional growth curve.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 31.07.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 14.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 25.08.2023

Информация об авторах

Ложкин Григорий Иванович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: lozhkin.grig@gmail.com.

Чижикова Нелли Александровна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: kukumarian@gmail.com.

Тишин Денис Владимирович, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: kpfuecology@gmail.com.

Насырова Эльвира Ильгизаровна, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: naselvira@mail.ru.

Information about the authors

Grigoriy I. Lozhkin, Postgraduate Student, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: lozhkin.grig@gmail.com.

Nelli A. Chizhikova, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: nelly.chizhikova@kpfu.ru.

Denis V. Tishin, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: kpfuecology@gmail.com.

Elvira I. Nasyrova, Postgraduate Student, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: naselvira@mail.ru.

