

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 2, 2021

---

---

### ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

- Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади  
*С. А. Барталев, Ф. В. Стыценко* 115
- Морфологические особенности хвои красной японской сосны в районе аварии Фукусимской АЭС  
*Е. С. Макаренко, С. А. Гераськин, В. И. Йощенко, М. А. Лыченкова* 123
- Моделирование потенциальной продуктивности древесных пород на примере южно-таежных лесов Приангарья  
*С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик* 132
- Влияние обработки семян сосны обыкновенной микробными и фитопрепаратами на сохранность семян и свойства почвы в лесном питомнике  
*О. Э. Пашкеева, И. Д. Гродницкая, Г. И. Антонов, О. И. Ломовский, И. И. Гайдашева* 143
- Эффекты фитогенного поля сосны в различных климатических условиях  
*О. В. Трефилова, И. П. Беланов, В. И. Уфимцев, Д. Ю. Ефимов* 156
- Изменчивость метеорологических условий произрастания хвойных пород в Средней Сибири с 1960 г.  
*И. В. Тихонова, М. А. Корец* 173
- Компонентный состав базидиом ежевика гребенчатого и их антиоксидантные свойства в зависимости от предобработки опилок сосны и бука  
*А. В. Голышкин, Н. Р. Альмяшева, Л. М. Краснопольская* 187
- Криптогамные организмы – пионеры восстановления северотаежных лесов при снижении воздушного промышленного загрязнения  
*Г. П. Урбанавичюс, Е. А. Боровичев, В. В. Ершов* 195
- 

### МЕТОДИЧЕСКИЕ СТАТЬИ

- Комплексная оценка качества древесины сосны в лесных культурах разных условий местопроизрастания  
*В. И. Мелехов, Н. А. Бабич, С. А. Корчагов, Р. В. Шекалев* 208
- Новый подход к оценке площади поверхности хвои пихты сибирской  
*С. И. Тарасов, Н. В. Герлинг* 217
- 
-

## CONTENTS

---

---

No. 2, 2021

---

---

### Original Articles

- An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas  
*S. A. Bartalev and F. V. Stytsenko* 115
- Morphological Characteristics of Japanese Red Pine Needles from the Areas of the Accident at the Fukushima NPP  
*E. S. Makarenko, S. A. Geras'kin, V. I. Yoschenko, and M. A. Lychenkova* 123
- Tree Species Potential Productivity Modeling on the Example of the Southern Taiga of the Angara Region  
*S. K. Farber and N. S. Kuz'mik* 132
- The Effect of Treatment of Scots Pine Seeds by Microorganisms and Phytopreparations on the Seedling Safety and Soil Properties in a Forest Nursery  
*O. E. Pashkeeva, I. D. Grodnitskaya, G. I. Antonov, O. I. Lomovsky, and I. I. Gaidasheva* 143
- Pine's Phylogenetic Field's Effects in Different Climate Conditions  
*O. V. Trefilova, I. P. Belanov, V. I. Ufimtsev, and D. Yu. Efimov* 156
- A Variability of Meteorological Conditions for the Growth of Coniferous Species in Central Siberia Since 1960  
*I. V. Tikhonova and M. A. Korets* 173
- Hericium erinaceus* Basidiomas Chemical Composition and Antioxidant Properties Depending on the Pretreatment of Pine and Beech Sawdust  
*A. V. Golyshkin, N. R. Al'myasheva, and L. M. Krasnopol'skaya* 187
- Cryptogamic Organisms as Pioneers of the Northern Taiga Recovery Affected under the Conditions of Lowered Industrial Air Pollution  
*G. P. Urbanavichus, E. A. Borovichev, and V. V. Ershov* 195

---

### Methodological Articles

- A Complex Assessment of the Pine Wood Quality in Forest Cultures under Different Growing Conditions  
*V. I. Melekhov, N. A. Babich, S. A. Korchagov, and R. V. Shchekalev* 208
- A New Approach to the Assessment of the Surface Area of the Siberian Fir Needles  
*S. I. Tarasov and N. V. Gerling* 217
- 
-

УДК 504.064.37+581.524.342

## СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА ГИБЕЛИ ДРЕВОСТОЕВ ОТ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ О СЕЗОННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОЙДЕННОЙ ОГНЕМ ПЛОЩАДИ<sup>1</sup>

© 2021 г. С. А. Барталев<sup>a, b, \*</sup>, Ф. В. Стыщенко<sup>a, b</sup><sup>a</sup>Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия<sup>b</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

\*E-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.08.2020 г.

После доработки 16.10.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В работе представлены результаты оценки летальности пожаров (доли площади погибших лесов по отношению к общей их площади, затронутой огнем) в лесах России за период 2006–2019 гг. по данным спутниковых наблюдений. Установленная зависимость вероятности пирогенной гибели лесов от времени возникновения и действия огня в течение сезона позволяет рассматривать фактор сезонного распределения площади пожаров в числе информативных предикторов их летальности. Предложенный в статье индекс сезонной летальности лесных пожаров SFLI (Seasonal Fire Lethality Index) позволяет оценивать масштабы пирогенной гибели лесов России на основе получаемой по результатам спутникового мониторинга информации о распределении пройденной огнем площади в течение пожароопасного сезона. Полученные результаты демонстрируют наличие линейной взаимосвязи величины предложенного индекса со значениями показателя летальности лесных пожаров. При этом коэффициент детерминации связи между двумя вышеупомянутыми характеристиками достигает своего максимума ( $R^2 = 0.80$ ) 19 июля, что обуславливает выбор этой календарной даты в качестве кульминационного дня летальности лесных пожаров. Соответствующее этой календарной дате линейное уравнение регрессионной связи между характеристиками летальности воздействия пожаров на леса России обеспечивает возможность ее ежегодной дистанционной оценки со среднеквадратической погрешностью  $\pm 10.5\%$ . Для оценки летальности лесных пожаров на основе предложенного метода характерны минимальные требования к входным данным, включающим в себя лишь информацию о распределении пройденной огнем площади лесов в течение пожароопасного сезона, что делает возможным его оперативное применение в масштабах страны. Полученные результаты могут иметь непосредственное практическое значение для оптимизации режимов охраны лесов России от пожаров с учетом их потенциальной летальности.

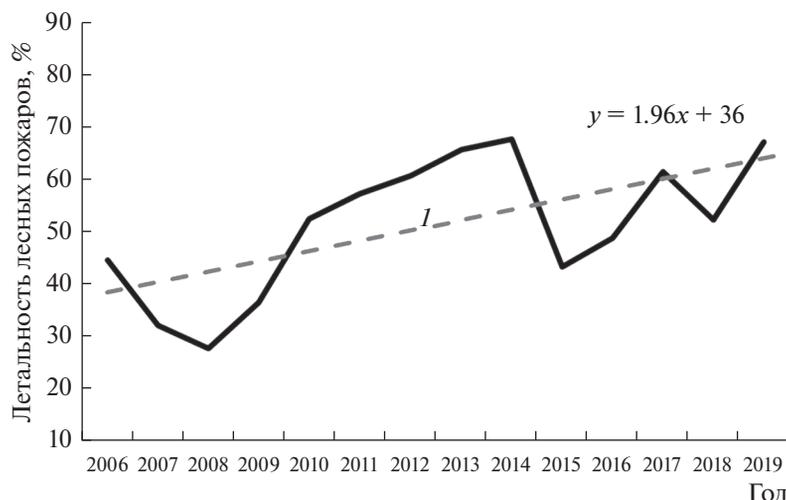
*Ключевые слова:* лесные пожары, пирогенная гибель лесов, мониторинг лесных пожаров, дистанционное зондирование, индекс сезонной летальности лесных пожаров.

DOI: 10.31857/S0024114821020029

Пожары являются наиболее мощным фактором деструктивного воздействия на леса России и проявляют в настоящее время выраженные тенденции нарастания площади их пирогенных повреждений и гибели (Барталев и др., 2015; Пономарев и др., 2017; Харук, Пономарев, 2020), предположительно связываемые, в том числе, с

изменениями климата (Швиденко, Щепашенко, 2013). Благодаря использованию с конца прошлого века спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга лесных пожаров России, особенности их географического и сезонного распределения, межгодовая изменчивость числа возникающих очагов горения и пройденной огнем площади к настоящему времени достаточно хорошо изучены (Лупян и др., 2017). Получившие развитие в последние годы методы дистанционной оценки пирогенных повреждений лесов позволили сформировать ежегодно обновляемые многолетние ряды данных о характеристиках их постпожарных усыханий и гибели в масштабах страны (Стыщенко и др., 2013).

<sup>1</sup> Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (19-77-30015). При проведении исследований использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования “ИКИ-Мониторинг”, развиваемая и поддерживаемая в рамках темы “Мониторинг” (номер госрегистрации 01.20.0.2.00164). Статистическая обработка данных о повреждениях лесов пожарами выполнена в рамках Государственного задания ЦЭПЛ РАН АААА-А18-118052590019-7.



**Рис. 1.** Динамика летальности пожаров в лесах России в период 2006–2019 гг. 1 — тренд многолетних изменений показателя летальности.

Это, в свою очередь, открыло широкие возможности исследования пространственно-временных особенностей пирогенных повреждений лесов России, в том числе во взаимосвязи с их породной структурой и другими характеристиками (Барталев и др., 2015, 2017).

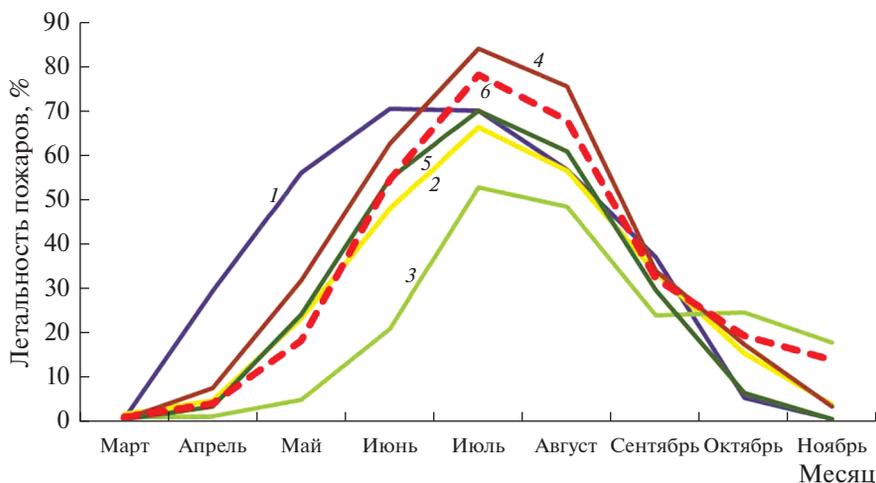
Проведенные исследования позволили, в частности, установить, что площадь ежегодно погибающих от пожаров лесов России характеризуется многократной изменчивостью (Барталев и др., 2015). При этом для среднесноголетних функций распределения площади лесных пожаров в течение пожароопасного сезона характерно наличие выраженных пиков горимости в весенний и летний периоды года (Лурия и др., 2017). В то же время выявлено, что среднесноголетняя вероятность пирогенной гибели лесов характеризуется выраженным сезонным распределением с достижением максимума в летний период, в то время как весенним и осенним пожарам соответствуют многократно более низкие уровни повреждений (Барталев и др., 2015, 2017). Установление указанных закономерностей стимулирует дальнейшие исследования влияния сезонного распределения пройденной огнем площади лесов на степень их повреждения и гибели.

В качестве характеристики степени деструктивного воздействия пожаров на леса введем показатель их летальности, определяемый долей площади погибших лесов по отношению к их общей затронутой огнем площади. При этом площадь погибших от пожаров лесов определяется на основе спутниковых измерений показателя их средневзвешенной категории состояния (СКС), значения которого зависят от степени дефолиации и дехромации составляющих насаждения деревьев (Стыценко и др., 2013). В соответствии с

принятыми в лесном хозяйстве критериями (Руководство ..., 2007), на основе дистанционно измеренных значений показателя СКС выделяются следующие категории состояния лесов: здоровые и ослабленные ( $\leq 2.5$ ), сильно ослабленные (2.5–3.5), усыхающее (3.5–4.5), погибшие ( $\geq 4.5$ ). С учетом отсроченных во времени процессов постпожарных усыханий лесов при прогнозировании характеристик летальности пожаров на основе дистанционных измерений СКС, проведенных сразу после воздействия огня, целесообразно объединение категорий усыхающих и погибших лесов.

Анализ результатов, полученных с использованием разработанных ранее методов оценки пройденной огнем площади и степени пирогенного повреждения лесов на основе данных дистанционного зондирования спутниковой системой MODIS (Барталев и др., 2012, 2015; Стыценко и др., 2013), показывает, что в период 2006–2019 гг. динамика летальности пожаров в лесах России характеризуется диапазоном изменений от 27.5 до 67.5%, с достижением минимального и максимального значений в 2008 и 2014 гг. соответственно (рис. 1). При этом отмечается наличие положительного тренда летальности лесных пожаров со средним ежегодным приростом около 2%, а значение этого показателя в 2019 г. составило 66.9%, вплотную приблизившись к абсолютному его максимуму за охваченный спутниковыми наблюдениями период 2006–2019 гг.

Анализ результатов обработки многолетних данных спутниковых наблюдений выявил наличие выраженной зависимости летальности лесных пожаров от времени их возникновения и действия в течение сезона (рис. 2), позволяя рассматривать фактор сезонного распределения пройденной огнем площади в числе информативных предикторов пиро-



**Рис. 2.** Среднеголетнее сезонное распределение летальности пожаров в лесах России, в том числе для различных групп древесных пород. 1 – темнохвойный лес, 2 – светлохвойный лес, 3 – лиственный лес, 4 – хвойный листопадный лес, 5 – смешанный лес, 6 – все леса.

генной гибели лесов (Барталев и др., 2015). При этом, как уже отмечалось выше, летний период пожароопасного сезона характеризуется наиболее высокими значениями летальности лесных пожаров с достижением максимума показателя в июле. Одновременно следует отметить, что, отличаясь абсолютными значениями среднеголетней вероятности пирогенной гибели, леса с преобладанием различных древесных пород преимущественно демонстрируют сходную по общей направленности сезонную динамику летальности пожаров, включая близкое время достижения ее максимума (Барталев и др., 2017).

Наличие закономерностей сезонного распределения вероятности пирогенной гибели лесов дает возможность прогнозирования на этой основе уровня летальности пожаров в зависимости от времени их возникновения и действия (Барталев и др., 2017). Настоящая статья посвящена развитию подходов к оперативному прогнозированию и экспресс-оценке пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковой оценки сезонного распределения площади пожаров.

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЛЕТАЛЬНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Созданная на основе результатов спутниковых наблюдений спектрорадиометром MODIS база геопространственных данных о пройденных огнем территориях и пирогенных повреждениях лесов (Барталев и др., 2012, 2015, 2017; Стыщенко и др., 2013) охватывает всю территорию России за период 2006–2019 гг. и ежегодно обновляется. Наличие продолжительного временного ряда данных создает основу для исследований закономерностей пирогенной гибели лесов и разработки но-

вых подходов к ее оценке на основе комплексирования данных дистанционных наблюдений со статистическими и эвристическими моделями.

В общем случае прямая оценка летальности лесных пожаров  $i$ -го года может быть получена на основе следующего очевидного выражения:

$$FL_i = MA_i \times BA_i^{-1}, \quad (1)$$

где  $FL_i$  – показатель летальности лесных пожаров;  $BA_i$  – площадь лесных пожаров;  $MA_i$  – площадь погибших от пожаров лесов.

Однако в силу того, что прямая дистанционная оценка площади пирогенной гибели лесов выполняется, как правило, со значительным (до нескольких месяцев) временным лагом (Барталев и др., 2017), для решения оперативных и прогнозных задач возможно использование оценок летальности, получаемых на основе следующего выражения:

$$FL_i = BA_i^{-1} \sum_j \sum_t (PF_j(t) \times BA_{ij}(t)), \quad (2)$$

где  $BA_{ij}(t)$  – площадь пожаров  $i$ -го года, действовавших в лесах  $j$ -й группы пород в календарный день  $t$ ;  $PF_j(t)$  – распределение вероятности гибели лесов от пожаров, действовавших в лесах  $j$ -й группы пород в календарный день  $t$ .

В отличие от метода оценки летальности пожаров на основе выражения (1), основанный на использовании формулы (2) подход может применяться в оперативном режиме, предполагая предварительное установление на основе исторических данных среднеголетнего сезонного распределения вероятностей пирогенной гибели лесов (Барталев и др., 2017). При этом, в силу зависимости вероятности пирогенной гибели лесов

от их породного состава, при использовании выражения (2) необходим учет этого фактора, как при анализе исторических данных, так и при оценке летальности пожаров в текущем пожароопасном сезоне. Необходимость учета породного состава лесов при определении летальности пожаров, в свою очередь, повышает требования к составу входных данных, а также может служить источником дополнительных погрешностей в значениях получаемых оценок.

Для снижения уровня зависимости оперативных оценок пирогенной гибели лесов от входных данных в настоящей работе предложен эвристический индекс сезонной летальности пожаров  $SFLI_i$  (Seasonal Fire Lethality Index), вычисляемый следующим образом:

$$SFLI_i = BA_i^{-1} \sum_t |t - t^*| \times BA_i(t), \quad (3)$$

где  $BA_i(t)$  – площадь лесных пожаров  $i$ -го года, действовавших в календарный день  $t$ ;  $t^*$  – кульминационный день летальности пожаров, соответствующий календарному дню, при котором достигается максимум критерия корреляции между значениями  $SFLI_i$  и  $FL_i$ .

Из выражения (3) следует, что индекс  $SFLI_i$  может интерпретироваться как взвешенное на площадь пожаров среднее отстояние времени их действия от кульминационного дня, а для его оперативной оценки требуется лишь информация о сезонном распределении площади лесных пожаров и предварительно установленное значение постоянной  $t^*$ .

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ сезонных распределений площади лесных пожаров на территории России (рис. 3) свидетельствует об их существенных межгодовых отличиях, выражающихся, в частности, в наличии в различные годы от одного до нескольких пиков горимости с разным временем их появления и относительным вкладом в пройденную огнем площадь.

Появление наиболее раннего (апрель–май) и отчетливо выраженного весеннего пика горимости, как, например, в 2007 и 2009 гг., объясняется пожарами, часто возникающими в лесах в результате неконтролируемых палов сухой травы, осуществляемых преимущественно в сельскохозяйственных целях. Условия для проявления другого характерного пика горимости (июль–август, как, например, в 2006, 2010 и 2013 гг.), как правило, определяются сочетанием факторов летнего нарастания пожарной опасности в силу процессов высыхания природных горючих материалов при длительно сухой погоде, а также роста вероятности появления в лесах источников огня как следствие возрастающего присутствия людей и грозовой ак-

тивности (Соловьев и др., 2010; Подольская и др., 2011). Для ряда лет (например, 2007 и 2009 гг.) характерна множественность пиков сезонного распределения площади пожаров, часто сопровождаемая их слиянием (например, 2012, 2015 и 2016 гг.), что, вероятно, вызвано чрезвычайно высоким уровнем горимости лесов. Минимальные значения показателя летальности (2008 и 2014 гг.) приходится на годы с наиболее выраженным преобладанием весенних и летних пожаров в структуре пройденной огнем площади леса соответственно.

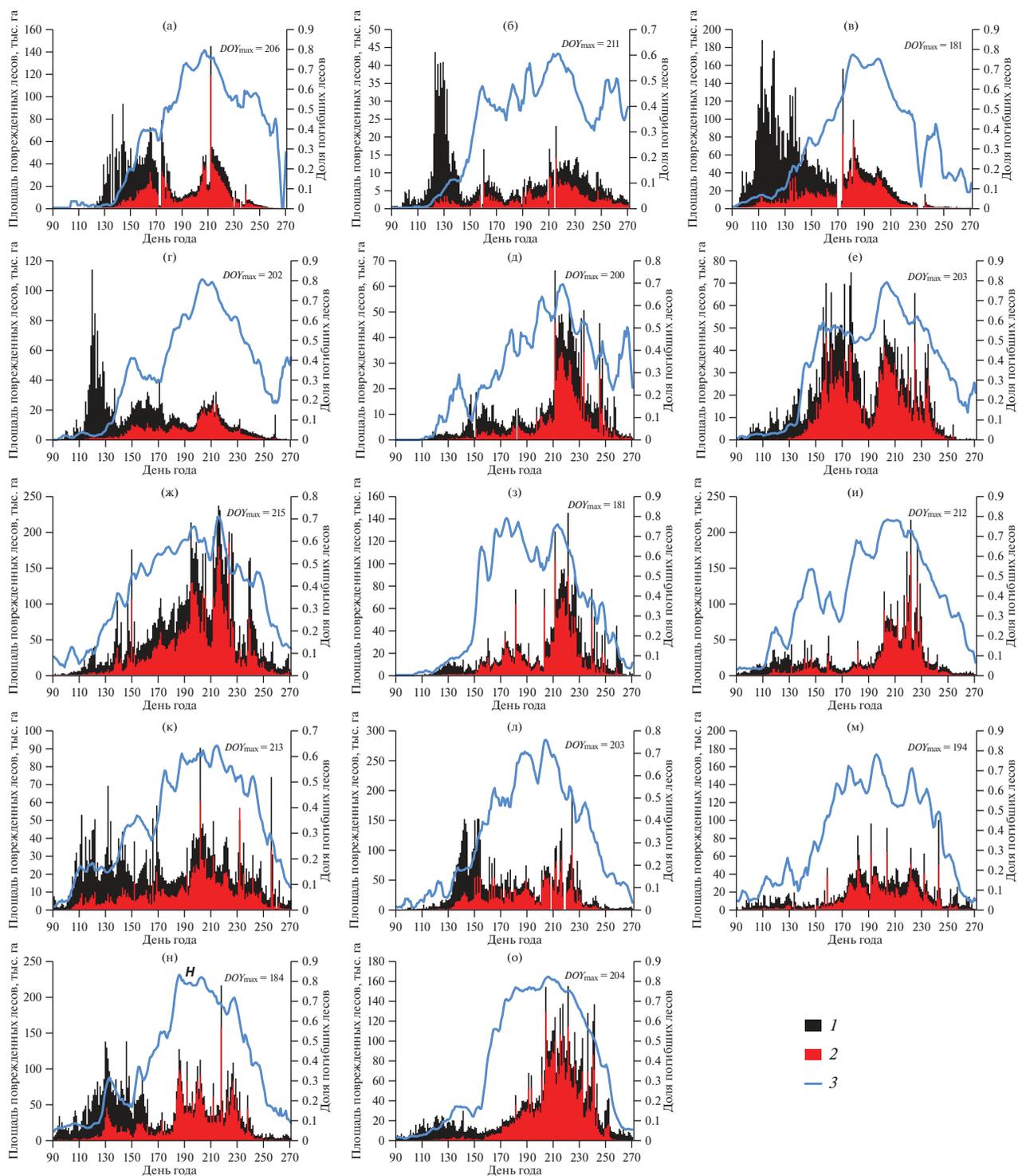
Анализ ежегодных сезонных распределений вероятности пирогенной гибели лесов (рис. 3) показывает, что положения их максимумов ( $DOY_{max}$ ) варьируют в диапазоне от 181- до 215-го календарного дня года. При этом максимум среднееголетнего сезонного распределения вероятности пирогенной гибели лесов России приходится на 203-й календарный день года.

Метод оценки значения кульминационного дня летальности лесных пожаров основан на поиске максимума критерия корреляции между величинами индекса  $SFLI_i$  и показателя  $FL_i$  при задании различных значений  $t^*$ . Рисунок 4 отражает зависимость коэффициента детерминации  $R^2$  между величинами  $SFLI_i$  и  $FL_i$ , рассчитанными по данным о пожарах в лесах России в период 2006–2019 гг. от выбора значения кульминационного дня  $t^*$ .

При значении кульминационного дня  $t^* = 200$  (соответствует календарному дню 19 июля) достигается максимум указанной функции со значением коэффициента детерминации  $R^2 = 0.80$ , свидетельствующим о достаточно хорошем приближении линейной зависимости связи между различными показателями летальности лесных пожаров, что наглядно иллюстрируется рис. 5.

Быстрый рост значений коэффициента детерминации до достижения им максимума и относительно медленный последующий спад объясняются более весомым вкладом весенних и летних пожаров в ежегодно повреждаемую огнем площадь лесов России, а, следовательно, и их наибольшим влиянием на интегральный уровень летальности пожаров и значения индекса  $SFLI_i$ . Медленный спад значений коэффициента детерминации после прохождения его функцией максимума отражает существенно меньший вклад в общую пройденную огнем площадь и гибель лесов осенних пожаров при их большей (по сравнению с весенним пиком горимости) близости по времени к дате кульминации летальности лесных пожаров, что согласуется с приведенными на рис. 3 сезонными распределениями.

Выбор 19 июля в качестве значения  $t^*$  приводит к следующей линейной зависимости между

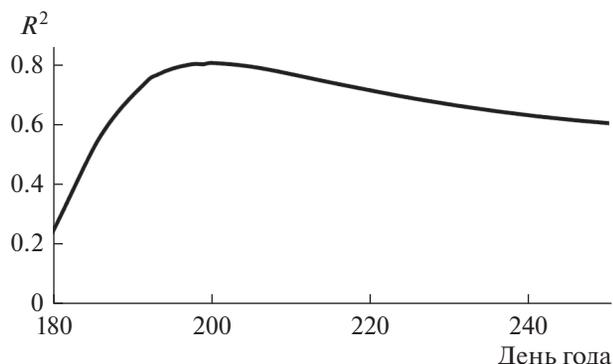


**Рис. 3.** Сезонные распределения площади поврежденных пожарами и погибших лесов на территории России в 2006–2019 гг. а – 2006 г., б – 2007 г., в – 2008 г., г – 2009 г., д – 2010 г., е – 2011 г., ж – 2012 г., з – 2013 г., и – 2014 г., к – 2015 г., л – 2016 г., м – 2017 г., н – 2018 г., о – 2019 г.; 1 – пройденные огнем площади, 2 – погибшие леса; 3 – доля погибших лесов;  $DOY_{max}$  – сезонный максимум вероятности пирогенной гибели лесов.

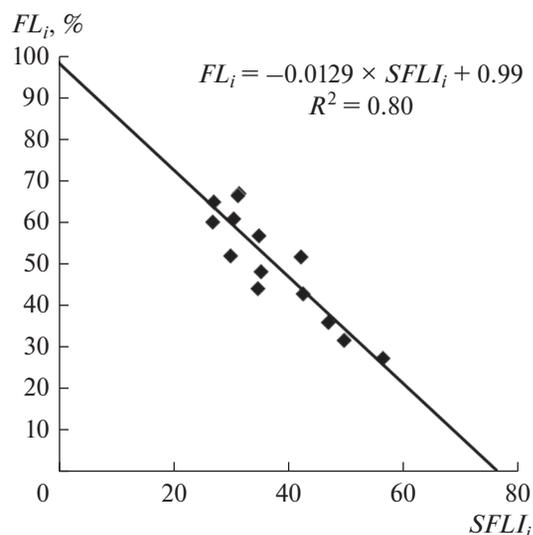
показателем летальности лесных пожаров и индексом  $SFLI_i$ :

$$FL_i = 0.99 - 0.0129 \times SFLI_i \quad (R^2 = 0.80), \quad (4)$$

из которой следует, что теоретически при нулевом значении индекса  $SFLI_i$ , т.е. при гипотетическом действии всех пожаров в день кульминации, их совокупная летальность составит 99% или,



**Рис. 4.** Коэффициент детерминации  $R^2$  между значениями летальности лесных пожаров, вычисленными на основе выражения (1) и индекса  $SFLI_i$  (выражение (3)) при выборе различных значений кульминационного дня  $t^*$ .



**Рис. 5.** Аппроксимация линейной зависимостью взаимосвязи значений показателей летальности лесных пожаров  $SFLI_i$  и  $FL_i$ .

иными словами, с высокой вероятностью приведет к практически полной гибели лесов. При этом по мере роста индекса  $SFLI_i$  величина показателя летальности лесных пожаров снижается, достигая нуля при значении  $SFLI_i = 77$  дней. Таким образом, исходя из этих оценок, можно предположить, что гибель лесов России от пожаров, действующих за пределами временного интервала от 4 мая до 4 октября, является крайне маловероятной. При этом для указанного набора данных среднеквадратическая погрешность определения доли погибших лесов на основе индекса  $SFLI_i$  составила  $\pm 10.5\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов обработки многолетних данных спутниковых наблюдений демонстрирует наличие зависимости вероятности пирогенной гибели лесов от времени возникновения и действия огня в течение сезона, позволяя рассматривать фактор сезонного распределения площади пожаров в числе информативных предикторов их летальности. Предложенный в настоящей статье новый индекс сезонной летальности лесных пожаров позволяет оценивать масштабы пирогенной гибели лесов России на основе информации о сезонном распределении пройденной огнем площади, получаемой по результатам спутникового мониторинга.

Приведенные результаты обработки данных спутникового мониторинга пройденной огнем площади и пирогенной гибели лесов России за период 2006–2019 гг. демонстрируют наличие линейной взаимосвязи значений предложенного индекса с показателем летальности лесных пожаров, достигающей максимума коэффициента детерминации ( $R^2 = 0.80$ ) при значении кульминационного календарного дня летальности 19 июля. Получаемое при этом линейное уравнение регрессионной взаимосвязи между двумя показателями обеспечивает возможность дистанционной оценки летальности лесных пожаров со среднеквадратической погрешностью  $\pm 10.5\%$ . Одновременно указанная взаимосвязь наглядно демонстрирует практически полную (99% пройденной огнем площади) гибель лесов от пожаров, возникающих и действующих в установленный нами календарный день кульминации их летальности. Анализ полученных результатов также свидетельствует о близкой к нулю вероятности гибели лесов России от пожаров, возникающих и действующих за пределами временного интервала “май–октябрь”.

Для спутниковой оценки летальности лесных пожаров на основе предложенного метода характерны минимальные требования к входным данным, включающим в себя лишь информацию о распределении пройденной огнем площади лесов в течение пожароопасного сезона, при возможности оперативного его применения в масштабах страны. Полученные результаты могут иметь непосредственное практическое значение для оптимизации режимов охраны лесов России от пожаров с учетом их потенциальной летальности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых

наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193.

Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыцenco Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-ТМ/ЕТМ+ // Там же. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.

Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыцenco Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активно-го горения) // Там же. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.

Подольская А.С., Ершов Д.В., Шуляк П.П. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз // Там же. 2011. Т. 8. № 1. С. 118–126.

Пономарев Е.И., Харук В.И., Якимов Н.Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36.

Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга. Утверждено приказом Рослесхоза от 29.12.2007 № 523 // Правовая система Консультант плюс, URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129394](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394) (дата обращения: 15.08.2020)

Соловьев В.С., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Васильев М.С. Комплексный мониторинг грозовой активности и лесных пожаров по данным наземных и спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 218–222.

Стыцenco Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Там же. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.

Харук В.И., Пономарев Е.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук. 2020. № 2(87). С. 56–71.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

## An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas

S. A. Bartalev<sup>1,2,\*</sup> and F. V. Stytsenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

<sup>2</sup>Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

\*E-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru

The paper presents the results of the lethality assessment of forest fires (the proportion of the dead forests area in comparison to their total area affected by fire) in the Russian forests for the period of 2006–2019. according to remote sensing data. The determined dependence of the probability of forests' pyrogenic destruction on the time of the fire starting and its overall impact during the season allow us to consider the factor of the seasonal distribution of the area of fires one of the informative predictors of their lethality. The SFLI (Seasonal Fire Lethality Index) suggested in the article makes it possible to estimate the scale of Russian forests' pyrogenic destruction based on the information obtained from satellite monitoring of the area covered by fire distribution during a fire hazardous season. The results obtained demonstrate the presence of a linear correlation between the value of the proposed index and the values of the forest fires lethality index. At the same time, the determination coefficient of the correlation between the two above-mentioned characteristics reaches its maximum ( $R^2 = 0.80$ ) on July 19, which determines the choice of this calendar date as the culminating day of the forest fires' lethality. The linear regression equation corresponding to this calendar date between the characteristics of the fires' lethality for the forests of Russia provides the possibility of its annual remote assessment with a mean square error of  $\pm 10.5\%$ . To assess the lethality of forest fires on the basis of the proposed method, there are minimal requirements for input data, which include only information on the distribution of the forest area covered by fire during the fire-hazardous season, which makes it possible to use it promptly on a national scale. The results obtained can be of direct practical importance for optimizing the fire protection regimes of Russian forests, taking into account the fires' potential lethality.

*Keyword:* forest fires, pyrogenic destruction of forests, forest fires monitoring, remote sensing, Seasonal Fire Lethality Index.

**Acknowledgements:** The work has been carried out with a financial support of the RSCF (19-77-30015). Infrastructure of the Shared Knowledge Centre "IKI-Monitoring", developed and being maintained within the framework of the "Monitoring" programme (state register code 01.20.0.2.00164) was used to carry out this research. Statistical processing of data was carried out within the framework of the State Contract with CEPF RAS AAAA-A18-118052590019-7.

## REFERENCES

- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Y., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyykh dannyykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie.*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A., Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoi gibeli lesov na osnove dannyykh sputnikovyykh nablyudenii (Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193.
- [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129394](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394) (August 15, 2020)
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Pozhary i gari sibirskoi taigi (Fires and burns of the Siberian taiga), *Nauka iz pervyykh ruk*, 2020, No. 2(87), pp. 56–71.
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Sen'ko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.
- Podol'skaya A.S., Ershov D.V., Shulyak P.P., Primenenie metoda otsenki veroyatnosti vozniknoveniya lesnykh pozharov v ISDM-Rosleskhoz (Forest fire occurrence probability assessment: method and approach in Russian remote monitoring information system (ISDM-Rosleskhoz)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 118–126.
- Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Yakimov N.D., Rezul'taty i perspektivy sputnikovogo monitoringa prirodnykh pozharov Sibiri (Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36.
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Climate change and wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 683–692.
- Solov'ev V.S., Kozlov V.I., Karimov R.R., Vasil'ev M.S., Kompleksnyi monitoring grozovoi aktivnosti i lesnykh pozharov po dannym nazemnykh i sputnikovyykh nablyudenii (Simultaneous monitoring of thunderstorm activity and forest fires on data of ground-base and remote sensing observations), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 4, pp. 218–222.
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozhamami na osnove sputnikovyykh dannyykh MODIS (Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.

УДК 539.1.047:582.475.4:574.24

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХВОИ КРАСНОЙ ЯПОНСКОЙ СОСНЫ В РАЙОНЕ АВАРИИ ФУКУСИМСКОЙ АЭС<sup>1</sup>

© 2021 г. Е. С. Макаренко<sup>а</sup>, \*, С. А. Гераськин<sup>а</sup>, В. И. Йошенко<sup>б</sup>, М. А. Лыченкова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии”,  
Киевское шоссе, 109-й км, г. Обнинск, Калужская область, 249032 Россия

<sup>б</sup>Институт радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета,  
Канаягава, 1, Фукусима, 960-1296 Япония

\*E-mail: makarenko\_ek\_obninsk@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 04.03.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Изучены морфометрические и морфологические параметры хвои красной японской сосны, произрастающей на радиоактивно загрязненных в результате аварии на Фукусимской АЭС территориях Японии. Сосна является уникальным, широко распространенным объектом исследования, который обладает разнообразными информативными и чувствительными тест-системами на разных уровнях организации. В данной работе в 2019 г. исследована изменчивость двухлетней хвои по массе и длине, оценены индексы флуктуирующей асимметрии, а также частота встречаемости некрозов и морфозов (треххвойные брахибласты) на четырех импактных и одном референтном участке. Мощность амбиентного эквивалента дозы изменялась на радиоактивно загрязненных участках от  $3.4 \pm 0.1$  до  $6.4 \pm 0.4$  мкЗв  $\cdot$  ч<sup>-1</sup> (в контроле —  $0.25 \pm 0.05$  мкЗв  $\cdot$  ч<sup>-1</sup>). Статистически значимой корреляции исследуемых показателей хвои с уровнем радиационного воздействия не обнаружено. Длина хвои значимо повышена только на одном импактном участке, а масса хвои — на большинстве участков, испытывающих радиационное воздействие. Индекс флуктуирующей асимметрии длины хвои на участке с наибольшей мощностью дозы значимо превышает контрольный уровень. Индекс флуктуирующей асимметрии массы хвои на всех импактных площадках значимо не отличался от контроля. Частота сильно пораженных некрозом хвоинок значимо выше на большинстве радиоактивно загрязненных участков. Обнаружены брахибласты с тремя хвоинками на всех исследуемых площадках, на большинстве импактных участков их частота выше, чем на контрольном участке. Таким образом, даже спустя 8 лет после аварии на Фукусимской АЭС часть значений морфологических и морфометрических показателей в популяциях красной японской сосны, произрастающих на радиоактивно загрязненных участках, статистически значимо превышает контрольный уровень.

*Ключевые слова:* красная японская сосна, хроническое облучение, хвоя, авария на Фукусимской АЭС.

DOI: 10.31857/S0024114821010071

С начала XX в. и по настоящее время не утрачивают актуальность исследования влияния хронического действия ионизирующего излучения на природные популяции растений и животных, которые приобрели особое значение для территорий, пострадавших в результате радиационных аварий на ПО “Маяк”, Чернобыльской и Фукусимской АЭС.

Данные о высокой радиочувствительности хвойных растений были получены еще в начале 60-х годов (Sparrow, Woodwell, 1962). В клетках хвойных растений очень крупные ядра, хромо-

сомные наборы содержат в несколько раз больше ДНК, чем у покрытосеменных растений (Козубов, Муратова, 1986). Большой размер генома сосны по сравнению с большинством других растений, достигающий 24.6 Гб (Ahuja, Neale, 2005), и большие интерфазные хромосомы объемом до 61.1 мкм<sup>3</sup> (Conger et al., 1982) обусловили повышенную ее чувствительность к ионизирующему излучению (LD<sub>50</sub> 5–20 Гр) (Сарапульцев, Гераськин, 1993).

Сосна красная японская, или густоцветковая (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc) формирует монодоминантные леса, в значительной степени определяя структуру и функции лесной экосистемы. Она имеет широкий ареал произрастания в Япо-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (19-54-50003) и гранта JSPS в рамках двусторонней программы поддержки совместных проектов РФФИ-JSPS.

нии и важное хозяйственное значение, радиочувствительна ( $LD_{50}$  6 Гр) (Sparrow et al., 1971). Сосна внесена в список референтных растений и животных, рекомендованных Международной комиссией по радиационной защите для проведения оценки и ограничения радиационного воздействия на окружающую среду в условиях хронического облучения (ICRP, 2008).

На территориях, загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и на ПО “Маяк”, эффекты радиационного воздействия на лесные экосистемы активно изучались преимущественно на примере сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). При облучении в высоких дозах наблюдали различные нарушения вегетативных органов: образование морфозов, угнетение прироста побегов, опадение хвои, изменение ее размеров, усиленное почкование на верхушках годовых побегов, изменение ультраструктуры хвои, подавление роста меристематических тканей, снижение прироста древесины по диаметру и т.д. (Козубов, 1996; Козубов, Таскаев, 2002; Федотов и др., 2006). В лесонасаждениях, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в дозах от 0.5 до 1.0 Гр, наблюдали (Федотов и др., 2006) явление стимуляции, которое в 1986 г. проявилось в увеличении прироста годовых побегов. По другим показателям роста и развития насаждения сосны в этой зоне не отличались от контроля. На радиоактивно загрязненных после аварии на Фукусимской АЭС территориях у молодых деревьев ели (Watanabe et al., 2015) и красной японской сосны (Yoschenko et al., 2016) было обнаружено увеличение частоты подавления апикального доминирования, однако морфологические показатели хвои изучены не были. Таким образом, морфологические характеристики вегетативных органов хвойных растений из 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС исследованы достаточно подробно, в то время как о радиобиологических эффектах у растений с территорий, прилегающих к Фукусимской АЭС, информации явно недостаточно. Целью настоящей работы являлась оценка морфометрических показателей хвои красной японской сосны в условиях хронического радиационного воздействия.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проводили на 4 экспериментальных участках, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Фукусимской АЭС. В качестве контроля был выбран участок на территории кампуса Фукусимского университета (рис. 1). Мощность амбиентного эквивалента дозы на высоте 1 м измеряли в мае 2019 г. сцинтилляционным дозиметром (PDR-111, Hitachi-Aloka Medical, Ltd.).

Ниже представлена характеристика участков, на которых было выполнено исследование.

F – Fukushima University Campus – контрольный участок (37.682921 с.ш.; 140.456635 в.д.), представляет собой ступенчатый склон. Полнота насаждений – 0.7. Возраст деревьев – 5–10 лет. Красновато-желтая почва. Мощность дозы –  $0.25 \pm 0.05$  мкЗв · ч<sup>-1</sup>.

A – Akibadai (37.411508 с. ш.; 140.960887 в. д.). Участок представляет собой заброшенное рисовое поле. Полнота насаждений – 0.5. Средний возраст деревьев – 6 лет. Почва – андосоли. Мощность дозы –  $3.4 \pm 0.1$  мкЗв · ч<sup>-1</sup>.

T – Tsushima Farm (37.553270 с.ш.; 140.786833 в.д.). Заброшенное поле. Полнота насаждений – 1.0. Возраст большинства деревьев – 7 лет. Почва – андосоли. Мощность дозы –  $3.5 \pm 0.3$  мкЗв · ч<sup>-1</sup>.

S – Tsushima School (37.562330 с.ш.; 140.768256 в.д.). Бывшая спортивная площадка. Полнота насаждений – 0.5. Средний возраст деревьев – 5 лет. Мощность дозы –  $3.7 \pm 0.4$  мкЗв · ч<sup>-1</sup>.

O – Okuma Sports Center (37.411911 с. ш.; 140.994318 в. д.). Участок расположен около дороги. Полнота насаждений – 1.0. Средний возраст деревьев – 8 лет. Слаборазвитая почва. Мощность дозы достигала  $6.4 \pm 0.4$  мкЗв · ч<sup>-1</sup>.

Для анализа состояния хвои на участках F, A, T, S и O пробы отбирали в мае 2019 г. с 11, 9, 7, 11 и 11 деревьев, соответственно. С каждого дерева собирали по 30–60 пар двухлетних хвоинок. Хвою без признаков усыхания отбирали на высоте 1.5–2 м с разных сторон дерева и хранили в морозильной камере до проведения измерений. Оценивали морфометрические параметры (длина и масса хвои, индексы флуктуирующей асимметрии) и состояние хвои (частота морфозов, количество некротических образований). Парные хвоинки разделяли, длину определяли с точностью до 0.5 мм, массу подсушенных в сушильном шкафу хвоинок определяли с точностью до 0.1 мг на лабораторных аналитических весах Ohaus Adventurer Pro (Ohaus Corporation, Pine Brook, USA). Индекс ФА хвои по длине и массе хвоинок рассчитывали по формулам (Kozlov et al., 2002a). Классификацию некротических повреждений проводили по стандартной методике (Экологический мониторинг ..., 2005).

Данные были проверены по критерию Диксона и критерию Грабса на наличие выбросов, которые исключены из дальнейшего рассмотрения. Для определения значимости различий между средними значениями использовали U-тест Манна–Уитни в программе Statistica, 8.0. На рисунках представлены средние значения и стандартные ошибки среднего.

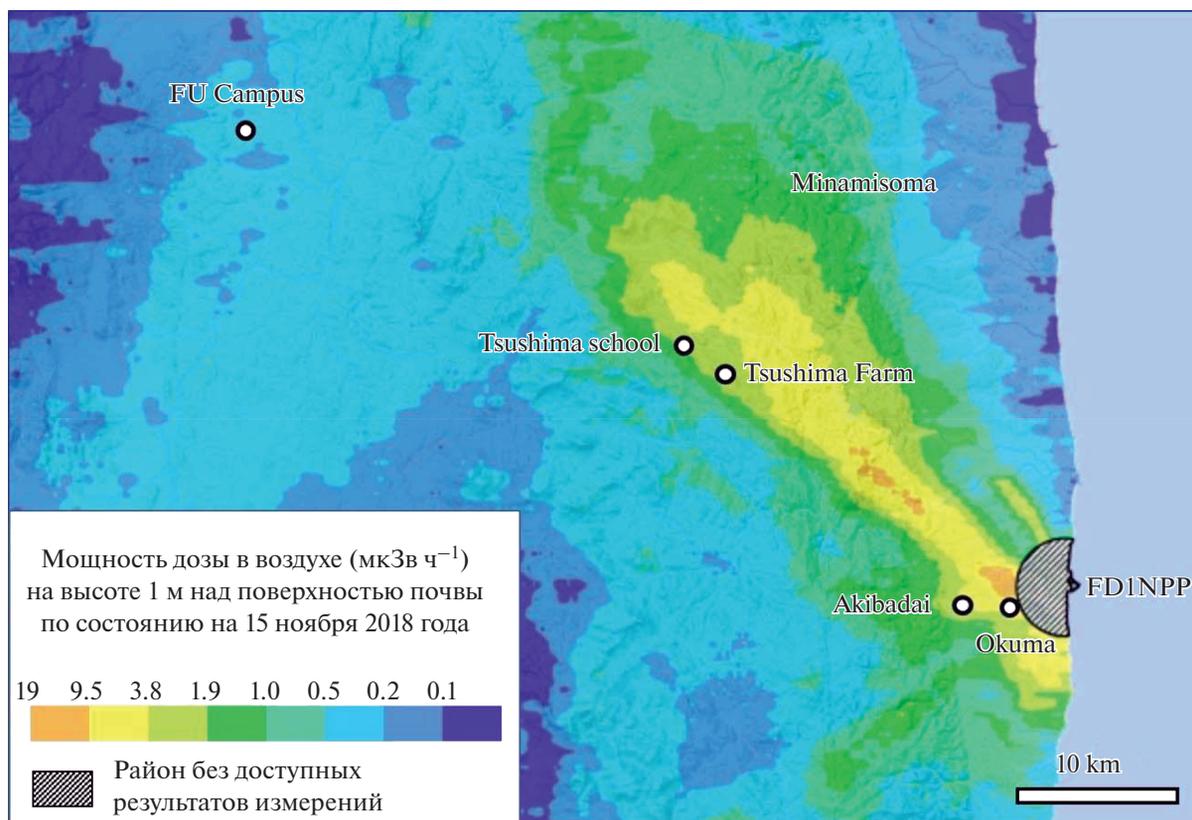


Рис. 1. Расположение экспериментальных участков и мощность дозы в воздухе на территории, радиоактивно загрязненной в результате аварии на Фукусимской АЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Масса и длина хвои.** Представленные на рис. 2 результаты свидетельствуют о значимом увеличении массы хвои на участках А, Т, S по сравнению с контролем. Данные результаты являются предварительными. Возможно увеличение массы хвои является проявлением стимулирующего действия малых доз радиации. Также вероятно, что оно обусловлено индивидуальной изменчивостью деревьев или локальными условиями произрастания. Поэтому в 2020 г. будет проведено повторное исследование морфометрических показателей хвои с большим числом деревьев.

Стимулирующее действие облучения в дозах 0.7–1 Гр на сосну, в результате которого масса хвои увеличилась в 1.5 раза, было обнаружено Г.М. Козубовым с соавт. (1993). Также увеличенная относительно контроля масса хвои выявлена в условиях хронического радиационного воздействия на территории Брянской области, загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Makarenko et al., 2016). Согласно работам Н.И. Гольцовой (1990), Г.М. Козубова и А.И. Таскаева (2007), увеличение размеров хвои связано с тем, что в хвое сосны увеличивается диаметр смоляных каналов, в 1.5–2 раза

возрастает площадь поперечного сечения эпидермы и гиподермы, а также площадь сечения проводящего цилиндра. В целом увеличение сечения отдельных элементов шло параллельно с увеличением общей площади сечения хвои. Аналогичная картина наблюдалась и в отношении хвои ели. В 1987 г. у подавляющего большинства деревьев резко возросли все параметры хвои и на вегетативных побегах сформировалась крупная прямая и сильно изогнутая утолщенная хвоя.

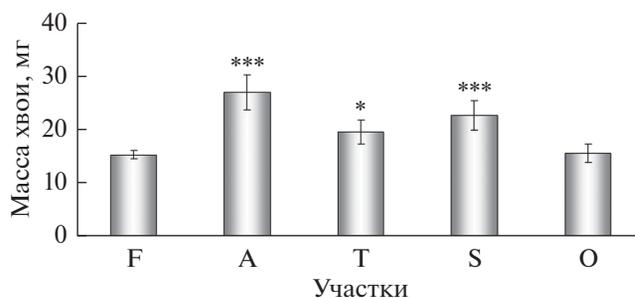


Рис. 2. Масса хвои красной японской сосны на исследуемых участках  
\* и \*\*\* — значимое отличие от контрольного участка,  $p < 0.05, p < 0.001$ .

**Таблица 1.** Длина хвои на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч <sup>-1</sup>	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Длина хвои, мм	79.0 ± 4.6	93.5 ± 6.3*	81.3 ± 6.4	83.0 ± 4.5	75.4 ± 4.8

\* Значимое отличие от референтного участка,  $p < 0.05$ .

**Таблица 2.** Индекс флуктуирующей асимметрии по массе хвоинок на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч <sup>-1</sup>	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Индекс ФА по массе	0.041 ± 0.003	0.045 ± 0.003	0.043 ± 0.004	0.044 ± 0.003	0.045 ± 0.002

В 1987 г. наряду с общим увеличением параметров хвои ели наблюдали возрастание диаметров клеток эпидермы, гиподермы и мезофилла, причем наиболее интенсивное укрупнение гистологических элементов было отмечено у хвои с максимальными площадями сечения (которые превысили показатели доаварийного 1985 г.), т.е. абсолютные показатели, как правило, были пропорциональны общим морфометрическим показателям. Относительные (парциальные) объемы тканей оставались близкими к нормальной хвое. Некоторым исключением являлся относительный объем проводящего цилиндра, который достиг наибольших величин у сильно укороченной хвои в 1986 г. и у гигантской хвои – в 1987 г. В настоящей работе значимое ( $p < 0.05$ ) увеличение длины хвои относительно контрольного участка (табл. 1) обнаружено только на участке А.

**Флуктуирующая асимметрия (ФА).** Данные о массе и длине парных хвоинок были использованы для оценки индексов ФА по массе и длине хвои и

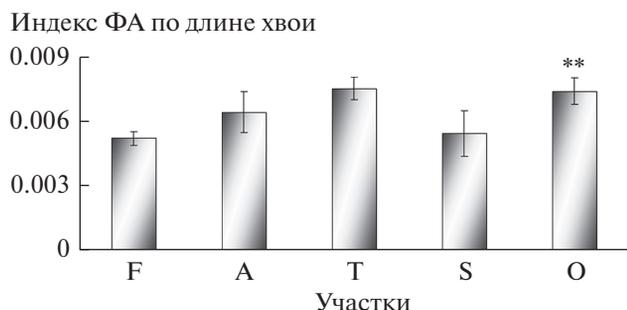
изучения закономерностей их изменения в условиях хронического радиационного воздействия.

Индекс ФА по массе хвои хотя и превышает контрольный уровень во всех импактных популяциях, но не отличается от него значимо (табл. 2) и не имеет значимой зависимости от мощности амбиентного эквивалента дозы.

Результаты оценки индекса флуктуирующей асимметрии по длине хвои красной японской сосны, произрастающей на радиоактивно загрязненной территории, представлены на рис. 3. На площадке О с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения индекс ФА по длине значимо превышает контрольный уровень ( $p < 0.01$ ).

Метод оценки флуктуирующей асимметрии на сосне обыкновенной для определения воздействия техногенного загрязнения был впервые применен относительно недавно – в 1999 г. (Kozlov, Niemela, 1999). Исследователями было установлено увеличение асимметрии длины хвои сосны по мере приближения к комбинату Североникель (основными поллютантами являлись никель, медь и их производные, а также сульфаты). Аналогичный эффект был отмечен в работе (Василевская, Тумарова, 2005) возле Ковдорского горно-обогательного комбината и близ медно-никелевого завода в Финляндии (Kozlov et al., 2002b). Действие промышленного загрязнения на морфометрические показатели хвои сосны обыкновенной изучали многие ученые, но действие как острого, так и хронического облучения на флуктуирующую асимметрию хвои красной японской сосны до сих пор остается малоизученным.

Исследования асимметрии в условиях радиационного воздействия было проведено на разных видах растений. Значимая корреляция между

**Рис. 3.** Индекс флуктуирующей асимметрии по длине хвои.

\*\* – значимое отличие от референтного участка,  $p < 0.01$ .

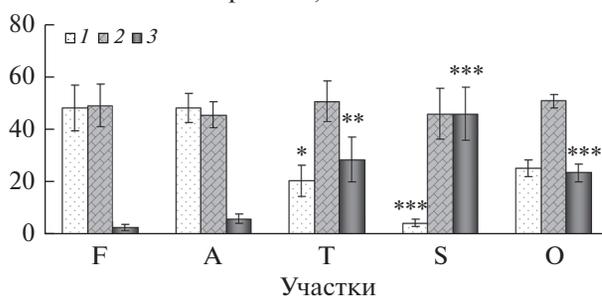
флуктуирующей асимметрией листьев и плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  наблюдалась для трех видов растений: робинии ложноакациевой (*Robinia pseudoacacia* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и ромашки продырявленной (*Matricaria perforata* Merat) (Møller, 1998). Рядом с Чернобыльской зоной отчуждения все три вида продемонстрировали уровень нестабильности развития в три-четыре раза выше, чем в незагрязненных районах вдали от Чернобыльской АЭС. Статистически значимое увеличение индекса флуктуирующей асимметрии у растений клевера было обнаружено на участке промплощадки пункта временного хранения радиоактивных отходов Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами, где мощность экспозиционной дозы в 50–60 раз превышала естественный радиационный фон (Горшкова и др., 2014). Индекс ФА листьев лапчатки кустарниковой (*Potentilla fruticosa* L.) с контрастных по уровню радиоактивного загрязнения участков Восточно-Уральского радиоактивного следа увеличивался с уровнем радиоактивного загрязнения вне зависимости от периода вегетации и года наблюдения (Храмова и др., 2019). Хроническое воздействие ионизирующего излучения (при мощности поглощенной дозы на поверхности почвы  $4.74 \text{ мкГр} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) привело к увеличению интегрального индекса ФА листьев березы повислой (на 30%) и содержания в них хлорофилла *a* (на 50%) и хлорофилла *b* (на 83%) (Иванов и др., 2015).

Как было замечено (Молотковский Г., Молотковский Ю., 1961), обычно бо́льшая сторона листа (слева или справа от жилки) характеризуется бо́льшим содержанием хлорофилла, аскорбиновой кислоты и бо́льшей активностью каталазы и пероксидазы. Таким образом, морфологическое выражение асимметричности имеет подтверждение в физиолого-биохимических процессах.

На хвое сосны обыкновенной был выявлен повышенный индекс флуктуирующей асимметрии по длине на протяжении трех из четырех лет исследования на наиболее радиоактивно загрязненных участках Брянской области (Makarenko et al., 2017b). Однако согласно другим исследованиям (Kashparova et al., 2018), не было обнаружено зависимости ФА хвои сосны обыкновенной и листьев березы (*Betula pendula* Roth) от уровня радиационного воздействия в ближней зоне Чернобыльской АЭС при мощности дозы от 0.1 до  $40 \text{ мкГр} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Таким образом, согласно нашим данным, индекс ФА, определяемый по разнице длин парных хвоинок, является более чувствительным индикатором хронического радиационного воздействия, чем индекс ФА по массе хвоинок.

**Некрозы хвои.** При изучении частоты встречаемости некротических пятен на хвое выделяли:

Частота хвои с некрозами, %



**Рис. 4.** Частота поражения некрозами хвои японской красной сосны на исследуемых участках

\*, \*\* и \*\*\* – значимые отличия от контроля,  $p < 0.05$ ;  $p < 0.01$  и  $p < 0.001$

1 – здоровая, %; 2 – частично поврежденная, %; 3 – сильно поврежденная, %.

1) абсолютно здоровую хвою; 2) с несколькими маленькими пятнами; 3) с большим количеством пятен. Частота здоровых хвоинок на загрязненных участках Т и S значимо ниже, чем в контрольной популяции (рис. 4). Одновременно выявлено значимое увеличение частоты сильно поврежденных некрозом хвоинок на участках Т, S и O относительно контрольного участка F.

Развитие некрозов не является специфической реакцией на радиационное воздействие. Исследователи отмечали увеличение частоты встречаемости точечных и концевых некрозов хвоинок сосны обыкновенной, произрастающей в условиях повышенного техногенного загрязнения (Хан, 2000; Неверова, Колмогорова, 2002). Действие природных стрессовых факторов, таких как дефицит питания, инвазии насекомых, поражение патогенами (грибы, бактерии, вирусы), экстремальные погодные условия и др., может являться причиной появления видимых повреждений листовых органов. Тем не менее сходный эффект повышения частоты сильно поврежденной некрозом хвои на наиболее радиоактивно загрязненных участках наблюдался в Брянской области, загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Makarenko et al., 2017a). Поэтому можно полагать, что и в настоящей работе именно радиационный фактор оказывает влияние на формирование сильно поврежденной некрозом хвои красной японской сосны. Причем действие излучения может быть как прямым (частичное поражение хвои), так и косвенным (ослабление иммунитета растений).

**Нарушения морфогенеза.** Многохвойные брахибласты, содержащие по 3–5 и более хвоинок в одном пучке, встречались и у потомков сосен из 10-километровой зоны Чернобыльской АЭС, испытывавших острое облучение в высоких дозах

**Таблица 3.** Число и доля брахибласт с тремя хвоинками на исследуемых участках в зависимости от мощности дозы

Параметр	Участок				
	F	A	T	S	O
Мощность дозы, мкЗв · ч <sup>-1</sup>	0.25	3.4	3.5	3.7	6.4
Число брахибласт, шт	1	2	4	2	1
Доля брахибласт, %	0.17	0.44	1.08	0.35	0.16

(Игонина и др., 2012), и у деревьев, длительное время произрастающих на территориях с низким уровнем радиоактивного загрязнения (Драган и др., 2006). В нашем исследовании были обнаружены только треххвойные брахибласты, частота которых изменяется на импактных участках в пределах от 0.16 до 1.08%, тогда как на референтном участке она составляет 0.17% (табл. 3). В работе К. Boratynska и А. Boratynski (2006) для большинства исследованных видов рода *Pinus* частота встречаемости треххвойных брахибласт в природных условиях невысока и составляет 0–0.2%. Таким образом, частота данного морфоза у красной японской сосны на одном из радиоактивно загрязненных участков префектуры Фукусима на порядок превышает естественный уровень встречаемости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучавшаяся в данной работе красная японская сосна произрастает на радиоактивно загрязненных территориях и испытывает дозовые нагрузки 0.25–6.4 мкЗв · ч<sup>-1</sup>. Этот диапазон доз хронического облучения представляет особый интерес с точки зрения обоснования предельно допустимых уровней радиационного воздействия на живую природу. По оценкам международного проекта ERICA годовая доза около 100 мГр может рассматриваться как предел безопасного уровня хронического облучения для всех групп организмов, составляющих обобщенную наземную экосистему (Environmental risk ..., 2003). При установлении этих пределов оценивалось действие ионизирующего излучения на продолжительность жизни и репродуктивную способность составляющих популяции организмов. Однако рекомендации относительно дозовых нагрузок, не вызывающих негативных изменений морфологических, физиологических и генетических показателей в природных популяциях, в настоящее время отсутствуют.

В данной работе показано, что при хроническом облучении до 6.4 мкЗв · ч<sup>-1</sup> у красной японской сосны выявлен ряд морфологических изме-

нений. Обнаружено увеличение длины хвои на участке А, массы хвои – на большинстве участков. На площадке с максимальным уровнем радиоактивного загрязнения увеличен индекс флуктуирующей асимметрии длины хвои, характеризующий нарушение стабильности развития. Выявлена повышенная частота сильно пораженных некрозом хвоинок на большинстве радиоактивно загрязненных участков. Также обнаружено, что частота треххвойных брахибласт на одном из радиоактивно загрязненных участков на порядок превышает спонтанный уровень данного морфоза. Все это служит подтверждением того, что мощность дозы около 6 мкЗв · ч<sup>-1</sup> может рассматриваться как “пограничный” уровень безопасного воздействия на хвойные растения. Используемые подходы представляются перспективными для оценки и мониторинга состояния природных популяций, а также для оценки качества среды в условиях радиоактивного загрязнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Василевская Н.В., Тумарова Ю.М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Труды Карельского НЦ РАН. Серия Б. Биогеография Карелии. 2005. Вып. 7. С. 21–25.
- Гольцова Н.И. Влияние радиоактивного загрязнения на структурные особенности сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (ЧАЭС) // Чернобыль-90: Докл. 1-й междунар. конф. “Биологические и радиозоологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской АЭС”. (Зеленый Мыс, 10–18 сентября 1990 г.). Зеленый мыс: Ротапринт, 1990. Т. 1. С. 74–89.
- Горшкова Т.А., Удалова А.А., Гераськин С.А., Киселев С.М., Ахромеев С.В. Биоиндикация состояния природной среды в районе расположения Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. №4. С. 130–139.
- Драган Г.И., Драган Н.В., Левон Ф.М. Перспективы использования сосны обыкновенной как биоиндикатора на территории с низким уровнем радиоактивного загрязнения // Матер. Междунар. науч. конф. “Сахаровские чтения 2006 года: экологические проблемы XXI в.”. (Минск, 18–19 мая 2006 г.). Мн.: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2006. С. 206–208.
- Иванов В.П., Иванов Ю.В., Марченко С.И., Кузнецов В.В. Использование индексов флуктуирующей асимметрии листа березы повислой для диагностики состояния фитоценозов в условиях техногенного загрязнения // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 3. С. 368–377.
- Игонина Е.В., Федотов И.С., Короткевич А.Ю., Рубанович А.В. Морфологические аномалии у потомков облученных сосен (*Pinus sylvestris* L.) из чернобыльских популяций // Радиационная биология. Радиозоология. 2012. Т. 52. № 1. С. 90–102.
- Козубов Г.М. Радиобиологические исследования лесных древесных растений в районе аварии на Черно-

- быльской АЭС // Труды Коми НЦ УрО РАН. 1996. Т. 2. № 145. С. 4–18.
- Козубов Г.М., Муратова Е.Н. Современные голосеменные (морфолого-систематический обзор и кариология). Л.: Наука, 1986. 192 с.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. М.: НПЦ “Дизайн. Информация. Картография”, 2002. 256 с.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И. Особенности морфогенеза и ростовых процессов у хвойных растений в районе аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 2. С. 204–223.
- Козубов Г.М., Патов А.П., Кузин Е.А. Биометрические исследования вегетативных побегов сосны и ели при хроническом облучении // Труды Коми НЦ УрО РАН. 1993. № 127. С. 105–117.
- Молотковский Г.Х., Молотковский Ю.Г. Асимметрия, диссимметрия и полярность развития растений // Ботанический журн. 1961. Т. 46. № 4. С. 469–487.
- Неверова О.А., Колмогорова Н.И. К вопросу об устойчивости сосны обыкновенной в условиях урбанизированной среды // Материалы междунар. конф. “Антропогенное воздействие на лесные экосистемы”. (Барнаул, 18–19 апреля 2002 г.). Барнаул: Алтайск. гос. университета, 2002. С. 62–64.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
- Федотов И.С., Кальченко В.А., Игонина Е.В., Рубанович А.В. Радиационно-генетические последствия облучения популяции сосны обыкновенной в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46. № 3. С. 268–278.
- Хан Л.В. Морфологические изменения хвои сосны обыкновенной в условиях городской среды // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. информ. матер. междунар. науч.-техн. конф. “Лес-2000”. Брянск: РИО БГИТА, 2000. Вып. 1. С. 91–92.
- Храмова Е.П., Луговская А.Ю., Тарасов О.В. Оценка возможности использования *Potentilla fruticosa* L. (Rosaceae, Magnoliopsida) для биоиндикации состояния природной среды на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Поволжский экологический журн. 2019. № 1. С. 90–105.
- Экологический мониторинг: Учебно-методич. пособие / Под ред. Ашихминой Т.Я. М.: Академический проект, 2005. 416 с.
- Ahuja M.R., Neale D.B. Evolution of genome size in conifers // *Silvae Genetica*. 2005. V. 54. P. 126–137.
- Boratynska K., Boratynski A. Occurrence of three-needle dwarf shoots on European species of the genus *Pinus* (Pinaceae) // *Plant Biosystems*. 2006. V. 140. № 1. P. 21–26.
- Conger A.D., Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Klug E.E. Relation of nuclear volume and radiosensitivity to ploidy level (haploid to 22-ploid) in higherplants and a yeast // *Environmental & Experimental Botany*. 1982. V. 22. P. 57–74.
- Environmental risk from ionizing contaminants: assessment and management. Developed under EU 6th Framework Program. Contract No // ERICA. FI6R-CT-2004-508847. www.ERICA-project.org. 2003.
- ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Annals of the ICRP*. 2008. V. 38. P. 1–242.
- Kashparova E.A., Levchuk S., Morozova V., Kashparov V. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone // *J. Environmental Radioactivity*. 2018. V. 211. 105731.
- Kozlov M.V., Niemela P. Difference in needle length — a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Water, Air & Soil Pollution*. 1999. V. 116. P. 365–370.
- Kozlov M.V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Ecological Indicators*. 2002a. V. 1. P. 271–277.
- Kozlov M.V., Niemela P., Malkonen E. Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine // *Water, Air & Soil Pollution*. 2002b. V. 134. P. 307–318.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Study of needle morphometric indices in Scots pine in the remote period after the Chernobyl accident // *Radioprotection*. 2016. V. 51. P. 19–23.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Morphometric indices of Scots pine needle under chronic radiation exposure // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017a. V. 10. № 7. P. 761–769.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A. Morphometric measurements of Scots pine needles from radioactively contaminated area // In: XIII International Youth Scientific and Practical Conference “Future of atomic energy — Atom-Future 2017”, KnE Engineering. 2017b. P. 8–13.
- Møller A.P. Developmental instability of plants and radiation from Chernobyl // *Oikos*. 1998. V. 81. № 3. P. 444–448.
- Sparrow A.H., Woodwell G.M. Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation // *Radiation Botany*. 1962. V. 2. P. 9–26.
- Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Bottino P.J. The effects of external gamma radiation from radioactive fallout on plants with special reference to crop production // *Radiation Botany*. 1971. V. 11. P. 85–118.
- Watanabe Y., Ichikawa S., Kubota M., Hoshino J., Kubota Y., Maruyama K., Fuma S., Kawaguchi I., Yoschenko V.I., Yoshida S. Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. 13232.
- Yoschenko V.I., Nanba K., Yoshida S., Watanabe Y., Takase T., Sato N., Keitoku K. Morphological abnormalities in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) at the territories contaminated as a result of the accident at Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant // *J. Environmental Radioactivity*. 2016. V. 165. P. 60–67.

## Morphological Characteristics of Japanese Red Pine Needles from the Areas of the Accident at the Fukushima NPP

E. S. Makarenko<sup>1,\*</sup>, S. A. Geras'kin<sup>1</sup>, V. I. Yoschenko<sup>2</sup>, and M. A. Lychenkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Institute of Radiology and Agroecology, Kievskoe shosse, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032 Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Environmental Radioactivity of the Fukushima University, Kanayagawa, Fukushima City, Fukushima Prefecture 960-1296, Japan

\*E-mail: makarenko\_ek\_obninsk@mail.ru

The morphometric and morphological parameters of needles of Japanese red pine growing on the territories radioactively contaminated as a result of the accident at the Fukushima nuclear power plant were studied. Pine is a unique, widespread subject of research, which has a variety of informative and sensitive test systems at different levels of its organization. In 2019, the variability in weight and length was studied in two-year-old needles, the indices of fluctuating asymmetry were estimated, as well as the frequency of occurrence of necrosis and morphoses (three-needle brachyblasts) on four impact plots and one reference plot. The ambient dose equivalent rate varied at the radioactively contaminated areas from  $3.4 \pm 0.1$  to  $6.4 \pm 0.4 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  (in control –  $0.25 \pm 0.05 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ). No statistically significant correlation of the studied parameters of needles with the level of radiation exposure was found. The length of needles was significantly increased only at one impact plot, and the weights of needles – at the most plots that were exposed to radiation. The index of the fluctuating asymmetry by needle length at the plot with the highest dose significantly exceeded the control level. The index of the fluctuating asymmetry by needles weight at all impact plots did not differ significantly from the control. The frequency of needles severely affected by necrosis was significantly higher at most radioactively contaminated areas. Brachyblasts with three needles were found at all the study plots; at the most impact plots, their frequency was higher than at the control plot. Thus, even 8 years after the accident, some of the values of morphological and morphometric parameters in the populations in red Japanese pine growing on radioactively contaminated areas are significantly higher than the control level.

**Keywords:** Japanese red pine, chronic irradiation, needles, Fukushima accident.

**Acknowledgements:** This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (19-54-50003) and Japan Society for Promotion of Science (JSPS) (JPJSBP120194806) within the framework of the JSPS–RFBR Research Cooperative Program.

### REFERENCES

- Ahuja M.R., Neale D.B., Evolution of genome size in conifers, *Silvae Genetica*, 2005, Vol. 54, pp. 126–137.
- Ashikhmina T.Y., *Ekologicheskii monitoring* (Environmental monitoring), M.: Akademicheskii proekt, 2005, 413 p.
- Boratyńska K., Boratyński A., Occurrence of three-needle dwarf shoots on European species of the genus *Pinus* (Pinaceae), *Plant biosystems – an International journal dealing with all aspects of plant biology*, 2006, Vol. 140, No. 1, pp. 21–26.
- Conger A.D., Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Klug E.E., Relation of nuclear volume and radiosensitivity to ploidy level (haploid to 22-ploid) in higherplants and a yeast, *Environmental & Experimental Botany*, 1982, Vol. 22, pp. 57–74.
- Dragan G.I., Dragan N.V., Levon F.M., Perspektivy ispol'zovaniya sosny obyknovЕННОI kak bioindikatora na territorii s nizkim urovnem radioaktivnogo zagryazneniya (Perspective of the Scots pine as a biological indicator in areas of low extent of radioactive pollution), *Sakharov readings 2006: environmental problems of the 21 century*, Proc. Conf., Minsk, 18–19 May 2006, Minsk: Izd-vo MGEU imeni A.D. Sakharova, 2006, pp. 206–208.
- Environmental risk from ionizing contaminants: assessment and management. Developed under EU 6th Framework Program. Contract No // ERICA. FI6R-CT-2004-508847. www.ERICA-project.org. 2003.
- Fedotov I.S., Kal'chenko V.A., Igonina E.V., Rubanovich A.V., Radiatsionno-geneticheskie posledstviya oblucheniya populyatsii sosny obyknovЕННОI v zone avarii na ChAES (Radiation and genetic consequences of ionizing irradiation on population of *Pinus sylvestris* L. within the zone of the Chernobyl NPP), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2006, Vol. 46, No. 3, pp. 268–278.
- Gol'tsova N.I., Vliyanie radioaktivnogo zagryazneniya na strukturnye osobennosti sosny obyknovЕННОI *Pinus sylvestris* L. (ChAES) (Influence of radioactive contamination on the structural features of *Pinus sylvestris* L. (Chernobyl)), *Chernobyl'-90, Biological and radioecological aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl Atomic Electric Power Station*, Proc. of 1st International Conf., Zelenyi Mys, September 10–18, 1990, Zelenyi Mys: Rotaprint, 1990, Vol. 1, pp. 74–89.
- Gorshkova T.A., Udalova A.A., Geras'kin S.A., Kiselev S.M., Akhromeev S.V., Bioindikatsiya sostoyaniya prirodnoi sredy v raione raspolozheniya Dal'nevostochnogo tsentra po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami (Bioindication of the environment in the vicinity of the Far-Eastern center for radioactive waste treatment), *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2014, Vol. 4, pp. 130–139.
- Igonina E.V., Fedotov I.S., Korotkevich A.Y., Rubanovich A.V., Morfologicheskie anomalii u potomkov obluchennykh sosen (*Pinus sylvestris* L.) iz chernobyl'skikh populyatsii (Morphological abnormalities among the offspring of irradiated pines (*Pinus sylvestris* L.) from Chernobyl populations), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2012, Vol. 52, No. 1, pp. 90–102.

- Ivanov V.P., Ivanov Yu.V., Marchenko S.I., Kuznetsov V.V., Ispol'zovanie indeksov flukturniruyushchei assimetrii lista berezy povisloi dlya diagnostiki sostoyaniya fitotsenozov v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya (Application of fluctuating asymmetry indexes of silver birch leaves for diagnostics of plant communities under technogenic pollution), *Fiziologiya rastenii*, 2015, Vol. 62, No. 3, pp. 368–377.
- Kashparova E.A., Levchuk S., Morozova V., Kashparov V., A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone, *J. Environmental Radioactivity*, 2018, Vol. 211, 105731.
- Khan L.B., Morfologicheskie izmeneniya khvoi sosny obyknovnoy v usloviyakh gorodskoi sredy (Morphological changes in Scots pine needles in the urban environment), "Forest-2000", *Actual problems of the forestry complex*, Proc. of International Science and Technology Conf., Bryansk: RIO BGITA, Vol. 1, pp. 91–92.
- Khramova E.P., Lugovskaya A.Y., Tarasov O.V., Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya *Potentilla fruticosa* L. (*Rosaceae*, *Magnoliopsida*) dlya bioindikatsii sostoyaniya prirodnoi sredy na territorii Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda (Assessment of possible use of *Potentilla fruticosa* L. (*Rosaceae*, *Magnoliopsida*) for bioindication of the natural environment status in the area of the Eastern Ural radioactive trace), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2019, No. 1, pp. 90–105.
- Kozlov M.V., Niemelä P., Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, Vol. 116, No. 1, pp. 365–370.
- Kozlov M.V., Niemelä P., Junttila J., Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Ecological Indicators*, 2002a, Vol. 1, No. 4, pp. 271–277.
- Kozlov M.V., Niemelä P., Malkonen E., Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine, *Water, Air & Soil Pollution*, 2002, Vol. 134, pp. 307–318.
- Kozubov G.M., Muratova E.N., *Sovremennye golosemnyye (morfologo-sistematicheskii obzor i kariologiya)* (Modern gymnosperms (morphological-systematic review and karyology)), Leningrad: Nauka, 1986, 192 p.
- Kozubov G.M., Patov A.P., Kuzin E.A., Biometricheskie issledovaniya vegetativnykh pobegov sosny i eli pri khronicheskom obluchenii (Biometric studies of vegetative shoots of pine and spruce under chronic exposition), In: *Trudy Komi NTs UrO RAN* (Proceedings of Komi research center, Uralian branch of the Russian academy of sciences), 1993, Vol. 130, pp. 105–117.
- Kozubov G.M., Radiobiologicheskie issledovaniya lesnykh drevesnykh rastenii v raione avarii na Chernobyl'skoi AES (Radiobiological studies of forest woody plants in the area of the accident at the Chernobyl Atomic Electric Power Station), *Trudy Komi NTs UrO RAN*, 1996, Vol. 2, No. 145, pp. 4–18.
- Kozubov G.M., Taskaev A.I., Osobennosti morfogeneza i rostovykh protsessov u khvoinykh rastenii v raione avarii na ChAES (The features of morphogenesis and growth processes of conifers in the Chernobyl nuclear accident zone), *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2007, Vol. 47, No. 2, pp. 204–223.
- Kozubov G.M., Taskaev A.I., *Radiobiologicheskie issledovaniya khvoinykh v raione Chernobyl'skoi katastrofy (1986–2001 gg.)* (Radiobiology investigations of conifers in region of the Chernobyl disaster (1986–2001)), Moscow: Dizain. Informatsiya. Kartografiya, 2002, 271 p.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Morphometric indices of Scots pine needle under chronic radiation exposure, *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 761–769.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Morphometric measurements of Scots pine needles from radioactively contaminated area, "Future of atomic energy – Atom-Future 2017", Proc. XIII International Youth Scientific and Practical Conf., KnE Engineering, pp. 8–13.
- Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Study of needle morphometric indices in Scots pine in the remote period after the Chernobyl accident, *Radioprotection*, 2016, Vol. 51, No. 1, pp. 19–23.
- Møller A.P., Developmental instability of plants and radiation from Chernobyl, *Oikos*, 1998, Vol. 81, No. 3, pp. 444–448.
- Molotkovskii G.K., Molotkovskii Y.G., Asimetriya, dissimetriya i polyarnost' razvitiya rastenii (Assymmetry, dissymmetry and polarity of plant development), *Botanicheskii zhurnal*, 1961, Vol. 46, No. 4, pp. 469–487.
- Neverova O.A., Kolmogorova N.I., K voprosu ob ustoichivosti sosny obyknovnoy v usloviyakh urbanizirovannoi sredy (To the question of the stability of Scots pine in an urbanized environment), *Anthropogenic impact on forest ecosystems*, Proc. of International Conf., Barnaul, April 18–19, 2002, Barnaul: Altaisk. gos. universiteta, 2002, pp. 62–64.
- Pentreath R.J., Larsson C.-M., Higley K.A., Brechignac F., Doi M., Pröhl G., Johnston A., Real A., Sakai K., Strand P., ICRP publication 108 – Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants, *Annals of the ICRP*, 2008, Vol. 38, No. 4–6, pp. 1–242.
- Sarapul'tsev B.I., Geras'kin S.A., *Geneticheskie osnovy radiorezistentnosti i evolyutsiya* (The genetic basis of radioreistance and evolution), Moscow: Energoatomizdat, 1993, 208 p.
- Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Bottino P.J., The effects of external gamma radiation from radioactive fallout on plants with special reference to crop production, *Radiation Botany*, 1971, Vol. 11, pp. 85–118.
- Sparrow A.H., Woodwell G.M., Prediction on the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation, *Radiation Botany*, 1962, Vol. 2, No. 1, pp. 9–26.
- Vasilevskaya N.V., Tumarova Y.M., Otsenka stabil'nosti razvitiya populyatsii *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya (Murmanskaya oblast') (Assessment of the development stability of *Pinus sylvestris* L. populations under conditions of airborne industrial pollution (Murmansk region)), *Trudy Karel'skogo NTs RAN. Seriya B. Biogeografiya Karelii*, 2005, Vol. 7, pp. 21–25.
- Watanabe Y., Ichikawa S., Kubota M., Hoshino J., Kubota Y., Maruyama K., Fuma S., Kawaguchi I., Yoschenko V.I., Yoshida S., Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Scientific Reports*, 2015, Vol. 5, 13232.
- Yoschenko V.I., Nanba K., Yoshida S., Watanabe Y., Takase T., Sato N., Keitoku K., Morphological abnormalities in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) at the territories contaminated as a result of the accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *Journal Environmental Radioactivity*, 2016, Vol. 165, pp. 60–67.

УДК 630\*181(182.5)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ПРИАНГАРЬЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. С. К. Фарбер<sup>а</sup>, \*, Н. С. Кузьмик<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Академгородок, 50, стр. 28, Красноярск, 660036 Россия

\*E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 14.06.2018 г.

После доработки 24.03.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Потенциальная продуктивность древостоев рассматривается в зависимости от лесорастительных условий. Формируются множественные уравнения регрессии. Исходная информация – материалы лесоустройства и данные цифровой модели рельефа. В качестве зависимой переменной используется класс бонитета. В качестве аргументов принимаются характеристики теплообеспеченности, влажности местоположений и плодородия почв. Теплообеспеченность местоположений рассматривается как производное от показателей рельефа. Показатели влажности местоположений и плодородия почв конструируются на основе лесотаксационных описаний. Вне зависимости от категории земель каждый таксационный выдел получает как дополнительные характеристики, так и возможность последующего расчета потенциальной продуктивности древостоев. Выявлено, что вертикальный градиент температуры значимо отражается на представленности пород деревьев, но практически не влияет на продуктивность древостоев. Достоверное снижение класса бонитета по мере набора высоты наблюдается только у сосновых и еловых древостоев. Влияния экспозиции, величины уклона и кривизны поверхности на продуктивность древостоев не прослеживается. Напротив, выявлено наличие статистически значимой связи продуктивности древостоев с типами леса (влажностью местоположений) и типами почв (почвенным лесным плодородием). Демонстрируются карты потенциальной продуктивности сосновых, лиственничных, кедровых и еловых древостоев.

*Ключевые слова:* потенциальная продуктивность древостоев, рельеф и теплообеспеченность местоположений, тип леса, класс бонитета, влажность и плодородие почв.

DOI: 10.31857/S0024114821020030

В развитии лесного комплекса различают экстенсивный, интенсивный и переходный периоды (Петров и др., 1986). В регионах Сибири, где преобладают спелые и перестойные насаждения, в основном продолжается период экстенсивного освоения и потребления лесных ресурсов. Поскольку хозяйственное освоение лесов протекает территориально неравномерно, экономическая ситуация на отдельных территориях существенно различается. В экономически доступных районах южной тайги Сибири в результате длительной и интенсивной (начиная с 60-х годов XX в.) лесоэксплуатации, а также естественных причин (пожары и болезни леса) состояние лесосечного

фонда существенно ухудшилось. Нехватка древесных ресурсов объективно определяет экономическую ситуацию, при которой становится неизбежен переход к интенсивному развитию лесного комплекса. В частности, к таким территориям относятся лесные районы Приангарья. Здесь, на арендных участках лесозаготовительных предприятий уже обозначилось стремление к переходу на интенсивные методы хозяйствования. Принцип постоянства и неистощительности пользования лесом при этом должен неукоснительно выполняться. В противном случае неизбежен возврат к формам экстенсивного хозяйства, но перспективы поиска и последующей аренды дополнительных лесных массивов становятся все более проблематичными.

На вырубках и гарях лесовосстановление зачастую происходит со сменой на лиственные породы или задерживается на длительный период (Фарбер, 2000). Значимой составляющей периода интенсивного развития лесного хозяйства явля-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках фундаментального научного исследования по Программе СО РАН VI.52.2. “Лесные экосистемы Сибири: адаптивный потенциал биосферных и ресурсных функций при различных сценариях климатических и антропогенных воздействий” (0356-2017-0738, номер госрегистрации АААА-А17-117101940014-9).

ется своевременное лесовосстановление на не покрытых лесом землях и выращивание целевых древостоев определенного породного состава и продуктивности. При выполнении этого условия будет достигаться и непрерывное продуцирование древесного ресурса. В настоящее время проектные решения о проведении тех или иных лесовосстановительных мероприятий принимаются по факту наличия погибших насаждений, вырубок и выделов. Материалы лесоустройства содержат необходимую для проектирования информацию. Однако определение целевой древесной породы не имеет достаточного научного обоснования. На участках потенциально могут произрастать различные по породному составу древостои, а целевая порода определяется произвольно. Наличие дополнительной информации о связи продуктивности пород деревьев с лесорастительными условиями по отдельным таксационным выделам поможет избежать субъективности выбора.

Современные методы обработки данных предоставляют дополнительные возможности моделирования и пространственного анализа. В полной мере это относится к показателям рельефа и данным лесоустройства, в том числе применительно к оценке лесорастительных условий. Появляется возможность выявления потенциальной продуктивности древесных пород вне зависимости от категории земель. Цель работы – определение и картографирование потенциальной продуктивности (классов бонитета) древесных пород, в том числе на не покрытых лесом землях.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исходные материалы:

- данные массовой таксации – 1765 описаний таксационных выделов;
- ЦМР (тестовый участок расположен в пределах трапеции SRTM 56-01);
- схема типов леса и нелесных сообществ.

Число лесотаксационных выделов сосновых древостоев составило 219, лиственных – 731, кедровых – 478, еловых – 93.

Тип леса характеризует лесорастительные условия (комплекс климатических, орографических, гидрологических и почвенных факторов) на качественном уровне. В качестве количественного измерителя продуктивности древостоя используется класс бонитета, зависящий от лесорастительных условий (Лесное хозяйство ..., 2002). Совместное рассмотрение типа леса и класса бонитета считается взаимодополняющей качественной и количественной оценкой продуктивности древостоев и лесорастительных условий.

Продуктивность древостоев определяется посредством многофакторных регрессионных уравнений. В качестве функции принимается класс бони-

тета. Значения классов бонитета кодируются посредством порядковых чисел. Классы бонитета Va и Vb кодируются значениями 6 и 7. В качестве аргументов принимаются показатели лесорастительных условий, проверенные на наличие связи с продуктивностью древостоев. Основные факторы, влияющие на рост и состояние насаждений, – теплообеспеченность местоположений, степень их увлажнения, а также почвенное плодородие. Для формирования регрессионных уравнений использован программный пакет STATISTICA. Уровень значимости принят равным 0.95. Результаты количественной оценки лесорастительных условий и расчетов потенциальной продуктивности древостоев вносятся в соответствующие поля атрибутивной таблицы ГИС, что определяет возможность их последующего картографирования.

**Оценка продуктивности древостоев по показателям рельефа (теплообеспеченности местоположений).** Пространственный анализ рельефа проведен средствами ГИС (ArcGIS, модуль Spatial Analyst). Рассматриваются показатели, которые можно получить посредством анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) (абсолютная высота, экспозиция, уклон, кривизна поверхности). Использована ЦМР в виде данных матрицы SRTM (Kargel, Ewiak, 2008). Погрешности ЦМР, возникающие за счет наличия растительного покрова, не учитываются. Приняты следующие градации показателей рельефа: *H* (абсолютная высота) – интервал 30 м; *Asp* (экспозиция) – интервал 30°; *Sl* (уклон) – интервал 2°; *Cur* (кривизна поверхности) – интервал 0.3 единиц кривизны.

Полученным интервалам показателей рельефа присвоены индексы в виде порядковых чисел. При формировании уравнений необходимо также учитывать особенности влияния экспозиции. Поскольку симметричные относительно оси “север–юг” местоположения (западные и восточные) в действительности получают одинаковое количество тепла, последовательное увеличение индекса экспозиции будет методически неверно. Чтобы избежать необходимости формирования отдельных уравнений для склонов северных и южных экспозиций, румбам, симметричным относительно направления “север–юг”, присвоен одноименный индекс экспозиции. Плоские местоположения занимают промежуточное положение.

Характеристики растительного покрова находятся в зависимости от годовой суммы активных температур (Поликарпов и др., 1986; Седельников и др., 2005). Перераспределение тепла, поступающего к поверхности Земли, связано с показателями рельефа и происходит по следующим закономерностям:

- по мере увеличения абсолютной высоты выражена тенденция уменьшения температуры;

– южные склоны прогреваются сильнее северных;

– увеличение крутизны южного склона повышает, а северного, напротив, понижает количество тепла;

– изменение температуры в зависимости как от высот местности, так и величин уклонов непрерывно и прямолинейно.

При выявлении сопряженности характеристик лесного покрова с лесорастительными условиями количество тепла можно заменить показателями рельефа местности (Фарбер и др., 2017). Таким образом, теплообеспеченность местоположений определяется опосредованно, через показатели рельефа. При этом следует признать, что адекватность такого рода замены оценить вряд ли возможно. При наличии связи формируется уравнение регрессии  $B_r = f(H, Asp, SI)$ , где  $B_r$  – класс бонитета древостоя, зависящий от характеристик рельефа (теплообеспеченности местоположений).

**Оценка продуктивности древостоев по индексу влажности местоположений.** Степень увлажнения местоположений определяется в экспертном порядке. По описанию лесотаксационных выделов производится их сопоставление, с получением ранжированного по влажности ряда типов леса. Оценка комплексная, анализируется таксационное описание выдела и данные макета дополнительных сведений. Информация для анализа – тип леса, породный состав, класс бонитета, почва (название, механический состав, степень влажности). По отношению к типам леса принимается последовательное увеличение порядкового номера в ряду от сухих к более увлажненным местоположениям. Порядковый номер в ряду отождествляется с индексом влажности почв (Фарбер и др., 2017).

Индекс влажности определяется для всех лесотаксационных выделов. Для погибших насаждений влажность выявляется в сравнении с выделами, занимающими аналогичные местоположения (Фарбер, 1997). Далее индекс влажности используется в качестве независимой переменной в уравнениях регрессии продуктивности древесных пород. Общий вид уравнений  $B_w = f(W)$ , где  $W$  – порядковый номер в ранжированном ряду влажности почв,  $B_w$  – класс бонитета, зависящий от влажности местоположений.

**Оценка продуктивности древостоев по показателю плодородия почв.** Содержание питательных веществ, кислотность, степень влажности отличаются по видам почв. По отношению к древесным породам обобщенной характеристикой почв является их плодородие. Таксационные показатели насаждений зависят от лесорастительных условий и поэтому в определенной степени характеризуют в том числе и плодородие почв. Можно допустить, что верно и обратное: плодородие может оцениваться (измеряться) посредством лесотаксацион-

ных показателей. Принимается, что класс бонитета древостоя – производное лесорастительных условий, в перечень которых входит в том числе плодородие лесных почв. Можно записать:  $B_s = f(S)$ , где  $B_s$  – класс бонитета древостоя, зависящий от плодородия почв;  $S$  – показатель лесорастительных условий (в том числе плодородия почв). Класс бонитета древостоя и наименование (тип) почвы фигурируют в описании таксационного выдела в качестве характеристик. Для получения зависимости  $B_s = f(S)$  остается определиться с конструкцией показателя лесорастительных условий.

Возможность сравнения появляется при использовании заранее оговоренной линии отсчета. В качестве показателя лесорастительных условий ранее было предложено отношение  $d/d_0$ , где  $d_0 = f(h)$ ;  $d, h$  – диаметр и высота главной породы древостоя;  $d_0$  – значение диаметра на линии уравнения, соответствующее значению высоты  $h_0$  (Фарбер, 1997, 2000). Вообще же преимущество за показателем, варьирующим менее других. Поэтому в качестве измерителя лесорастительных условий лучше использовать не отношение диаметров  $d/d_0$ , а отношение высот  $h/h_0$ . Тогда в качестве линии отсчета будет выступать усредненная линия роста по высоте (уравнение регрессии  $h_0 = f(A)$ , где  $A$  – возраст древостоя, лет). Посредством введения дополнительного аргумента точность оценки  $h_0$  повышается. По признаку наименьшего варьирования в качестве дополнительного аргумента используется диаметр. Тогда  $h_0 = f(d, A)$ , при этом началом отсчета будет уже не линия, а плоскость.

Последовательность оценки продуктивности древостоев по индексу плодородия почв:

– получение для древесных пород уравнений регрессии  $h_0 = f(d, A)$ ;

– вычисление значений индексов плодородия почв  $S = h/h_0$ , с внесением в атрибутивную таблицу ГИС;

– вычисление для древесных пород и типов почв средних значений индексов плодородия почв  $S_i = \sum S/n$ ;

– вычисление общего для всех пород деревьев и типов почв средневзвешенных значений индексов плодородия почв  $S_0 = \sum(S_i n_i)/N$ , где  $N = \sum n_i$ ;

– получение для древесных пород уравнений регрессии  $B_s = f(S_0)$ .

**Оценка продуктивности древостоев по показателю рельефа (теплообеспеченности), влажности и плодородия.** Формируются многофакторные уравнения регрессии. В качестве предикторов используются значения  $B_r, B_w, B_s$  таксационных выделов. Общий вид зависимости  $B_0 = f(B_r, B_w, B_s)$ , где  $B_0$  – класс бонитета, зависящий от показателей рельефа (теплообеспеченности), влажности и плодородия местоположений.

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

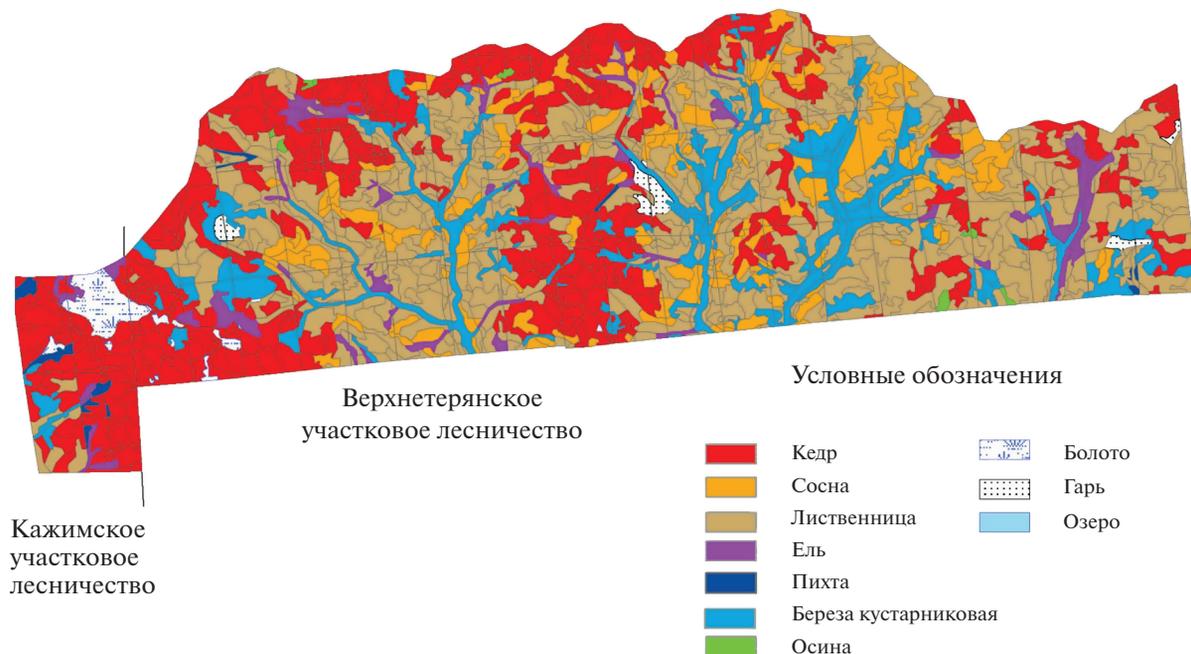


Рис. 1. Фрагмент плана лесонасаждений тестового участка.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тестовый участок расположен в Красноярском Приангарье на территории Терянского лесничества (Верхнетеряньское участковое лесничество, кварталы 1–53 и Кажимское участковое лесничество, кварталы 93, 94, 118, 119) (рис. 1). Лесоустройство Терянского лесничества проводилось в 2005 г. по 3-му разряду. На севере тестовый участок по линии водораздела Ангары и Подкаменной Тунгуски граничит с Байкитским лесничеством Эвенкии. Здесь расположены истоки рек и ручьев, впадающие в Ангару с севера, из них наиболее крупные – Верхняя Теря и Микчанда. Абсолютные высоты изменяются от 340 м на юге до 700 м на севере. Общий перепад абсолютных высот составляет 360 м. Средний уклон равен  $3.6^\circ$  ( $\sigma = \pm 2.3^\circ$ ).

На тестовом участке явно выделяется 200-летняя и более генерация перестойных древостоев. Меньшая часть древостоев представлена возрастом 70–80 лет. Повторяемость пожаров и продолжительность межпожарных интервалов характеризует пирологические режимы природных комплексов, влияющие на процессы лесообразования (Фуряев, 1996). Наличие в пределах тестового участка четко обособленных возрастных генераций древостоев, позволяет предположить широкое распространение лесных пожаров в годы, предшествующие массовому лесовосстановлению. Породный состав древостоев, лесотипологическая структура и пространственное размеще-

ние связаны с особенностями почвенно-грунто-вых условий верхней части южного макросклона бассейна Ангары. Поймы рек и ручьев заболочены и заняты ерниками. Ельники распространены незначительно и приурочены к подножиям холмов. Сосняки занимают более сухие местоположения в основном на выпуклых водоразделах, средних и верхних частях склонов. На тестовом участке преобладают лиственничники и кедровники. Доля пихтовых насаждений незначительна.

**Зависимость продуктивности древостоев от рельефа (теплообеспеченности).** В результате пространственного анализа рельефа тестового участка для таксационных выделов получены значения  $H$ ,  $Asp$ ,  $Sl$ ,  $Cur$ . Теснота связи оценивается посредством коэффициента корреляции Пирсона  $R$ . Считается, что при  $|R| \leq 0.25$  корреляция слабая,  $0.25 \leq |R| \leq 0.75$  – умеренная,  $|R| > 0.75$  – сильная (Реброва, 2003).

Рельеф тестового участка – равнинный, местами всхолмленный, что характерно и в целом для территории Приангарья. Оказалось, что корреляция классов бонитета древостоев с показателями рельефа в основном отсутствует. Умеренная корреляция наблюдается только с абсолютной высотой у сосняков и ельников (табл. 1). Для них с увеличением абсолютной высоты местности класс бонитета снижается. Кедр и лиственница – породы деревьев, адаптированные как к теплым, так и холодным климатическим условиям. Полагаем, именно поэтому перепад абсолютных высот на

**Таблица 1.** Линейная корреляция классов бонитета с показателями рельефа

Древостой	$R_H/p$	$R_{Asp}/p$	$R_{Sl}/p$	$R_{Cur}/p$
Сосняк	0.293/0.000	-0.028/0.683	-0.091/0.182	-0.039/0.565
Лиственничник	-0.105/0.005	0.084/0.023	-0.032/0.387	-0.249/0.501
Кедровник	0.067/0.146	0.062/0.173	-0.117/0.011	0.121/0.008
Ельник	0.284/0.006	-0.121/0.250	0.043/0.679	0.125/0.234

Примечание. Числитель – коэффициенты корреляции:  $R_H$  – корреляция высоты,  $R_{Asp}$  – корреляция экспозиции,  $R_{Sl}$  – корреляция уклона,  $R_{Cur}$  – корреляция кривизны поверхности; знаменатель – уровень достоверности  $p$ -level.

**Таблица 2.** Распределение типов леса по влажности почв

Древостой	Влажность почв, индекс											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосняк	лш	лшбр	брзм	брос, бррт	ос, ртос	чзм						
Лиственничник					брзм, брос, бррт	ос, ртос	чзм	хвв, хвзм	осдм	бгол		
Кедровник						бррт, брос, брзм	ртос, ос	чзм	хвзм	осдм	бгол	бгсф
Ельник							бррт	ртос	хвв, хвзм	осдм	бгол	бгсф
Пихтарник								ртос, ос	хвзм	осдм		
Березняк			брзм	бррт	ртос	ос	чзм	хвзм	осдм	бгол		
Осинник						ос	чзм					

Примечание. лш – лишайниковый, лшбр – лишайниково-брусничный, брзм – бруснично-зеленомошный, бррт – бруснично-разнотравный, ос – осочковый, брос – бруснично-осочковый, ртос – разнотравно-осочковый, чзм – чернично-зеленомошный, хвв – хвощово-вейниковый, хвзм – хвощово-зеленомошный, осдм – осочково-долгомошный, бгол – багульниково-ольховниковый, бгсф – багульниково-сфагновый.

тестовом участке на продуктивности кедровников и лиственничников заметно не сказывается.

Ориентируясь на значения коэффициентов корреляции из показателей рельефа в качестве предиктора, в уравнениях выбирается  $H$ , и только для сосновых и еловых древостоев. Получены уравнения регрессии:

$$- \text{сосняки} - B_r = 3.242 + 0.013H^2 (R^2 = 0.181);$$

$$- \text{ельники} - B_r = 3.992 + 0.098H (R^2 = 0.081).$$

Оказалось, что влияние всхолмленного рельефа на перераспределение тепла незначительно, и различие в теплообеспеченности местоположений не настолько велико, чтобы статистически значимо влиять на продуктивность древесных пород. Можно ожидать, что с увеличением крутизны склонов и перепадов абсолютных высот теплообеспеченность отдельных местоположений будет различаться сильнее.

**Зависимость продуктивности древостоев от индекса влажности.** В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий – типа леса (табл. 2).

Связь продуктивности древостоев с индексом влажности местоположений описывается уравнениями:

$$- \text{сосняки} - B_w = 5.804 - 1.073W + 0.116W^2 (R^2 = 0.136);$$

$$- \text{лиственничники} - B_w = 6.004 - 0.920W + 0.068W^2 (R^2 = 0.164);$$

$$- \text{кедровники} - B_w = 6.234 - 0.543W + 0.033W^2 (R^2 = 0.028);$$

$$- \text{ельники} - B_w = 0.905 + 0.351W (R^2 = 0.436).$$

Теснота связи влажности местоположений с продуктивностью сосновых, лиственничных и еловых древостоев умеренная, с продуктивностью кедровых – слабая.

Насаждения тестового участка произрастают при определенной влажности. Сосняки занимают местоположения с баллами влажности от 1 до 7; лиственничники – от 5 до 10; кедровники – от 6 до 12; ельники – от 7 до 12. Еще более влажные местоположения занимают заболоченные кустарники. Получается, что влажность лимитирует возможность произрастания пород деревьев, и

этот факт далее используется при картографировании потенциальной продуктивности древесных пород. Так, местоположения с баллами влажности 1–6, II и более в качестве потенциально возможных для произрастания лиственницы выпадают.

Зависимость продуктивности древостоев от показателя плодородия почв.

Для древесных пород получены следующие уравнения регрессии вида  $h_0 = f(d, A)$ :

$$\text{– сосняки – } h_0 = -0.842 + 1.264d - 0.017d^2 \quad (R^2 = 0.761);$$

$$\text{– лиственничники – } h_0 = 1.387 + 0.020A + 1.037d - 0.013d^2 \quad (R^2 = 0.601);$$

$$\text{– кедровники – } h_0 = 5.106 + 0.708d - 0.007d^2 \quad (R^2 = 0.268);$$

$$\text{– ельники – } h_0 = 0.431 + 1.188d - 0.014d^2 \quad (R^2 = 0.895).$$

На основе уравнений  $h_0 = f(d, A)$  рассчитаны значения  $S = h/h_0$  и внесены в дополнительное поле атрибутивной таблицы таксационных выделов. Далее последовательно рассчитаны показатели лесорастительных условий  $S_i$  и  $S_0$  (табл. 3). Показатель  $S_i$  относится к одному наименованию почвы для  $i$ -й древесной породы. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе  $S_i$  возможна только для таксационных выделов  $i$ -й древесной породы. Показатель  $S_0$  относится ко всем древесным породам. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе  $S_0$  уже возможна на основании наименования почвы для всех таксационных выделов, включая выделы лиственных древостоев (березняки и осинники), выделы погибших насаждений, вырубки.

Уравнения регрессии вида  $B_s = f(S_0)$  получены по данным классов бонитета древостоев и показателям почвенного плодородия  $S_0$  таксационных выделов:

$$\text{– сосняки – } B_s = -13.764 - 31.597S^2 + 48.890S \quad (R = 0.513, R^2 = 0.263);$$

$$\text{– лиственничники – } B_s = 50.597 - 87.021S + 39.459S^2 \quad (R = 0.412, R^2 = 0.170);$$

$$\text{– кедровники – } B_s = -10.202 - 21.751S^2 + 36.063S \quad (R = 0.321, R^2 = 0.103);$$

$$\text{– ельники – } B_s = 240.110 - 467.974S + 232.201S^2 \quad (R = 0.378, R^2 = 0.143).$$

Плодородие почв возрастает от сухих к дренированным и от переувлажненных заболоченных почв к дренированным. Более производительные древостои произрастают на дренированных почвах, влажность которых оптимальна. В пределах тестового участка различие в механическом составе почв значимо не сказывается на продуктив-

ности разнотравных и зеленомошных древостоев. Здесь почвы безотносительно к древесным породам более плодородные. При натурной таксации предоставляется возможность непосредственного наблюдения обнажившихся по ряду причин почвенных горизонтов, что позволяет диагностировать тип почвы. При дешифровочной таксации описание почв основано на косвенных признаках. Однако несмотря на очевидную субъективность оценок почвенных описаний, на тестовом участке наблюдается наличие статистически значимой связи таксационных показателей древостоев с типами почв. Можно предположить, что реальная взаимосвязь еще более высокая.

**Общая зависимость продуктивности древостоев от показателей рельефа, индексов влажности и показателей плодородия.** Получены следующие уравнения вида  $B_0 = f(H, W, S_0)$ :

$$\text{– сосняки – } B_0 = 7.910 - 7.470S_0^2 + 0.092H - 0.176W^2 + 1.422W \quad (R^2 = 0.387);$$

$$\text{– лиственничники – } B_0 = 69.119 - 124.701S_0 - 0.005H^2 + 60.779S_0^2 + 0.063H + 0.050W^2 - 0.704W \quad (R^2 = 0.217);$$

$$\text{– кедровники – } B_0 = -4.599 - 15.368S_0^2 + 0.015H^2 - 0.203H + 23.446S_0 + 0.285W - 0.016W^2 \quad (R^2 = 0.130);$$

$$\text{– ельники – } B_0 = 91.285 - 0.566W - 165.140S_0 + 0.007H^2 + 79.359S_0^2 + 0.043W^2 \quad (R^2 = 0.540).$$

Таким образом, потенциальная производительность древостоев зависит в основном от влажности местоположений и почвенного плодородия. Значимость показателей рельефа незначительна. Линейная корреляция наблюдается только с абсолютной высотой местности. Согласно полученным зависимостям, потенциальная продуктивность древесных пород меняется синхронно. На лучших по режиму увлажнения и плодородию почвах на прогреваемых участках могут произрастать более производительные древостои. В пределах тестового участка наблюдается увеличение показателя  $B_0$  в южном направлении (по мере снижения абсолютной высоты местности). Поймы рек, ручьев заболочены и заняты кустарниками. Выровненные террасы и нижние вогнутые части склонов с глубокими дренированными почвами для древостоев хвойных пород благоприятны. Древесные породы приурочены к определенным местоположениям, что является следствием различного отношения к факторам среды. Ведущее значение имеют особенности форм рельефа, гидрологического режима, плодородия почв. Кедровые насаждения адаптированы к более высоким водораздельным пространствам и нижним частям склонов, ельники – к долинам рек; сосняки произрастают на песчаных и супесчаных почвах. При этом достаточ-

Таблица 3. Распределение  $S_i$  и  $S_0$  по наименованиям почв

Название почвы	Древесная порода												$S_0$
	сосна			лиственница			кедр			ель			
	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	
Перегнойная, иловато-глеевая, легкосуглинистая, влажная				4	3.25	1.05	2	4.00	1.10	35	3.71	1.00	1.01
Дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая, свежая	69	3.48	1.00	345	3.03	1.00	74	4.03	1.00	3	4.33	0.96	1.00
Перегнойная, подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная										6	4.67	0.99	0.99
Слабоподзолистая, легкосуглинистая, влажная	1	3.00	1.03	4	3.00	1.04	339	4.13	1.00	13	4.92	1.00	1.00
Слабооподзоленная, легкосуглинистая, сырая				1	4.00	0.88	10	4.30	0.95	1	5.00	0.92	0.94
Торфянисто-подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная				34	3.66	0.94	1	5.00	0.83	10	5.00	0.98	0.95
Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, сырая										8	5.00	1.01	1.01
Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, влажная										9	5.00	1.00	1.00
Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, сырая										2	5.00	1.05	1.05
Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, влажная										6	5.00	1.05	1.05
Оподзоленная, легкосуглинистая, свежая							13	3.62	1.05				1.05
Оподзоленная, легкосуглинистая, влажная							3	3.67	1.07				1.07
Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, свежая	136	3.55	1.01	312	3.03	1.00	3	4.00	1.04				1.00
Торфянистая, легкосуглинистая, сырая							4	4.00	0.99				0.99
Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, влажная				4	3.25	0.95	3	4.33	0.97				0.96
Слабооподзоленная, легкосуглинистая, свежая							10	4.40	0.98				0.98
Торфянистая, легкосуглинистая, влажная							11	4.64	0.89				0.89
Дерново-слабооподзоленная, легкосуглинистая, влажная				7	3.86	0.91	5	4.80	0.90				0.91
Дерново-оподзоленная, легкосуглинистая, влажная				18	2.94	1.03							1.03
Торфяно-подзолисто-глеевая, легкосуглинистая, сырая				1	4.00	0.91							0.91
Торфяно-перегнойно-глеевая, легкосуглинистая, влажная				1	4.00	0.96							0.96
Дерново-черноземовидная, легкосуглинистая, свежая	2	3.00	1.05										1.05
Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, свежая	2	4.50	0.90										0.90
Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, сухая	7	4.86	0.89										0.89
Мелкоземная, каменистая, среднесуглинистая, сухая	2	5.00	0.80										0.80

Примечание.  $B_{cp}$  – средний класс бонитета;  $S_i$  – среднее значение отношения  $h/h_0$  для древесной породы;  $S_0$  – общее для древесных пород средневзвешенное значение отношения  $h/h_0$ .

Эвенкийский автономный округ (Байkitское лесничество)

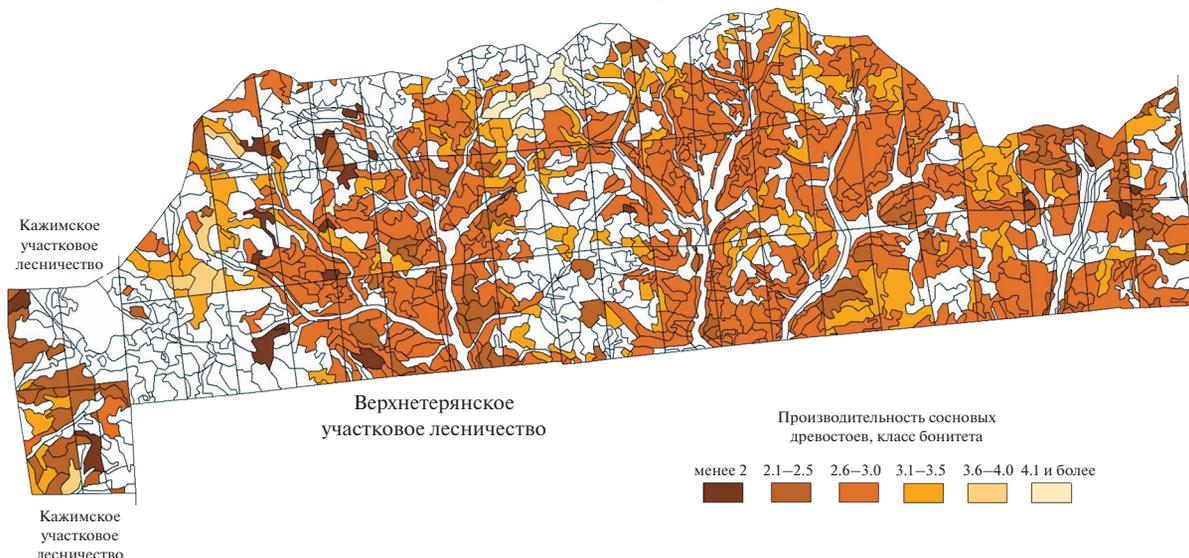


Рис. 2. Потенциальная продуктивность сосновых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

но широкому диапазону лесорастительных условий отвечают древостои разных пород. Именно это обстоятельство и позволяет выбирать целевую породу для определенного участка.

Картографирование потенциальной продуктивности древостоев  $B_0$  произведено по значени-

ям полей атрибутивной таблицы ГИС (табл. 4, рис. 2–5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что оценка и картографирование потенциальной продуктивности древесных пород

Таблица 4. Данные атрибутивной таблицы ГИС таксационных выделов Верхнеретянского участкового лесничества (фрагмент)

Показатели таксационного выдела					Лесорастительные условия, индекс			Потенциальная продуктивность древостоев $B_0$ , класс бонитета			
тип леса	$A$	$h$	$d$	$B$	$H$	$W$	$S_0$	сосна	лиственница	кедр	ель
Лбрзм	230	24	32	3	2	5	1	3.3	3.0		
Сртос	200	21	28	4	7	5	1	3.8	3.1		
Косдм	220	21	32	4	7	10	1		3.3	4.1	4.5
БКСоссф											
Лос	190	24	36	3	3	6	1	2.9	2.9	4.1	
Кчзм	190	19	24	4	5	8	1.05		2.9	3.7	3.8
Лос	240	25	40	3	6	6	1	3.2	3.0	3.9	
Лос	210	24	32	3	6	6	1	3.2	3.0	3.9	
Бос	70	16	14		9	6	1	3.5	3.0	4.0	
Лбгол	210	20	22	4	3	10	0.95		3.6	4.6	4.7
Ебгсф	170	18	18	5	4	12	1.01			4.0	5.0
Лбрзм	230	24	36	3	7	5	1	3.8	3.1		
Лос	230	25	36	3	7	6	1	3.3	3.0	3.9	

Примечание. Лбрзм – лиственничник бруснично-зеленомошный, Сртос – сосняк разнотравно-осочковый, Косдм – кедрчак осочково-долгомошный, БКСоссф – береза кустарниковая осочково-сфагновая, Лос – лиственничник осочковый, Кчзм – кедрчак чернично-зеленомошный, Бос – березняк осочковый, Лбгол – лиственничник багульниково-голубничный, Ебгсф – ельник багульниково-сфагновый.  $A$  – возраст, лет;  $h$  – высота, м;  $d$  – диаметр, см;  $B$  – класс бонитета;  $H$  – абсолютная высота,  $W$  – порядковый номер в ранжированном ряду влажности почв;  $S_0$  – показатель лесорастительных условий.

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

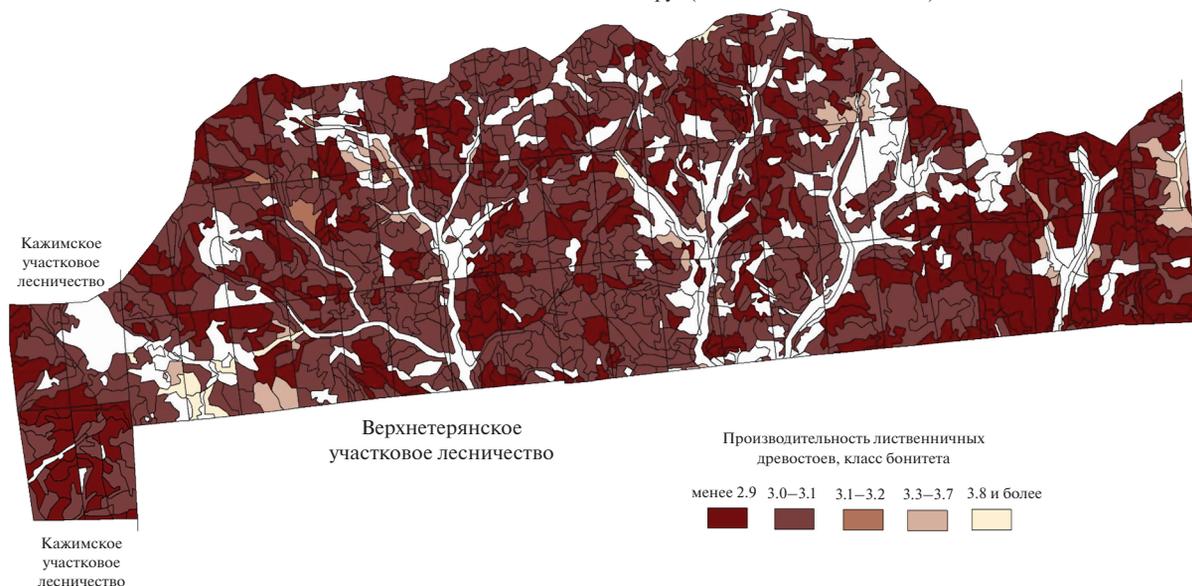


Рис. 3. Потенциальная продуктивность лиственных древостоев. Масштаб 1 : 150000.

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

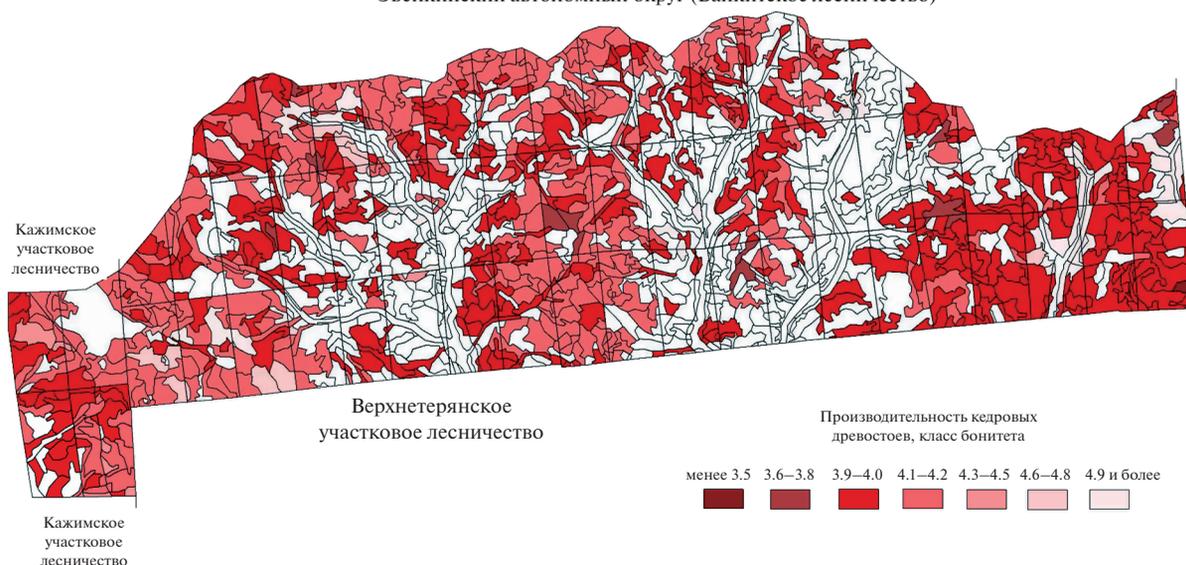


Рис. 4. Потенциальная продуктивность кедровых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

может производиться через взаимосвязи с факторами среды. Для преимущественно перестойных древостоев тестового участка, находящихся в состоянии распада, продуктивность древостоев оказалась связана с абсолютной высотой местности, влажностью местоположений и плодородием почв. Расчет аналитического вида уравнений регрессии произведен программными средствами STATISTICA, пространственный анализ показателей рельефа произведен программными сред-

ствами ArcGIS Spatial Analyst. Характеристики лесорастительных условий в атрибутивной таблице ГИС таксационных выделов по мере уточнения могут редактироваться с последующим пересчетом аналитического вида уравнений регрессии. Кроме того, при составлении уравнений существует также возможность использования дополнительных аргументов.

Точность оценок лесорастительных условий напрямую зависит от исходных данных. В работе

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

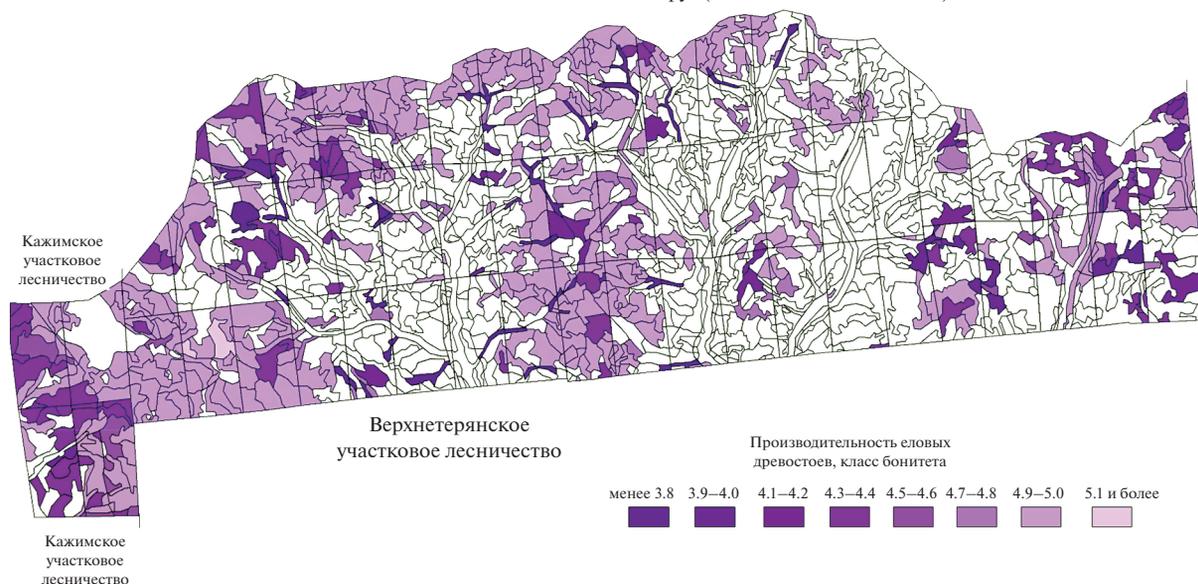


Рис. 5. Потенциальная продуктивность еловых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

использованы данные массовой таксации, которые сами содержат погрешности, а таксационный выдел не имеет строгой привязки к экспозиции и уклонам местности. При определении индекса влажности местоположений особо важное значение приобретает тип леса, который достаточно уверенно определяется в процессе натурной таксации. При дешифровочной таксации тип леса определяется по косвенным признакам, т.е. дешифрируется с определенными трудностями (Дмитриев и др., 1976) и, как следствие, сопровождается ошибками. Отметим также, что почвы на территории тестового участка подробно не изучены, что затрудняло определение типа почв при таксации. Исследованиям почв, конечно, следует уделять большее внимание. Из литературы известны упрощенные методики. Так, И.В. Флоринский (2009) описывает способ получения прогнозных карт физических, химических и биологических характеристик почв, основанный на использовании ЦМР и результатов наземных почвенных съемок.

Картографирование потенциальной продуктивности древостоев произведено по значениям полей  $B_0$  атрибутивной таблицы ГИС таксационных выделов. По другим полям таблицы существует возможность картографирования других показателей выделов, в том числе показателей лесорастительных условий: абсолютной высоты  $H$ , влажности местоположений  $W$  и плодородия почв  $S_0$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дмитриев И.Д., Данюлис Е.П., Кропов П.А. Лесная аэросъемка и авиация. Лесотаксационное и лесохозяйственное дешифрирование аэроснимков. Л.: Изд-во Лесотехнической академии им. С.М. Кирова, 1976. 168 с.

Лесное хозяйство: Терминологический словарь / Под общ. ред. Филипчука А.Н. М.: Всерос. научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2002. 480 с.

Петров А.П., Бурдин Н.А., Кожухов Н.И. Лесной комплекс (Вопросы теории и практики). М.: Лесн. пром-сть, 1986. 296 с.

Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.

Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Медиа Сфера, 2003. 305 с.

Седельников В.П., Лапицина Е.И., Королюк А.Ю., Валуцкий В.И., Ермаков Н.Б., Еришова Э.А., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Среднемасштабное картирование растительности гор Южной Сибири // Сибирский экологический журн. 2005. Т. 12. № 6. С. 939–953.

Фарбер С.К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с.

Фарбер С.К. Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 432 с.

Фарбер С.К., Кошкарова В.Л., Кузьмик Н.С. Картографирование лесных формаций голоцена с использованием основных показателей климата – тепла и влаги // Сибирский лесной журн. 2017. № 6. С. 6–40.

Флоринский И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематического GPS съемок и почвенных наземных съемок) // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 56–65.

Фуряев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 253 с.

Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008. V. XXXVII. Pt B7. P. 169–172.

## Tree Species Potential Productivity Modeling on the Example of the Southern Taiga of the Angara Region

S. K. Farber<sup>1,\*</sup> and N. S. Kuz'mik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

\*E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

The potential productivity of forest stands is considered depending on the forest growing conditions. Multiple regression equations are formed. Initial information are the forest inventory materials and digital elevation model data. Growth class is used as a dependent variable. The characteristics of heat supply, humidity of locations and soil fertility are taken as arguments. The locations' heat supply is considered as a derivative of the relief indicators. Indicators of moisture content of locations and soil fertility are constructed on the basis of forest inventory descriptions. Regardless of the land category, each taxation unit receives both additional characteristics and the possibility of subsequent calculation of the forest stands' potential productivity. It was revealed that the vertical temperature gradient significantly affects the tree species representation, but practically does not affect the forest stands' productivity. A significant decrease in the growth class with the rise in height is observed only in pine and spruce stands. The influence of exposure, slope and surface curvature on the forest stands productivity was not found. On the contrary, the presence of a statistically significant correlation between the productivity of forest stands and forest types (humidity of locations) and soil types (forest soil fertility) was revealed. The maps of the potential productivity of pine, larch, cedar and spruce stands are presented as well.

*Keywords: forest stands potential productivity, relief and heat supply of locations, forest types, growth class, humidity and fertility of soils.*

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of a basic scientific research of a SB RAS Programme VI.52.2. "Forest ecosystems of Siberia: biospheric and resource functions' adaptive potential in different climatic and anthropogenic scenarios" (0356-2017-0738, state registry number AAAA-A17-117101940014-9).

### REFERENCES

- Dmitriev I.D., Danyulis E.P., Kropov P.A., *Lesnaya aeros'emka i aviatsiya. Lesotaksatsionnoe i lesokhozyaistvennoe deshifirovanie aerosnimkov* (Forest aerial photography and aviation. Forest inventory and forestry interpretation of aerial photographs), Leningrad: Izd-vo Lesotekhnicheskoi akademii im. S.M. Kirova, 1976, 168 p.
- Farber S.K., *Formirovanie drevostoev Vostochnoi Sibiri* (Formation of crops of Eastern Siberia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, 432 p.
- Farber S.K., Koshkarova V.L., Kuz'mik N.S., Kartografirovanie lesnykh formatsii golotsena s ispol'zovaniem osnovnykh pokazatelei klimata – tepla i vlagi (Mapping the Holocene forest formations with the use of key climate indicators – heat and moisture), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 6, pp. 6–40.
- Farber S.K., *Lesnye izmereniya po srednemashtabnym aerosnimkam* (Forest measurements from mid-scale aerial photographs), Krasnoyarsk: Izd-vo SO RAN, 1997, 106 p.
- Florinskii I.V., Kartografirovanie pochvy na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'efa (po dannym kinematicheskikh GPS s'emok i pochvennykh nazemnykh s'emok) (Soil mapping based on digital terrain modeling (using data from kinematic GPS surveys and soil surveys)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 56–65.
- Furyaev V.V., *Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya* (The role of fires in the process of forest formation), Novosibirsk: Nauka, 1996, 253 p.
- Karwel A.K., Ewiak I., Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, Vol. XXXVII, Pt. B7, pp. 169–172.
- Lesnoe khozyaistvo: Terminologicheskii slovar'*, (Forestry: dictionary of terms), Moscow: Vseros. nauchno-issledovatel'skii institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaistva, 2002, 480 p.
- Petrov A.P., Burdin N.A., Kozhukhov N.I., *Lesnoi kompleks (Voprosy teorii i praktiki)* (Timber complex (Questions of theory and practice)), Moscow: Lesn. prom-st', 1986, 296 p.
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and montane forests of South Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1986, 224 p.
- Rebrova O.Y., *Statisticheskii analiz meditsinskikh dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA* (Statistical analysis of medical data. Using the STATISTICA Application Package), Moscow: Media Sfera, 2003, 305 p.
- Sedel'nikov V.P., Lapshina E.I., Korolyuk A.Y., Valutskii V.I., Ermakov N.B., Ershova E.A., Makunina N.I., Mal'tseva T.V., *Srednemashtabnoe kartirovanie rastitel'nosti gor Yuzhnoi Sibiri* (Middle-scale mapping of vegetation in the mountains of South Siberia), *Sibirskii Ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 939–953.

УДК 632.93+579.264

## ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ МИКРОБНЫМИ И ФИТОПРЕПАРАТАМИ НА СОХРАННОСТЬ СЕЯНЦЕВ И СВОЙСТВА ПОЧВЫ В ЛЕСНОМ ПИТОМНИКЕ

© 2021 г. О. Э. Пашкеева<sup>а, \*</sup>, И. Д. Гродницкая<sup>а</sup>, Г. И. Антонов<sup>а</sup>,  
О. И. Ломовский<sup>б</sup>, И. И. Гайдашева<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

<sup>б</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, 630128 Россия

<sup>с</sup>Сибирский федеральный университет, Свободный просп., 79, Красноярск, 660041 Россия

\*E-mail: koeandkoe@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Исследования проводили на территории опытного питомника экспериментально-опытного хозяйства «Погорельский бор» Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. В модельных полевых экспериментах изучали влияние предпосевной обработки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) водными суспензиями аборигенных микроорганизмов, обладающих антагонистической активностью к фитопатогенам, и фитопрепаратами, полученными из растительного сырья, на микробную биомассу, ферментативную активность почвы и сохранность сеянцев хвойных. Обработку семян сосны проводили штаммами микромицетов *Trichoderma harzianum*, *T. longibrachiatum*, *T. lignorum*, их смесью; бактериями *Bacillus amyloliquefaciens*, смесью бактерий (*B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Pseudomonas* sp.) и фитопрепаратами (пять вариантов). Показано, что предпосевная обработка семян сосны способствовала улучшению их всхожести, сохранности сеянцев к концу сезона вегетации, морфометрических параметров сеянцев по сравнению с контролем в среднем на 25%. Интродуцированные с семенами популяции бактерий и микромицетов повышали продуктивность, содержание микробной биомассы и ферментативную активность почвы лесного питомника в 1.3–2.0 раза. Установлено, что в контрольной почве на протяжении всего периода вегетации преобладала олиготрофная группа микроорганизмов, а при обработке семян сосны (микроорганизмы и фитопрепараты) уже через два месяца после посева семян доминировала гидролитико-копиотрофная группа. Внесение микробов-антагонистов (*B. amyloliquefaciens*, *T. longibrachiatum*, Смесь бактерий) и фитопрепаратов также благоприятно влияло на функционирование почвенного микробного сообщества, что проиллюстрировано уменьшением значений микробного метаболического коэффициента в среднем почти в 2 раза по сравнению с контролем. Результаты исследования можно рекомендовать для использования в практике лесного хозяйства при выращивании сеянцев хвойных.

**Ключевые слова:** Красноярская лесостепь, сеянцы хвойных, опытный лесной питомник, микроорганизмы-антагонисты, фитопрепараты, механохимическая переработка растительного сырья.

DOI: 10.31857/S0024114821020066

Почвы лесных питомников, предназначенные для выращивания лесопосадочного материала, подвергаются антропогенному воздействию (вспашка, внесение пестицидов, монокультура, изъятие растительности), что негативно сказывается на их плодородии, в том числе в виде уменьшения содержания питательных элементов (истощение), увеличения токсикогенности и численности фитопатогенных микроорганизмов (Громовых и др., 2002; Фомина и др., 2006; Trasar-Cepeda et al., 2008). Кроме того, в почве наблюдается развитие деградационных процессов, изменение ее кислотно-щелочных свойств, количественного и ка-

чественного состава микробиоты, снижение ферментативной активности и увеличение количества патогенных микроорганизмов (Фомина и др., 2006; Гродницкая, Сорокин, 2007).

Для решения этих проблем актуальным является использование биологических методов восстановления почв с помощью растений и микроорганизмов, способных не только восстановить, но и существенно улучшить состояние деградированных и нарушенных почв, увеличить адаптационный потенциал растений именно на ранних этапах формирования фитоценоза, когда гибель растений наиболее высока. Применение смесей

порошков растительного сырья, полученных после механохимической обработки, приводит к увеличению реакционной способности субстрата в качестве источника биологически активных веществ для полезной микробиоты почвы (Рожанская и др., 2007). Микроорганизмы являются одним из главных экологических факторов почвообразования, способствуют восстановлению деградированных почв за счет приведения основных физических, химический и биологических параметров к оптимальным показателям. Поэтому внесение их в почву приводит к ускорению процессов деградации или детоксикации опасных субстратов до безопасных для почвенной биоты и растений (Vasnet et al., 2010; Solevic et al., 2011).

С помощью микробиологических индикаторов можно провести адекватную оценку плодородия почвы (биологической активности), по их значениям оценивают важнейшие почвенные процессы: скорость разложения органических веществ, дыхание и биохимическую активность (Anderson J., Domsch, 1978; Ананьева, 2003; Хазиев, 2005; Стольникова и др., 2011). Микробная биомасса (МБ) (живая часть органического углерода), базальное (БД) и удельное ( $q\text{CO}_2$ ) дыхание определяют экофизиологическое состояние (статус) почвенного микробного сообщества, дают своеобразную качественную оценку почвы (Nagris, 2003). Изменение величины  $q\text{CO}_2$  почвы в сторону увеличения отмечается под воздействием природных стрессов (высушивание – увлажнение, замораживание – оттаивание), а также при различных антропогенных нарушениях, в том числе загрязнении тяжелыми металлами и пестицидами при многолетнем возделывании монокультуры сельскохозяйственных растений (Anderson T., Domsch, 1990; Ананьева, 2003; Gibbs et al., 2006). Соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ) и ферментативная активность почвы позволяют оценивать направление деструкционных процессов в ту или иную сторону (гумусоаккумуляции или истощения) и скорость биохимических процессов. На основании количественных показателей микробиологических индикаторов можно осуществлять мониторинг состояния антропогенно нарушенных экосистем с целью их оценки, контроля или прогноза.

Цель настоящего исследования – изучить влияние предпосевной обработки семян сосны обыкновенной микроорганизмами-антагонистами и фитопрепаратами на сохранность семян хвойных, биологическую активность темно-серой почвы лесного питомника.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Полевые эксперименты по исследованию влияния микробов-антагонистов и фитопрепаратов

на биологическую активность, рост и развитие семян сосны обыкновенной проводили в опытном питомнике экспериментально-опытного хозяйства “Погорельский бор” Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в 2016 г. Погорельский бор – интразональный участок Красноярской лесостепи, расположенный в 40 км к северу от г. Красноярск ( $56^{\circ}22'$  с.ш./ $92^{\circ}57'$  в.д.), почва темно-серая (WRB, Albic LUVISOLS/Grey-Luvic PNAEOZEMS) слабо-оподзоленная оглееная, тяжелосуглинистая, с удовлетворительным состоянием гумусового горизонта и хорошо обеспеченная элементами питания растений (Сорокин и др., 2009; Антонов и др., 2018). Экологические условия произрастания фитоценозов Погорельского бора (данные специалистов Института леса СО РАН) довольно благоприятные (последние 40 лет нет систематического загрязнения), с невысокими рекреационными нагрузками.

В гранулометрическом составе минерального профиля почвы преобладают фракции мелкого песка. Лесная подстилка (О, 0–1(2) см) характеризуется слабокислой реакцией среды ( $\text{pH}_{\text{водн}}$  5.1), в горизонтах AEL и BEL  $\text{pH}$  достигал 5.91 и 6.00 соответственно, в горизонте BT – 5.88. Содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$  снижается с глубиной: так, в горизонте AU – 5–15 см  $\text{C}_{\text{орг}}$  составило 4.4% (среднее значение), в AU – 20–30 см – 3.05% (ниже среднего), а затем оно резко снижается в нижележащих горизонтах. Отношение C : N в слое 5–20 см составило 57, 20–30 см – 41, 35–45 см – 6 (Антонов и др., 2018).

Всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) определяли в лабораторных условиях по методике А.И. Новосельцева и В.А. Смирнова (1983). Затем семена сосны обрабатывали суспензиями микробов-антагонистов и фитопрепаратами. Штаммы микробов-антагонистов (*Bacillus amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Pseudomonas* sp., *Trichoderma longibrachiatum*, *T. lignorum*) взяты из музея лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии института леса СО РАН, микромицет *Trichoderma harzianum* (Rifai) получен в виде препарата “триходермин” из Сибирского федерального университета (г. Красноярск). Биологическая активность этих штаммов проверена и описана нами ранее (Кондакова, Гродницкая, 2018). Готовили водные суспензии микромицетов *Trichoderma harzianum*, *T. longibrachiatum*, *T. lignorum* ( $10^{7-8}$  спор  $\text{мл}^{-1}$ ) и бактерий *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Pseudomonas* sp. ( $10^{7-8}$  кл  $\text{мл}^{-1}$ ) (Rovira, 1965; Новосельцева, Смирнов, 1983). Растительный препарат (фитопрепарат, 10 г) растворяли в воде (1 л), осадок раствора не использовали. Фитопрепараты (всего 5) получали механохимической обработкой смеси растительного сырья (порошок) и реагентов, указанных в его составе. Механохимическая обработка растительного сырья включала его измельчение (мельница-активатор

АГО-2, стальные шары диаметром 5 мм с расчетным ускорением  $200 \text{ м с}^{-2}$  в течение 2 мин) и высушивание до порошкообразного состояния. Получали фитопрепараты (ФП) с повышенным содержанием биологически активных веществ: шелуха гречихи + 5% NaOH (ФП1) – полифенол меланина; шелуха риса + зеленый чай (ФП2) – хелаты галлокатехинов зеленого чая и оксида кремния; шелуха риса + шелуха гречихи (ФП3) – хелаты меланина и оксида кремния; бурый уголь + NaOH (ФП4) – высокомолекулярные полифенолы (гуматы натрия); бурый уголь + ламинария (ФП5, производство США–Китай). После механохимической обработки фитопрепаратов в них определяли содержание уже упомянутых водорастворимых активных веществ (Рожанская и др., 2007; Shapolova, Lomovsky, 2016).

Предпосевная обработка семян заключалась в их замачивании в 0.05%-ом растворе  $\text{KMnO}_4$  в течение 6 ч и затем – суспензиях микробов-антагонистов и растворах фитопрепаратов (3 ч). Семена, обработанные 0.05%-ом раствором  $\text{KMnO}_4$  и помещенные затем в стерильную воду на 3 ч, служили контролем.

Обработанные таким образом семена сосны обыкновенной высевали в почву (150 шт. в три посевные строки, всего 450) опытных участков ( $50 \times 50 \text{ см}$ , всего 11). Варианты эксперимента: ФП1; ФП2; ФП3; ФП4; ФП5; обработка *T. harzianum*; *T. longibrachiatum*; Смесь грибов р. *Trichoderma* (*T. harzianum*, *T. lignorum*, *T. longibrachiatum*); *B. amyloliquefaciens*; Смесь бактерий (*Bacillus amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Pseudomonas* sp.); контроль –  $\text{H}_2\text{O}$ . После посева семян почву опытных участков мульчировали опилками слоем до 2 см. Грунтовую всхожесть семян учитывали через 30 сут, а численность сеянцев сосны – ежемесячно в течение всего периода вегетации (июнь–сентябрь). По окончании эксперимента сеянцы (по 10 шт. каждого варианта) отбирали для их биометрического исследования.

До формирования экспериментальных участков и посева семян отбирали образцы почвы (горизонт АУ 0–15 см, смешанный образец из трех точек) для анализа ее начальных (фоновых) показателей, затем ежемесячно – для микробиологических анализов. Отбор образцов почв для определения их ферментативной активности проводили в начале и конце вегетации растений.

На каждом участке при отборе почвенных образцов измеряли температуру воздуха и почвы с использованием портативного термометра “Nanna Checktemp 1”. В лабораторных условиях термостатно-весовым методом определяли влажность почвы. Значения рН (почва/вода = 1 : 10) определяли портативным потенциометром “Аквилон-410”.

Отбор почвы для микробиологических и ферментативных анализов проводили с глубины 0–

15 см. Один смешанный образец почвы в каждом варианте опыта составляли из трех прикопок на участке. Для микробиологических анализов использовали свежесобранные образцы, а для определения ферментов – высушенные. Численность, структуру и таксономический состав ЭКТГМ определяли методом посева почвенной суспензии на элективные агаризованные питательные среды (Методы ..., 2003; Практикум ..., 2005). Гидролитические бактерии учитывали на мясопептонном агаре (МПА), копитрофы – крахмало-аммиачном агаре (КАА), олиготрофы – почвенном агаре (ПА), микроскопические грибы – сусло-агаре (СА+ молочная кислота,  $4 \text{ мл л}^{-1}$ ). Посев почвенной суспензии (0.1 мл, разведение 1 :  $10^3$ ) проводили на поверхность указанных питательных сред (3 повторности) на следующий день после отбора образцов. Чашки Петри с посевом инкубировали при 27–28°C. Подсчет численности бактерий проводили на 2–3-е, грибов – 4–7-е сутки инкубирования. Подсчитывали численность колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 г почвы (Практикум ..., 2005). Рассчитывали коэффициент микробиологической минерализации ( $K_{\text{мин}} = \text{КАА} : \text{МПА}$ ), иллюстрирующий разложение и накопление органических веществ. Коэффициент олиготрофности ( $K_{\text{олиг}} = \text{ПА} : \text{МПА}$ ) иллюстрирует способность микроорганизмов к аккумуляции питательных элементов из “рассеянного” состояния (Мишустин, Емцев, 1987).

Ферментативную активность почвы с использованием фотоэлектроколориметра КФК-3 определяли по методикам, описанным Ф.Х. Хазиевым (2005). Активность гидролитических ферментов (инвертазы, протеазы, уреазы, фосфатазы) определяли при компостировании почвы в термостате при 30–38°C в течение 3–24 ч. Активность пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО) определяли по методу Л.А. Карягиной и Н.А. Михайловой (Хазиев, 2005). Активность ферментов выражали на единицу веса почвы (г): инвертазы – мг глюкозы, уреазы – мг  $\text{N-NH}_4$ , фосфатазы – мг  $\text{P}_2\text{O}_5$ , ПФО и ПО – 1.4-парабензохинона. По отношению активности ПФО и ПО рассчитывали коэффициент гумификации ( $K_{\text{гум}}$ ), позволяющий судить об интенсивности процесса минерализации гумуса (Методы ..., 2003; Хазиев, 2005). Размерность ферментов обозначали как единица фермента (ед. ф.) далее по тексту.

Дыхательную активность почвенного микробного сообщества измеряли с использованием газового хроматографа Agilent Technologies 6890 N Network GC (USA) и выражали скоростью БД и субстрат-индуцированного дыхания (СИД) (Anderson J., Domsch, 1978; Ананьева, 2003). Значения СИД использовали для расчета углерода МБ, выраженной содержанием углерода ( $\text{C}_{\text{мик}}$ ).

Корреляционную связь между эколого-трофическими группами микроорганизмов почвы и ее температурой, рН, влажностью оценивали коэффициентами ( $r$ ) Пирсона (данные с нормальным распределением) и Спирмена (распределение отличается от нормального). Эти коэффициенты значимы при доверительной вероятности 95 и 99%. Зависимость между микробными и почвенными показателями оценивали дисперсионным и корреляционным анализами. Для оценки различий и сходства между вариантами обработки семян и контролем использовали метод построения сетей схожести (Network plot) со срезом сходства 60 и 70% (метод главных компонент и кластерный анализ). Полученные данные обработаны при помощи статистического пакета программ Microsoft Excel 2015, Statistica 12.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химические и микробиологические свойства почвы, представлены в табл. 1. Почва фона характеризуется слабо-кислой, близкой к нейтральной реакцией среды (рН 6.4), низкой влажностью 11.9%, средняя температура за вегетационный сезон – 19.2°C. В фоновой почве численность гидролитиков, копитрофов и олиготрофов составила 1.2, 2.9 и 4.6 КОЕ г<sup>-1</sup> соответственно, при этом численность олиготрофов превышала таковую гидролитиков в 3.8 раз. Значение  $K_{\text{олиг}}$  в этой почве превышало в среднем в 1.6 раза  $K_{\text{мин}}$ , что свидетельствовало об ослаблении минерализационных процессов. К тому же численность актиномицетов в фоновой почве составила  $\leq 1 \times 10^5$  КОЕ г<sup>-1</sup>, что также свидетельствует о низкой степени минерализации органических веществ. Микромицеты в почве фона (май) не были обнаружены. В темно-серой почве фонового участка содержание МБ составило 133 мкг С г<sup>-1</sup>, значение  $q\text{CO}_2$  довольно высокое (20 мкг С-СО<sub>2</sub> мг<sup>-1</sup> С<sub>мик</sub> ч<sup>-1</sup>, что может свидетельствовать о нарушении функционирования микробоценоза (Ананьева, 2003; Ананьева и др., 2011; Стольникова и др., 2011).

Посев семян сосны, обработанных микробами-антагонистами и фитопрепаратами, проводили в конце мая (температура почвы 11°C, воздуха 28°C, влажность почвы 18.9%). Лабораторная всхожесть семян составила 30%, а грунтовая (июнь) – 3–23% (табл. 1). Такая низкая всхожесть в естественных условиях связана, скорее всего, с неблагоприятными климатическими условиями. Так, согласно данным дневника погоды ГИСМЕТЕОЦЕНТР, в июне дневная температура не опускалась ниже 18°C, 24 дня этого месяца воздух прогревался  $\geq 24^\circ\text{C}$ , и только 7 дней были с осадками (<https://www.gismeteo.ru/diary/4674/2016/6/>). Наибольшую грунтовую всхожесть семян сосны (23%) отмечали в контроле и при обработке

*T. harzianum*. При обработке фитопрепаратами всхожесть семян была выше в варианте ФП3 (12%), бактерий – *B. amyloliquefaciens* (17%) (табл. 1).

Иссушение почвы (особенно в июне–начале июля) привело к гибели значительного количества семян ( $r = -0.6, p < 0.05$ ), которое еще снизилось на 50% к концу вегетационного сезона во всех вариантах опыта. Однако наибольшая и почти одинаковая сохранность семян оказалась в контроле и при обработке *T. harzianum* (15.6 и 15.7% соответственно). Количество семян в вариантах *B. amyloliquefaciens* и ФП1 снизилось в 2 раза, составляя 7.6 и 2.4% соответственно (табл. 1). Обработка семян сосны фитопрепаратами также способствовала увеличению их грунтовой всхожести по сравнению с контролем. Однако сохранность семян к концу вегетации была выше при обработке микробными препаратами (особенно в вариантах с *B. amyloliquefaciens* и Смесью бактерий).

Морфометрический анализ растений выявил, что длина корешков семян была выше в контроле в среднем на 22% по сравнению с другими вариантами. Микроорганизмы *B. amyloliquefaciens* и *T. harzianum* стимулировали рост диаметра корневой шейки семян по сравнению с контролем в среднем на 14.6 и 100%. При обработке препаратом ФП1 диаметр корневой шейки семян оказался меньше на 17.5% по сравнению с таковым при микробной обработке (табл. 2). Длина мутовки семян сосны была в 2.6 раз выше при обработке *B. amyloliquefaciens* и *T. harzianum*, но в 1.4 раза меньше при ФП1 ( $p < 0.05$ ) по сравнению с контролем. Вес семян в вариантах ФП1 и *B. amyloliquefaciens* был в 6.5 раз больше, чем в контроле (табл. 2). Отмечено, что на количество семян сосны и их морфометрические показатели большее влияние оказывала влажность почвы ( $r = 0.61$ ).

Таким образом, на грунтовую всхожесть семян и морфометрические характеристики семян сосны обыкновенной положительное влияние оказала предпосевная обработка штаммами микроорганизмов *T. harzianum*, *B. amyloliquefaciens* и фитопрепаратом № 1. Мы полагаем, что при обработке семян микроорганизмами и фитопрепаратами (начальный этап их развития) происходит взаимодействие корней растений и аборигенной микрофлоры, что способствует формированию более устойчивых трофических связей в системе “почва–растение”.

Показано, что в почве с посевами сосны обыкновенной преобладала олиготрофная группа микроорганизмов, значение  $K_{\text{олиг}}$  было в 1.5 раза выше такового  $K_{\text{мин}}$ . Однако через 2 мес. после посева семян в вариантах с фитопрепаратами и бактериями, напротив, преобладали гидролитико-копитрофные микроорганизмы ( $K_{\text{мин}} > K_{\text{олиг}}$  в 1.5 раза). Возможно, это связано с высокой гибелью всходов сосны и поступлением в почву

**Таблица 1.** Значения основных параметров темно-серой почвы в органогенном горизонте (0–15 см) и доля семян сосны разных вариантов опыта в течение вегетационного сезона на опытном питомнике

Вариант опыта	рН	t, °С	ВЛ, %	Численность микроорганизмов, млн КОЕ г <sup>-1</sup> почвы			K <sub>мин</sub>	K <sub>олиг</sub>	C <sub>мик</sub>	БД	qCO <sub>2</sub>	ДСС, %
				ГД	КП	ОЛ						
Май												
Фон	6.4	11.2	18.9	1.2	2.9	4.6	2.4	3.9	133	2.7	20	–
Июнь												
Контроль (H <sub>2</sub> O)	6.8	18.5	15.6	0.2	1.3	1.8	5.6	7.9	143	4.8	33	34.7
ФП1	6.5	18.3	16.3	0.2	0.8	1.5	3.5	6.5	172	5.2	30	4.7
ФП2	6.7	18.3	13.4	2.2	3.4	2.0	1.6	0.9	219	11.9	55	8.3
ФП3	7.0	18.6	17.6	0.2	1.9	1.8	8.0	7.5	117	6.3	54	6.0
ФП4	6.6	18.8	17.2	1.7	2.6	2.1	1.5	1.2	361	8.1	23	17.3
ФП5	6.5	18.5	16.6	0.2	1.3	3.1	5.2	6.7	269	7.1	27	6.3
<i>Trichoderma harzianum</i>	6.6	18.4	14.3	0.2	1.3	2.0	7.2	10.9	178	4.5	25	34.7
<i>T. longibrachiatum</i>	6.6	18.5	17.3	0.2	0.9	1.8	5.6	10.8	263	7.4	28	3.7
Смесь микромицетов	6.7	18.5	15.5	0.3	0.3	1.6	1.0	4.9	159	5.4	34	4.3
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	7.7	18.5	17.3	0.1	1.9	0.9	30.5	13.3	179	7.8	43	25.7
Смесь бактерий	6.9	18.8	15.9	0.3	2.3	3.8	8.3	13.5	218	9.3	42	4.7
Июль												
Контроль (H <sub>2</sub> O)	7.1	25.3	13.4	0.2	1.9	1.2	8.3	5.5	149	5.8	39	27.67
ФП1	7.1	24.3	14.5	0.2	1.3	0.6	8.5	4.0	124	8.1	66	4.00
ФП2	7.0	24.5	11.2	1.0	1.5	1.2	1.5	1.1	164	9.7	59	1.67
ФП3	7.3	25.2	16.7	0.4	1.1	1.7	2.9	4.5	103	4.5	44	0.67
ФП4	7.1	26.4	15.6	0.2	1.3	0.8	5.7	3.3	177	6.5	37	5.33
ФП5	6.7	23.7	15.4	0.2	1.8	1.1	7.5	4.7	140	5.9	42	3.67
<i>Trichoderma harzianum</i>	6.9	24.2	15.5	0.3	0.7	0.9	2.1	2.8	168	6.7	40	24.67
<i>T. longibrachiatum</i>	7.3	24.5	16.7	0.4	1.7	2.3	4.1	5.8	175	4.3	25	0.33
Смесь микромицетов	6.8	25.2	15.4	0.1	0.7	0.9	5.1	7.4	224	8.5	38	1.33
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	7.0	24.4	14.7	0.1	1.4	0.9	10.8	7.2	173	4.8	28	8.67
Смесь бактерий	6.9	24.4	13.1	1.3	1.6	1.6	1.3	1.3	184	8.2	45	2.33
Август												
Контроль (H <sub>2</sub> O)	6.4	13.7	17.3	1.3	2.5	2.7	2.0	2.0	249	7.8	31	21.33
ФП1	6.4	13.8	18.2	1.1	3.5	3.7	3.2	3.4	228	4.2	19	4.00
ФП2	6.6	13.7	19.4	2.3	3.9	4.0	1.7	1.7	113	4.1	36	1.00
ФП3	6.6	13.8	18.4	1.7	2.3	2.4	1.4	1.5	148	6.3	43	0.67
ФП4	6.6	13.9	18.3	0.8	0.7	4.1	0.9	5.3	170	3.9	23	2.67
ФП5	6.8	13.8	19.4	2.3	1.4	3.1	0.6	1.4	162	3.2	20	2.67
<i>Trichoderma harzianum</i>	6.9	13.7	13.6	1.6	1.3	2.0	0.8	1.3	177	5.4	31	21.00
<i>T. longibrachiatum</i>	6.3	13.7	18.0	1.8	1.2	2.7	0.6	1.5	152	3.8	25	0.33
Смесь микромицетов	6.5	13.5	15.9	1.0	0.8	2.4	0.7	2.3	173	3.0	17	1.33
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	6.6	13.9	17.6	1.3	2.0	3.1	1.5	2.3	135	6.3	47	12.00
Смесь бактерий	7.3	13.8	19.1	4.6	2.5	4.7	0.6	1.0	213	4.4	21	2.67

Таблица 1. Окончание

Вариант опыта	рН	t, °С	ВЛ, %	Численность микроорганизмов, млн КОЕ г <sup>-1</sup> почвы			K <sub>мин</sub>	K <sub>олиг</sub>	C <sub>мик</sub>	БД	qCO <sub>2</sub>	ДСС, %
				ГД	КП	ОЛ						
Сентябрь												
Контроль (H <sub>2</sub> O)	7.1	20.1	13.1	0.4	0.8	1.3	2.2	3.5	159	4.3	27	23.67
ФП1	6.7	19.5	17.9	0.9	0.8	1.7	0.91	2.0	227	4.5	20	3.67
ФП2	6.5	20.2	16.5	1.3	2.2	2.8	1.69	2.2	199	4.3	22	1.00
ФП3	6.6	18.5	16.3	1.0	0.9	1.2	0.85	1.2	126	3.9	31	0.67
ФП4	7.1	21.5	19.1	0.2	0.4	1.3	1.47	5.2	216	3.0	14	1.67
ФП5	6.6	20.9	17.0	1.0	1.2	2.0	1.19	2.0	243	3.6	15	2.33
<i>Trichoderma harzianum</i>	6.6	19.3	16.2	0.8	1.2	2.4	1.72	3.5	227	3.1	14	23.33
<i>T. longibrachiatum</i>	6.7	20.5	19.6	0.3	0.3	1.9	0.92	5.9	170	5.0	29	0.33
Смесь микромицетов	6.5	20.4	18.1	0.3	1.4	1.0	4.91	3.7	118	3.4	29	1.33
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	6.8	19.4	19.0	0.3	1.5	2.5	5.11	9.0	232	5.0	22	11.33
Смесь бактерий	6.6	18.2	18.6	1.7	2.7	3.5	1.63	2.1	257	4.7	18	2.67

Примечание. рН – кислотность почвы, t – температура почвы, ВЛ – влажность, ГД – численность гидролитических микроорганизмов, КП – численность копиотрофных микроорганизмов, ОЛ – численность олиготрофных микроорганизмов, K<sub>мин</sub> – коэффициенты минерализации и K<sub>олиг</sub> – коэффициент олиготрофности, C<sub>мик</sub> – содержание углерода микробной биомассы (мкг С г<sup>-1</sup>), БД – базальное дыхание (мкг С-СО<sub>2</sub> ч<sup>-1</sup> г<sup>-1</sup>), qCO<sub>2</sub> – микробный метаболический коэффициент (мкг С-СО<sub>2</sub> мг<sup>-1</sup> С<sub>мик</sub> ч<sup>-1</sup>), ДСС – доля семян сосны.

Таблица 2. Морфометрические показатели семян сосны в некоторых вариантах опыта (n = 10)

Вариант	Длина, см			Диаметр корневой шейки, мм	Вес (сухой) семени, г
	мутовка	стебелек	корень		
Контроль	0.32 ± 0.2	3.2 ± 0.2	10.0 ± 1.2	0.32 ± 0.02	0.11 ± 0.02
ФП1	1.2 ± 0.2	3.3 ± 0.2	8.5 ± 0.3	0.26 ± 0.01	0.14 ± 0.07
<i>Trichoderma harzianum</i>	3.1 ± 0.25	3.6 ± 0.09	8.9 ± 0.3	0.36 ± 0.01	0.15 ± 0.01
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	4.3 ± 0.3	3.5 ± 0.2	9.04 ± 0.6	0.70 ± 0.13	0.16 ± 0.01

мертвой органической массы растений. К тому же, показана значимо высокая отрицательная корреляция между количеством погибших проростков (семян) и численностью основных ЭКТГМ ( $r = -0.5$  – для фитопрепаратов и  $r = -0.7$  – для бактерий).

Обработка семян сосны смесью микромицетов рода *Trichoderma* и фитопрепаратами (ФП2-4) способствовала увеличению численности гидролитико-копиотрофного комплекса в 2.7 раз, *T. longibrachiatum* – гидролитико-олиготрофного – в 1.5 раза, а Смесью бактерий – всех ЭКТГМ в 2 раза по сравнению с контролем (табл. 1). Следует отметить, что общая численность микроорганизмов возрастала при увеличении температуры почвы ( $r = 0.5$ ).

В почве опытного питомника численность микроскопических грибов, основных деструкторов органики, была довольно низкой, и только к концу вегетации (август–сентябрь) она возросла в среднем в 3.5 раза. Этот факт может быть связан с увеличением влажности почвы и созданием тем самым благоприятных условий для развития микромицетов. Внесенные с семенами сосны микромицеты (*T. harzianum*, *T. longibrachiatum*, Смесь микромицетов) способствовали также увеличению общей численности грибов почвы относительно контроля в 3.7, 1.1 и 1.3 раза соответственно ( $p > 0.05$ ). В других вариантах обработки численность почвенных грибов увеличилась только с внесением смеси бактерий, ФП3 и ФП4 (11.9, 6 и  $12 \times 10^3$  КОЕ г<sup>-1</sup> почвы соответственно) (табл. 1).

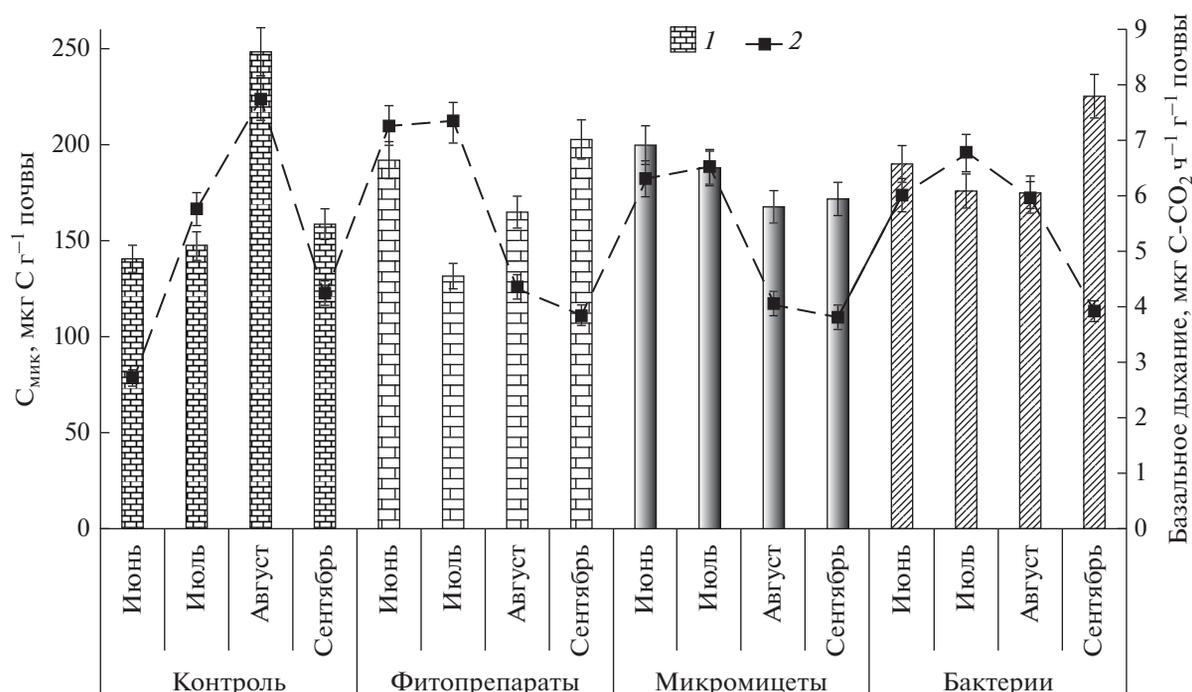


Рис. 1. Изменения значений микробной биомассы (1) и базального дыхания (2) в течение вегетационного периода в почве под посевами хвойных (усредненные данные разных вариантов обработок).

Таким образом, внесенные в почву с семенами сосны обыкновенной микробы-антагонисты и фитопрепараты способствовали увеличению численности ее основных ЭКТГМ на протяжении всего сезона вегетации. Наибольшее стимулирующее влияние на численность микроорганизмов почвы оказывало внесение Смеси бактерий, *T. longibrachiatum*, *B. amyloliquefaciens* и ФПЗ. Причем, внесение микроорганизмов способствовало большему увеличению численности ЭКТГМ и изменению их доминирующей группы по сравнению с фитопрепаратами.

Обработка семян сосны фитопрепаратами (1–3), бактериями (*B. amyloliquefaciens*, Смесь бактерий) способствовала увеличению содержания МБ и интенсивности почвенного дыхания (табл. 1). Содержание МБ в почве под посевами в сентябре возросло в среднем в 1.5 раза по сравнению с фоновой почвой в вариантах с *T. harzianum*, *B. amyloliquefaciens*, Смесью бактерий и фитопрепаратами (№№ 1, 4 и 5). Следует отметить, что содержание МБ на протяжении вегетационного сезона было ниже в контрольной почве и в вариантах с фитопрепаратами (рис. 1, табл. 1). Установлено, что на величины МБ и БД наибольшее влияние оказывала температура и влажность почвы ( $r = 0.6$  и  $-0.6$ , соответственно), что согласуется с результатами других исследований (Стольников и др., 2011).

Значения  $q\text{CO}_2$  почвы в первые два месяца вегетационного сезона (июнь–июль) были достаточно высокими и составили 36 в контроле, 42 и

35  $\text{мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \text{ С}_{\text{мик}} \text{ ч}^{-1}$  в вариантах с фитопрепаратами и микроорганизмами, соответственно. Высокие значения коэффициента удельного дыхания могут свидетельствовать о нарушении функционирования микробных сообществ, низкой эффективности использования субстрата (или его малых дозах), микробном стрессе (Ананьева и др., 2009). К сентябрю значения  $q\text{CO}_2$  в почве снизились в среднем в 1.5–2 раза по сравнению с июнем, причем они были наименьшими в вариантах с микроорганизмами и фитопрепаратами (23 и 20  $\text{мкг С-СО}_2 \text{ мг}^{-1} \text{ С}_{\text{мик}} \text{ ч}^{-1}$  (табл. 1).

Таким образом, уменьшение  $q\text{CO}_2$  в почве под посевами сосны обыкновенной может свидетельствовать, о том что микробное сообщество “стремится” к восстановлению экофизиологической “нормы”, причем этот процесс протекает более интенсивно в вариантах с внесением в почву микробов-антагонистов и фитопрепаратов, чем в контроле.

Результаты исследования показали изменение активности гидролаз почвы для разных вариантов опыта и в течение вегетации (табл. 3). Инвертаза катализирует гидролитическое расщепление сахарозы, что может в большей степени отражать плодородие и биологическую активность почв (Хазиев, 2005). В изучаемых нами вариантах активность инвертазы в июне (исключение составляет Смесь бактерий) возросла в 1.5 и 1.3 раза по сравнению с фоном и контролем соответственно.

**Таблица 3.** Ферментативная активность и коэффициент гумификации (усредненные данные за вегетационный период) темно-серой почвы питомника в разных вариантах обработки 2016 г.

Вариант	Инвертаза	Фосфатаза	Уреаза	Полифенол оксидаза	Пероксидаза	$K_{гум}$
Фон (исходные условия)	50.02	1.7	1.53	0.17	0.20	0.9
Контроль (Н <sub>2</sub> О)	61.2	1.6	1.7	0.3	0.15	1.9
ФП1	84.8	1.6	2.3	0.4	0.22	1.8
ФП2	80.6	1.4	2.3	0.4	0.27	1.4
ФП3	69.8	1.2	2.4	0.4	0.29	1.5
ФП4	79.0	1.2	1.9	0.4	0.30	1.3
ФП5	69.3	1.2	1.6	0.4	0.29	1.3
<i>Trichoderma harzianum</i>	73.0	1.9	1.9	0.3	0.28	1.2
<i>T. longibrachiatum</i>	73.5	1.8	2.2	0.4	0.23	1.59
Смесь микромицетов	76.7	1.5	1.7	0.4	0.18	2.3
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	78.35	1.4	1.3	0.3	0.28	1.2
Смесь бактерий	50.9	1.8	1.3	0.32	0.31	1.1

Примечание.  $K_{гум}$  – коэффициент гумификации (полифенолоксидаза : пероксидаза).

В сентябре при обработке семян сосны *B. amyloliquefaciens* и *T. harzianum* активность инвертазы возросла на 24 и 29%, а при обработке ФП2 и ФП4 – на 6 и 15%, соответственно. Отмечена обратная корреляционная связь между активностью инвертазы и численностью копиотрофов ( $r = -0.5$ ) и олиготрофов ( $r = -0.7$ ). Активность инвертазы была также связана с температурой и влажностью почвы ( $r = -0.5$  и  $0.5$  соответственно), что согласуется с исследованиями (Trasar-Cerpeda et al., 2008).

В исследуемой почве активность фосфатазы к концу вегетации (сентябрь) увеличилась на 50% в контроле и вариантах с фитопрепаратами (№№ 2–4) на 69, 14 и 17%, в вариантах с микроорганизмами (*T. longibrachiatum*, *B. amyloliquefaciens*, Смесь бактерий) – на 50 и 33% (табл. 3). Это может свидетельствовать об ускорении процессов мобилизации фосфора в почве и, тем самым, улучшении питания растений.

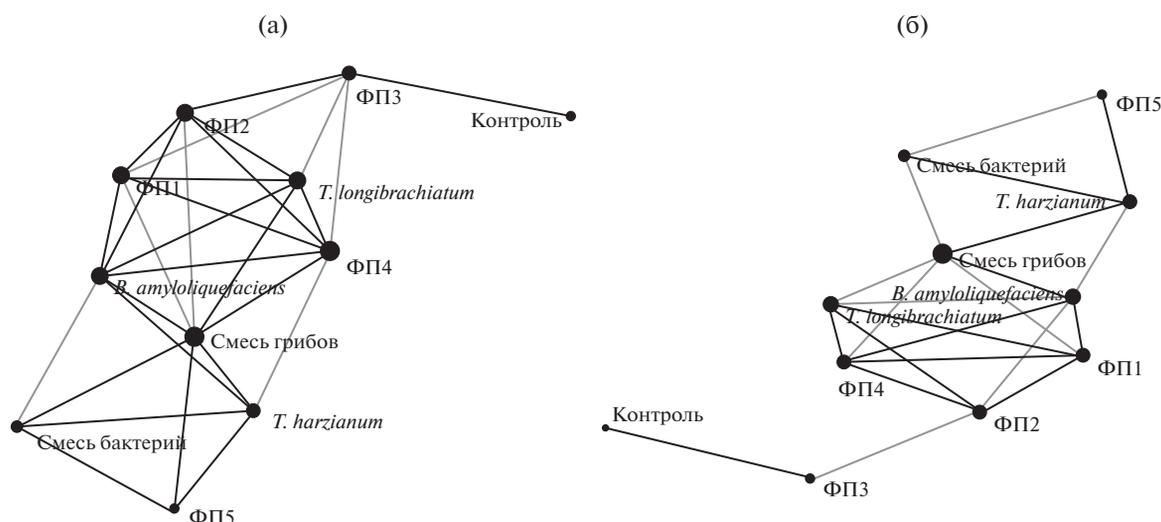
Через месяц после посева семян сосны активность уреазы в среднем увеличилась по сравнению с фоном на: 30% в контроле, 34% – при обработке фитопрепаратами, 19% – микромицетами и 2% – бактериями. Активность этого фермента в сентябре снизилась в почве опытных вариантов в среднем на 27%. Исключение составили варианты с ФП4 и Смесью микромицетов, в которых активность фермента увеличилась на 15 и 48%.

На скорость гидролиза мочевины в почве влияла температура ( $r = -0.5$  – в июне и  $r = 0.5$  – в сентябре). Это согласуется с другими исследованиями, отмечавшими аналогичную тенденцию (Cortez et al., 1972). Прослеживается тенденция

обратной связи активности уреазы с биомассой микроорганизмов в почве, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции между уреазой и МБ ( $r = -0.5$ ,  $p \leq 0.05$ ). Выявлена также корреляция между активностью уреазы и другими ферментами при обработках семян микромицетами (с инвертазой –  $r = -0.9$ , с ПФО –  $r = -0.8$ ), фитопрепаратами (с инвертазой –  $r = -0.6$ ) и бактериями (с ПФО и ПО –  $r = -0.98$ ).

Обработка семян сосны фитопрепаратами и микроорганизмами оказала положительное влияние на активность ПФО в почве. Так, через месяц после посева семян сосны активность этого фермента увеличилась во всех вариантах опыта по сравнению с фоном в 2 раза (табл. 3). Наиболее эффективными вариантами были ФП3, ФП5 и *B. amyloliquefaciens*. К сентябрю активность ПФО снизилась в контрольном варианте на 45%, в вариантах с микроорганизмами на 22%, в то время как в вариантах с фитопрепаратами осталась на том же уровне, что и в начале вегетации. На активность фермента также оказывали влияние влажность и содержание МБ ( $r = 0.6$  и  $0.5$ ).

Несколько иная картина изменения ферментативной активности почв на фоне фитопрепаратов отмечалась для пероксидазы. В июне активность ПО увеличивалась при обработке микроорганизмами и фитопрепаратами на 13 и 10%, в контроле понизилась на 46% по сравнению с фоном. В сентябре активность фермента при обработке микроорганизмами и фитопрепаратами возросла в 1.5 раза по сравнению с июнем и прямо коррелировала с содержанием микробной биомассы ( $r = 0.7$ ) и численностью олиготрофов ( $r = 0.5$ ).



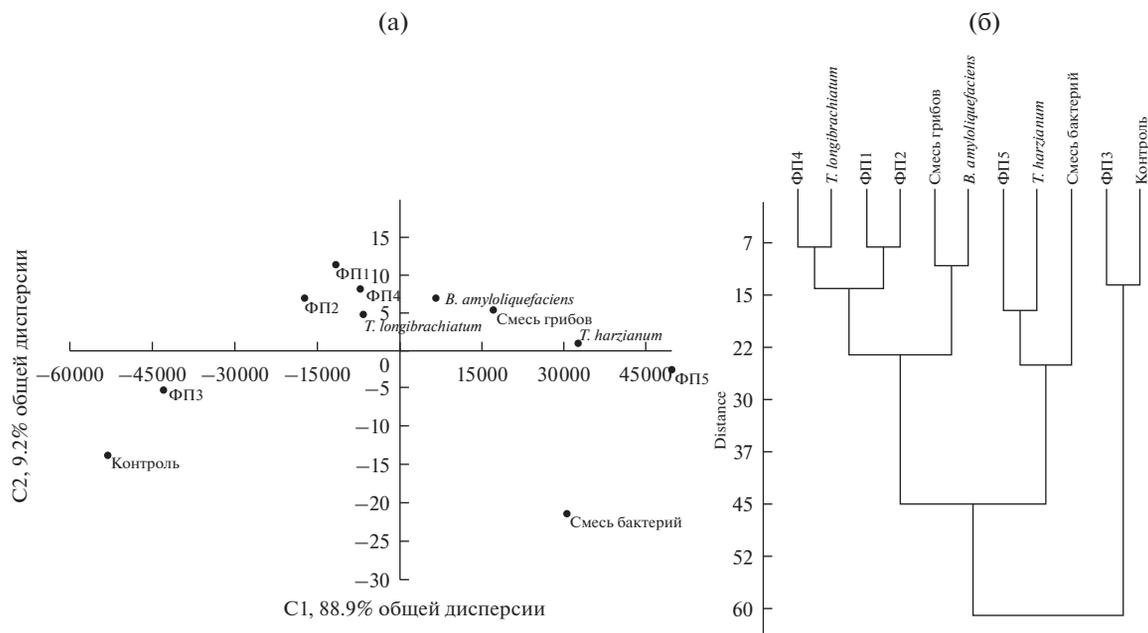
**Рис. 2.** Влияние способов обработки семян сосны на распределение биологических показателей почвы в зависимости от процента сходства между ними: (а) – при выборе в 60%; (б) – распределение вариантов обработки семян сосны при 70% сходства между ними.

О преобладании катализируемых процессов в почве и синтезе собственно органического вещества судят по коэффициенту гумификации (Chertov et al., 2007). Исследования показали, что  $K_{гум}$  после внесения в почву с семенами сосны микроорганизмов и фитопрепаратов был выше такового в изначальной (фоновой) почве в 2 раза, это свидетельствует о повышении интенсивности переработки органических веществ и синтезе гуминовых и фульвокислот после посева семян сосны обыкновенной (Титова, Козлов, 2012). В исследуемой почве не было отмечено достоверной разницы между  $K_{гум}$  в вариантах с фитопрепаратами и микроорганизмами; в среднем он составлял 1.9 в июне и 1.1 – в сентябре (табл. 3).

Таким образом, внесение в почву микроорганизмов-антагонистов и фитопрепаратов с семенами сосны обыкновенной способствовало увеличению активности ферментов класса гидролаз (инвертаза, уреазы, фосфатаза) и оксидоредуктаз (полифенолоксидаза, пероксидаза) по сравнению с фоном. Обработка семян сосны микромицетами способствовала увеличению активности всех исследуемых ферментов (гидролаз и оксидоредуктаз), а бактериями – инвертазы, ПФО и ПО. Увеличение активности этих ферментов свидетельствует о сдвиге окислительно-восстановительных процессов, способствующих интенсивной переработке сахаров и фенолов в почве. Схожая тенденция отмечалась при обработке семян фитопрепаратами, в этом случае увеличивалась и активность уреазы. Наибольшее влияние на активность ферментов оказывала обработка штаммами-антагонистами *B. amyloliquefaciens*, *T. harzianum* и фитопрепаратами №№ 1, 2 и 4.

Анализ экспериментальных данных (Network plot, сети сходства) при 60% схожести выявил, что варианты обработки семян сосны по совокупности почвенных параметров разделились на две группы: первая – ФП5, *T. harzianum*, Смесь бактерий, вторая – ФП1, ФП2, ФП4 и *T. longibrachiatum* (рис. 2а). Сходство между вариантами обработки (узлами) в пределах этих групп выражено толщиной линий (ребер) связывающих их, что отражено графически на рис. 2а. Контроль находится на значительном расстоянии от других вариантов опыта (узлов) и не связан с ними графическими линиями (кроме ФП3). При увеличении процента схожести между исследуемыми вариантами до 70% наблюдается “выбивание” варианта ФП3 из общей сети (рис. 2б). Следовательно, наименьший эффект на показатели продуктивности почвы оказал вариант ФП3 по сравнению с другими ФП. Кроме того, при 70% схожести всех вариантов обработки семян еще четче выделяются две группы: ФП5–*T. harzianum*–Смесь бактерий и ФП1–ФП2–ФП4–*T. longibrachiatum*, что подтверждает единообразное их влияние на почвенные параметры (МБ, БД, ЭКТГМ, рН и др.).

Результаты анализа Network plot были подтверждены кластерным анализом и методом главных компонент (рис. 3а, 3б). Показано, что массив данных, описывающий почвенные параметры в вариантах с внесением антагонистов или фитопрепаратов, образует конфигурацию “облако”, что свидетельствует об их однородности, в то время как варианты “контроль” и “ФП3” выявляются как “выбросы”, являясь более изолированными кластерами (рис. 3а). Вертикальная дендрограмма (кластерный анализ) иллюстрирует объединение в один кластер вариантов обра-



**Рис. 3.** Распределение биологических параметров почвы в зависимости от вариантов обработки семян сосны (а) — в разных плоскостях главных компонент; (б) — вертикальная древовидная диаграмма кластерного анализа расположения биологических показателей почвы при разных вариантах обработки семян сосны обыкновенной.

ботки ФП4 и *T. longibrachiatum*, ФП1 и ФП2 уже на втором шаге (на первом шаге каждое наблюдение представляет один кластер, вертикальная линия), что свидетельствует о наличии наибольшей схожести между ними — меньшее расстояние (рис. 3б). На третьем шаге объединяются в кластеры варианты “Смесь грибов” и “*B. amyloliquefaciens*”, затем варианты “ФП3” — “Контроль” и “ФП5” — “*T. harzianum*”, на следующем шаге они образуют один большой общий кластер. Тот факт, что варианты “ФП3” и “Контроль” входят в этот большой кластер последними, подтверждает наличие существенных отличий почвенных условий в вариантах “ФП3” и “Контроль”.

Таким образом, внесение в почву микроорганизмов-антагонистов и фитопрепаратов способствовало увеличению содержания микробной биомассы, численности микроорганизмов, осуществляющих трансформацию органического вещества, и ферментативной активности, которое в то же время сопровождалось уменьшением интенсивности микробного (базального) дыхания и удельного дыхания микробной биомассы (метаболического коэффициента). Внесение изученных микробных популяций в почву позволит увеличить продуктивность искусственно созданных фитоценозов, что, несомненно, улучшит качество и устойчивость лесопосадочного материала. К тому же восстановление деградированных почв лесных питомников путем внесения микроорганизмов-антагонистов с семенами хвойных дере-

вьев будет соответствовать требованиям их экологичности, экономичности и безопасности.

## ВЫВОДЫ

1. Обработка семян сосны обыкновенной микроорганизмами (*T. harzianum*, *B. amyloliquefaciens*) и фитопрепаратом на основе шелухи гречихи (ФП1) способствовала увеличению их всхожести и сохранности семян по сравнению с контролем в среднем на 25%.

2. Внесение бактерий (*B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*), микромицетов (*T. harzianum*, *T. longibrachiatum*) и фитопрепаратов (№№ 1, 2, 4) с семенами сосны увеличивало в почве питомника содержание микробной биомассы, численность микроорганизмов и активность ферментов в среднем в 1.4–2.2 раза по сравнению с контролем.

3. В почве исследуемых участков на протяжении периода вегетации доминировала олиготрофная группа микроорганизмов, что может свидетельствовать о снижении интенсивности микробной минерализации органического вещества.

4. Внесение Смеси бактерий, *B. amyloliquefaciens*, *T. longibrachiatum* и фитопрепаратов (№№ 1, 3, 4) способствовало снижению удельного дыхания микробной биомассы, что может иллюстрировать “восстановление” функционирования микробного сообщества почвы опытного питомника.

Полученные данные могут быть использованы в практике лесного хозяйства для восстановления

антропогенно-нарушенных или деградированных почв лесных фитоценозов. Авторы рекомендуют применять микроорганизмы-антагонисты в качестве биологических агентов, способных повышать грунтовую всхожесть семян, стимулировать рост и развитие сеянцев хвойных, увеличивать их сохранность, снижать вредоносность фитопатогенов, улучшать биологическую активность почв, что позволит повысить качество лесопосадочного материала в лесных питомниках Сибири.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.
- Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г.* Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.
- Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольникова Е.В.* Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.
- Антонов Г.И., Сорокин Н.Д., Барченков А.П., Кондакова О.Э.* Оптимизация лесовыращивания с использованием биоконверсии древесно-опилочной массы в условиях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2018. № 1. С. 56–64.
- Гродницкая И.Д., Сорокин Н.Д.* Внесение микробов-интродуцентов в лесные почвы питомников Сибири // Почвоведение. 2007. № 3. С. 359–364.
- Громоных Т.И., Литовка Ю.А., Андреева О.Н., Прудникова С.В., Корянова Т.А.* Возбудители фузариоза в питомниках Красноярского края // Лесоведение. 2002. № 6. С. 68–71.
- Кондакова О.Э., Гродницкая И.Д.* Оценка биологической активности музейных культур микроорганизмов-антагонистов и их использование для предпосевной обработки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) *in vitro* // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 42. С. 54–68.
- Методы оценки бактериального разнообразия почв и идентификация почвенных бактерий / Под ред. Лысак А.В. М.: Макс-Пресс, 2003. 120 с.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во Московского университета, 1991. 303 с.
- Мишустин Е.Н., Емцев В.Т.* Микробиология. М.: Агропромиздат, 1987. 368 с.
- Новосельцева А.И., Смирнов В.А.* Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром., 1983. 280 с.
- Практикум по микробиологии / Под ред. Нетрусова А.И. М.: Academia, 2005. 603 с.
- Рожанская О.А., Королев К.Г., Ломовский О.И., Юдина Н.В., Сероклинов Г.В.* Регуляция морфогенеза нута (*Cicer arietinum* L.) продуктами механической активации и электромагнитными излучениями // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2007. № 9. С. 45–50.
- Сорокин Н.Д., Гродницкая И.Д., Шапченкова О.А., Евграфова С.Ю.* Экспериментальная оценка устойчивости почвенного микробиоценоза при химическом загрязнении // Почвоведение. 2009. № 6. С. 701–707.
- Стольникова Е.В., Ананьева Н.Д., Чернова О.В.* Микробная биомасса, ее активность и структура в почвах старовозрастных лесов европейской территории России // Почвоведение. 2011. № 4. С. 479–494.
- Титова В.И., Козлов А.В.* Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества // Изд-во Нижегородская с.-х. академия. Нижний Новгород: 2012. 64 с.
- Фомина Н.В., Демиденко Г.А., Сорокин Н.Д.* Эколого-микробиологический мониторинг почвы лесного питомника Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2006. № 10. С. 146–152.
- Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1978. V. 10. № 3. P. 314–322.
- Anderson T.H., Domsch K.H.* Application of ecophysiological quotients ( $qCO_2$  and  $qD$ ) on microbial biomasses from soils of different cropping histories // Soil Biology and Biochemistry. 1990. V. 22. № 2. P. 251–255.
- Baset M.A., Shamsuddin Z.H., Wahab Z., Marziah M.* Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth and nitrogen incorporation of tissue-cultured *Musa* plantlets under nitrogen-free hydroponics condition // Australian J. Crop Science. 2010. № 4(2). P. 85–90.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A.* Analysis of the dynamics of plant residue mineralization and humification in soil // Eurasian Soil Science. 2007. V. 40. № 2. P. 140–148.
- Cortez J., Lossaint P., Billes G.* Biological activity of soils in the Mediterranean ecosystems // III Enzymatic activities. Review of Ecology. 1972. № 9. P. 1–2.
- Gibbs P.A., Chambers B.J., Chaudri A.M.* Initial results from long-term field studies at three sites on the effects of heavy metal-amended liquid sludges on soil microbial activity // Soil Use Manag. 2006. V. 22. № 2. P. 180–187.
- Harris J.A.* Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration // European J. Soil Science. 2003. V. 54. P. 801–808.
- Rovira A.D., Macura J., Vancura V.* Effects of *Azotobacter*, *Bacillus* and *Clostridium* on the growth of wheat // Plant Microbes Relationships. 1965. P. 193–200.
- Solevic T., Novakovic M., Ilic M., Antic M., Vrvic M.M., Jovanicevic B.* Investigation of the bioremediation potential of aerobic zymogenous microorganisms in soil for crude oil biodegradation // Journal of the Serbian Chemical Society. 2011. V. 76. P. 425–438.
- Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Gil-Sotres F.* Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality // Soil Biology Biochemistry. 2008. V. 40. P. 2146–2155.

## The Effect of Treatment of Scots Pine Seeds by Microorganisms and Phytopreparations on the Seedling Safety and Soil Properties in a Forest Nursery

O. E. Pashkeeva<sup>1,\*</sup>, I. D. Grodnitskaya<sup>1</sup>, G. I. Antonov<sup>1</sup>, O. I. Lomovsky<sup>2</sup>, and I. I. Gaidasheva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sukachev Institute of Forest of SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>2</sup>Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Kutateladze, 18, Novosibirsk, 630128 Russia

<sup>3</sup>Siberian federal university, prospect Svobodnii, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia

\*E-mail: koeandkoe@mail.ru

The studies were carried out on the experimental farm "Pogorelsky bor" of the Sukachev Institute of Forest, SB RAS. The effect of pre-sowing treatment of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L.) by aqueous suspensions of indigenous microorganisms with antagonistic activity towards phytopathogens and phytopreparations obtained from plant materials on soil biogenicity (microbial biomass and enzymatic activity) and safety of coniferous seedlings was studied in model field experiments. Strains of micromycetes *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma longibrachiatum*, *Trichoderma lignorum* and their mixture (*T. harzianum*, *T. longibrachiatum*, *T. lignorum*); Bacteria *Bacillus amyloliquefaciens*, their mixture (*B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *Pseudomonas* sp.), five phytopreparations were variants of Scots pine seed treatments. It was shown that the pre-sowing treatment of Scots pine seeds contributed to the improvement of their germination, preservation of seedlings by the end of the vegetation season, and improved morphometric parameters of the seedlings compared with the control by 24.5% on the average. The bacteria and micromycetes introduced with the seeds increased the productivity and biogenicity of the forest nursery soil by 1.3–2.0 times. It was established that the oligotrophic group of microorganisms prevailed in the control soil throughout the vegetation season, while the hydrolytic-copytrophic group of microorganisms prevailed after the treatment of Scots pine seeds with microorganisms and phytopreparations two months after sowing seeds. The introduction of antagonist microbes (*B. amyloliquefaciens*, *T. longibrachiatum*, and a mixture of bacteria) and phytopreparations also favorably affected the restoration of the ecophysiological norm of functioning of the soil microbial community (returning the value of the microbial metabolic coefficient to the background ones). A 2-fold decrease in the values of the microbial metabolic coefficient ( $q\text{CO}_2$ ) was observed in the soil of the studied areas. The obtained results can be recommended for using in forestry practice when growing coniferous seedlings.

*Keywords:* Krasnoyarsk forest-steppe, conifer seedlings, experimental forest nursery, antagonist microorganisms, phytopreparations, mechanochemical processing of plant materials.

### REFERENCES

- Anan'eva N.D., *Mikrobiologicheskie aspekty samoochishcheniya i ustoychivosti pochvy* (Microbiological aspects of soil self-purification and stability), M.: Nauka, 2003, 222 p.
- Anan'eva N.D., Sus'yan E.A., Gavrilenko E.G., Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 11, pp. 1215–1221.
- Anan'eva N.D., Sus'yan E.A., Ryzhova I.M., Bocharnikova E.O., Stol'nikova E.V., Microbial biomass carbon and the microbial carbon dioxide production by soddy-podzolic soils in postagrogenic biogeocenoses and in native spruce forests of the southern taiga (Kostroma oblast), *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 9, pp. 1029–1037.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H., A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, pp. 215–221.
- Anderson T.-H., Domsch K.H., Application of eco-physiological quotients  $q\text{CO}_2$  and  $q\text{D}$  on microbial biomasses from soils of different cropping histories, *Soil biology and biochemistry*, 1990, Vol. 22, No. 2, pp. 251–255.
- Antonov G.I., Sorokin N.D., Barchenkov A.P., Kondakova O.E., Optimizatsiya lesovyrashchivaniya s ispol'zovaniem biokonversii drevessno-opilochnoi massy v usloviyakh Krasnoyarskoi lesostepi (Optimisation of silviculture using bioconversion of sawdust pulp in Krasnoyarsk forest-steppe), *Lesovedenie*, 2018, No. 1, pp. 56–64.
- Baset M.A., Shamsuddin Z.H., Wahab Z., Marziah M., Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth and nitrogen incorporation of tissue-cultured *Musa* plantlets under nitrogen-free hydroponics condition, *Australian J. Crop Science*, 2010, No. 4(2), pp. 85–90.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Analysis of the dynamics of plant residue mineralization and humification in soil, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 2, pp. 140–148.
- Cortez J., Lossaint P., Billes G., Biological activity of soils in the Mediterranean ecosystems, *III Enzymatic activities. Review of Ecology*, 1972, No. 9, pp. 1–2.
- Fomina N.V., Demidenko G.A., Sorokin N.D., Ekologomikrobiologicheskii monitoring pochvy lesnogo pitomnika Krasnoyarskogo kraja (Ecological and microbiological monitoring of the soil of the forest nursery of Krasnoyarsk region), *Vestnik KrasGAU*, 2006, No. 10, pp. 146–152.
- Gibbs P.A., Chambers B.J., Chaudri A.M., Initial results from long-term field studies at three sites on the effects of heavy metal-amended liquid sludges on soil microbial activity, *Soil Use Manag.*, 2006, Vol. 22, No. 2, pp. 180–187.

- Grodnitskaya I.D., Sorokin N.D., Application of microbes to the soils of Siberian tree nurseries, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 3, pp. 329–334.
- Gromovykh T.I., Litovka Y.A., Andreeva O.N., Prudnikova S.V., Koryanova T.A., Vozbuditeli fuzarioza v pitomnikakh Krasnoyarskogo kraia (Fusarium causative agents in nurseries of the Krasnoyarsk Territory), *Lesovedenie*, 2002, No. 6, pp. 68–71.
- Harris J.A., Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration, *European J. Soil Science*, 2003, Vol. 54, pp. 801–808.
- Khaziev F.K., *Metody pochvennoi enzimologii* (Methods of soil enzymology), M.: Nauka, 2005, 251 p.
- Kondakova O.E., Grodnitskaya I.D., Otsenka biologicheskoi aktivnosti muzeinykh kul'tur mikroorganizmov-antagonistov i ikh ispol'zovanie dlya predposevnoi obrabotki semyan sosny obyknovЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L.) in vitro (Biological activity assessment of museum cultures of antagonist microorganisms and their use for presowing treatment of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L.) (in vitro)), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2018, No. 42, pp. 54–68.
- Metody otsenki bakterial'nogo raznoobraziya pochv i identifikatsiya pochvennykh bakterii* (Methods for assessing bacterial diversity of soils and identification of soil bacteria), M.: Maks-Press, 2003, 120 p.
- Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii*, (Methods of soil microbiology and biochemistry), M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1991, 303 p.
- Mishustin E.N., Emtsev V.T., *Mikrobiologiya* (Microbiology), M.: Agropromizdat, 1987, 368 p.
- Novosel'tseva A.I., Smirnov V.A., *Spravochnik po lesnym pitomnikam* (Handbook of forest nurseries), M.: Lesn. prom., 1983, 280 p.
- Praktikum po mikrobiologii* (Practicum in microbiology), M.: Akademiya, 2005, 603 p.
- Rovira A.D., Macura J., Vancura V., Effects of Azotobacter, Bacillus and Clostridium on the growth of wheat, *Plant Microbes Relationships*, 1965, pp. 193–200.
- Rozhanskaya O.A., Korolev K.G., Lomovskii O.I., Yudin N.V., Seroklinov G.V., Regulyatsiya morfogeneza nuta (*Cicer arietinum* L.) produktami mekhanicheskoi aktivatsii i elektromagnitnymi izluchenyami (Regulation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) morphogenesis by means of mechano-activated materials and electromagnetic radiation), *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2007, No. 9, pp. 45–50.
- Solevic T., Novakovic M., Ilic M., Antic M., Vrvic M.M., Jovancevic B., Investigation of the bioremediation potential of aerobic zymogenous microorganisms in soil for crude oil biodegradation, *J. Serbian Chemical Society*, 2011, Vol. 76, pp. 425–438.
- Sorokin N.D., Grodnitskaya I.D., Shapchenkova O.A., Evgrafova S.Y., Experimental assessment of the microbocenosis stability in chemically polluted soils, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 6, pp. 650–656.
- Stolnikova E.V., Ananyeva N.D., Chernova O.V., The microbial biomass and its activity and structure in the soils of old forests in the European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 4, pp. 437–452.
- Titova V.I., Kozlov A.V., *Metody otsenki funktsionirovaniya mikrobotsenoza pochvy, uchastvuyushchego v transformatsii organicheskogo veshchestva* (Methods for assessing the functioning of soil microbocenosis involved in the transformation of organic matter), Nizhny Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskaya s.-kh. akademiya, 2012, 64 p.
- Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Gil-Sotres F., Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality, *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, Vol. 40, No. 9, pp. 2146–2155.

УДК 631.433.3

## ЭФФЕКТЫ ФИТОГЕННОГО ПОЛЯ СОСНЫ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2021 г. О. В. Трефилова<sup>а</sup>\*, И. П. Беланов<sup>б</sup>, В. И. Уфимцев<sup>с</sup>, Д. Ю. Ефимов<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,  
просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037 Россия

<sup>б</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, просп. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630099 Россия

<sup>с</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
Ленинградский просп., 10, Кемерово, 650065 Россия

<sup>д</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,  
пос. Борок, 109, Некоузский р-н, Ярославская обл., 152742 Россия

\*E-mail: ovtrefilova\_ilsoran@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2018 г.

После доработки 27.07.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В рамках настоящей работы предпринята попытка оценить характер (однотипность или уникальность) влияния дерева на почвы в различных климатических условиях. Для достижения цели исследования подобрана серия опорных полигонов, где одна и та же древесная порода – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – развивается в разных эколого-географических районах (ЭГР): остепненном; северном лесостепном и среднегорном таежном, но в условиях близкого эдафического фона. Формирование насаждений происходит на слаборазвитых почвах отвалов. Это молодые почвы, для которых процессы формирования “педопамяти” (по Таргульяну) только запускаются, что позволило оценивать непосредственное влияние современного древостоя на почвы. Методологической основой работы служит концепция фитогенного поля (ФП). Показано, что влияние отдельно стоящего дерева сосны II класса возраста распространяется на 131–155 м<sup>2</sup> и только 10–13% данной площади находится в подкroновом пространстве – зоне максимального воздействия источника ФП. Сопоставление степени проявления прямых и косвенных эффектов ФП (параметры радиально-концентрического рисунка ФП, степень освещенности, запас лесной подстилки и фитомассы, интенсивность почвенного дыхания, температура и влажность почвы) и корреляционный анализ биогенных и абиогенных параметров позволяют сделать вывод о неоднотипности влияния сосны на молодые почвы угольных отвалов при разной степени увлажнения. Радиально-концентрические рисунки проекции изучаемых фитогенных полей различаются по площади прикроновой зоны. Увеличение площади прикроновой зоны в избыточно увлажненном среднегорно-таежном ЭГР позволяет предполагать, что воздействие сосны на почвы отвалов в этих условиях проявляется более интенсивно.

*Ключевые слова:* фитогенное поле, рекультивация промышленных отвалов, взаимодействие “лес – почва”, дыхание почв, лесная подстилка, культуры сосны.

DOI: 10.31857/S0024114821020091

Исследования различных аспектов взаимодействия в системе “лес – почва” имеют более чем вековую историю (Binkley, 1995). Возросший в последнее время интерес к данной проблеме во многом является следствием развития биогеоэкологического направления в почвоведении (Головенко, 1977; Смагин, 1989, 1996; Федорев и др., 2006; Карпачевский и др., 2007; Бобровский, 2010; Лукина и др., 2010; и др.). С позиции данного направления лесной фитоценоз рассматривается как пример мощного “давления жизни” (по В.И. Вернадскому) на биокосную материю. Именно в этих условиях можно ожидать наиболее силь-

ного проявления роли биотического фактора в почвообразовательном процессе, эволюции почв и почвенного покрова (Орловский, 1968; Зонн, 1983; Карпачевский и др., 2007; и др.).

Прижизненное направленное воздействие фитоценозов на среду прежде всего определяется материально-энергетическим метаболизмом (по: Дылис и др., 1964) формирующих его видов растений-эдификаторов. Изменение растением среды тем значительнее, чем крупнее это растение, и чем продолжительнее его влияние (Ястребов, Лычная, 1993; Nokkanen et al., 1995; Кожевников, 1998). Поэтому особое внимание исследователей

привлекают деревья, средообразующая роль которых хорошо выражена, усиливается в ходе роста растения и длительно существует (Самойлов, Тархова, 1993; Демьянов, 1996; Журавлёва и др., 2012).

Часть пространства, в пределах которого среда приобретает новые свойства, определяемые присутствием в ней особи конкретного вида, А.А. Уранов (1965) назвал “фитогенное поле” (ФП). Характеристики среды, которые изменяются в отклике на рост и развитие вида-эдификатора, и посредством трансформации, которых источник ФП контролирует видовой состав, продуктивность и пространственное распределение растений подчиненных ярусов, состав и численность беспозвоночных животных, грибов и бактерий, режимы и свойства почв – рассматриваются как эффекты ФП (Уранов, Михайлова, 1974; Кожевников, 1998).

Воздействие дерева на среду распространяется неравномерно в пределах ФП. Наиболее значимое влияние отдельно стоящего дерева, как правило, регистрируется в приствольном и подкромном пространствах, по мере удаления от ствола напряженность поля ослабевает (Уранов, Михайлова, 1974; Демьянов, 1980; Крышень, 2000; Ипатов, 2007; Ипатов и др., 2009). В структуре ФП, организованного градиентом напряженности воздействия эдификатора, как правило, выделяются радиально-концентрические круги, именуемые тессерами (Лукина и др., 2010), микрizonaми (Маслов, 1986; и др.) или зонами (Уфимцев и др., 2016). В сомкнутых насаждениях ФП деревьев перекрываются, а их радиально-концентрическая дифференциация оказывается ограниченной (Крышень, 2000).

Для обозначения участков, в пределах которых проявляется средообразующая роль деревьев, используются и другие термины: “экологическое поле” (Wu et al. 1985; Walker et al., 1989); “сфера средообразующего воздействия” (Работнов, 1984); “эда-сфера” (Быков, 1978) и т.д. По мнению большинства авторов, термин, предложенный А.А. Урановым, по сути, имеет тот же экологический смысл, синонимичен, но при этом он получил более широкое распространение и считается удобным (Кожевников, 1998; Крышень, 2000; Ипатов и др., 2009). Возможно, именно поэтому концепция ФП довольно активно развивается в настоящее время, обсуждается и формализуется ее теоретическая основа (Демьянов, 1996; Ястребов, 1996; Кожевников, 1998; Крышень, 2000; Жукова, 2012; Горелов, 2013; и др.). Более детальные сведения по истории и о современном состоянии изучения ФП представлены в работе Е.В. Черняевой и В.П. Викторова (2016).

Изначально концепция привлекалась только для изучения межвидовых взаимодействий растений и горизонтальной структуры фитоценозов, т.е. воздействие источника ФП оценивалось по поведению других видов или вида, так называемых растений-фитомеров (Уранов, Михайлова, 1974; Галанин, 1980; Маслов, 1986; Ястребов, Лычная, 1993). Позднее при изучении фитогенных полей предметом исследования стали и параметры среды (или эффекты ФП), в том числе освещенность, количество осадков и опада, мощность подстилки, температура и влажность почвы, почвенные свойства (кислотность, концентрация обменных оснований, биологическая активность, содержание гумуса, азота и др.), трансформируя которые источник ФП влияет на соседние растения (Самойлов, 1983; Hokkanen et al., 1995; Finzi et al., 1998; Priha et al., 1999; Паркина, 2006; Пуртова, Зимица, 2007; Ипатов, 2007; Ипатов и др., 2009; Лебедева и др., 2009; Chodak, Niklińska, 2010; Журавлева и др., 2012; Прокушкин и др., 2004; и др.).

Применительно к изучению взаимодействий леса и почвы привлечение концепции ФП нельзя считать чем-то новым. Она перекликается с учением о парцеллярной структуре биогеоценоза, сформулированным Н.В. Дылисом с соавт. (1964) и получившим свое развитие в работах по почвоведению (Карпачевский, 1977, 1981; Ведрова, 1980; Федорев и др., 2006; Карпачевский и др., 2007; Лукина и др., 2010; и др.), а также и с теорией экологического поля (Wu et al., 1985; Walker et al., 1989).

Результаты наиболее всестороннего изучения вопросов влияния леса на почвы, в основном, получены при проведении полевых многолетних экспериментов. Таких экспериментов в мире не много. Наиболее известные из них: эксперименты с тремя древесными породами в Финляндии (Priha et al., 1999); шестью – в Дании (Vesterdal et al., 2008, 2012), четырнадцатью – в Польше (Reich et al., 2005); в России – это 100-летний опыт Н.В. Орловского с шестью породами в условиях одного эдафического фона (Shugalei, 2005; Vedrova, 2005; Меньяло, 2006; Ведрова, Решетникова, 2014; и др.) и эксперимент с географическими культурами сосны обыкновенной, дополнительно используемый для оценки влияния климатипов на трансформацию почвенных свойств (Наумова и др., 2009).

Все упомянутые эксперименты проводятся на почвах, имеющих многовековую историю почвообразования. Как справедливо замечает С.В. Зонн (1983), не всегда известно имеют ли почвы лесной генезис на всем протяжении своего формирова-

ния или стали лесными в результате поселения лесной растительности. Фактически, влияние древесных растений на свойства почв в таких условиях оценивается “от исходного” их состояния. При этом изучается воздействие древесных растений на почвы применительно к отдельно взятым условиям местообитания. В то же время остается не ясным, насколько однозначным окажется действие одного и того же вида растения на материнскую породу и почву в различных климатических условиях? Поставленный еще в работах С.В. Зонна (1954) вопрос не нашел исчерпывающего ответа и по мнению D. Binkley (1995) остается ключевым в развитии исследований взаимодействия компонентов системы “лес – почва”.

Приведенные ниже результаты получены в ходе исследований, где одна и та же древесная порода – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – развивается в разных климатических условиях. Спецификой постановки исследований служит формирование насаждений на почвах техногенных ландшафтов. В отличие от природных аналогов, их называют почвами с практически полностью трансформированной матрицей (Солнцева и др., 1990). Это молодые почвы, для которых процессы формирования “педопамяти” (Таргульян, 2008) только запускаются. При этом, начальная “точка отсчета” в их формировании известна, как и тип растительности, при котором развиваются почвообразовательные процессы.

Перед авторами стоял ряд задач: 1) Оценивая и сопоставляя эффекты фитогенного поля сосны, определить, в пределах какой площади поверхности проявляются влияние источника фитогенного поля; 2) Изучая направленность и интенсивность проявления эффектов фитогенного поля сосны, произрастающей в разных климатических условиях, оценить характер (однотипность или уникальность) влияния породы на почвы.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на территории Кузнецкой котловины, биогеографическая структура которой представлена чередованием степных, лесостепных и таежных районов. Неоднородность климатических условий здесь определяется меридиональной протяженностью горных систем Салаира и Кузнецкого Алатау (рис. 1), представляющих значимое орографическое препятствие для влажных воздушных масс, поступающих с северо- и юго-запада, и вызывающих конденсацию осадков на наветренных макросклонах (Трофимов, 1975). Таким образом, на сравнительно небольшом расстоянии для проведения исследова-

ний доступны различные по климатическим условиям районы (Экологическая карта ..., 1995).

Кроме того, в пределах Кузнецкой котловины активно ведется добыча угля открытым способом, что предполагает извлечение на дневную поверхность и складирование в отвалы пород, слабо затронутых процессами почвообразования. При восстановлении нарушенных земель в лесохозяйственном направлении отвалы рекультивируются без нанесения потенциально-плодородных и плодородных слоев почвы и, чаще всего, засаживаются культурами сосны обыкновенной (Уфимцев, 2017). Широкое использование древесной породы при искусственном лесовосстановлении на породных отвалах обусловлено ее высокой толерантностью к низкой трофности и слабой влагообеспеченности молодых почв (Уфимцев, 2017).

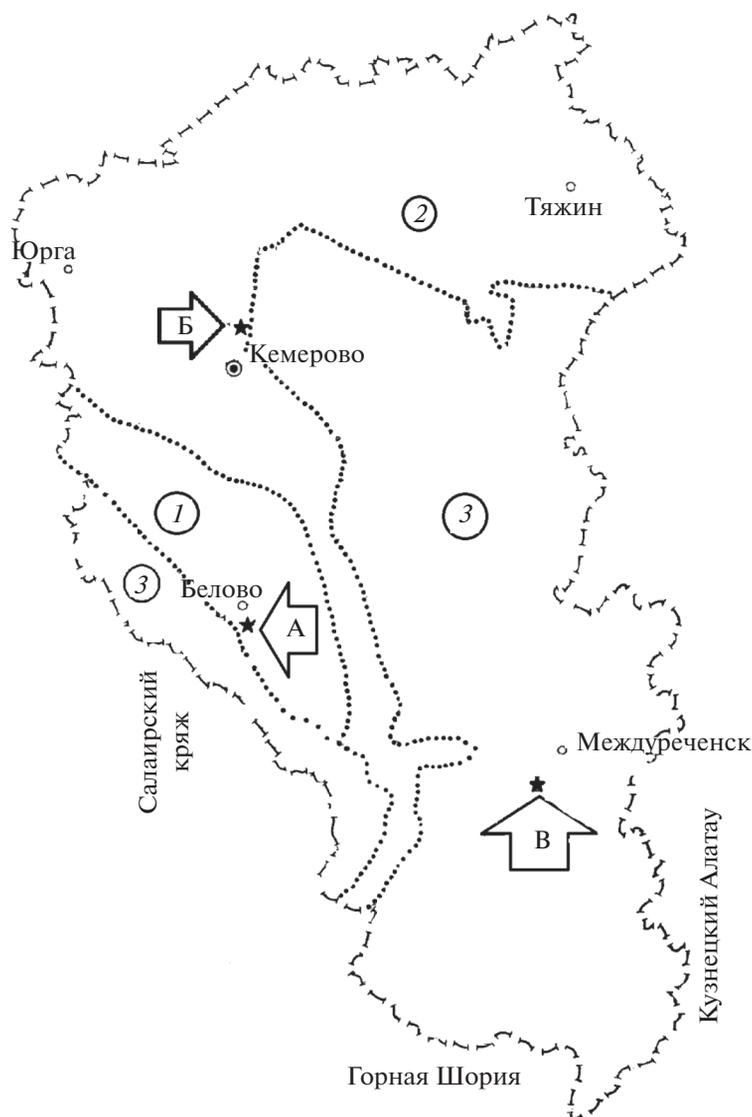
Таким образом, в пределах Кузнецкой котловины удалось подобрать опорные полигоны, которые характеризуют формирование искусственных сосновых биогеоценозов на слаборазвитых лесных почвах в различных эколого-географических районах (ЭГР): центральный остепненный (54°16'09" с.ш.; 86°09'00" в.д.) – “Бачатский”<sup>1</sup>; северный лесостепной (55°32'33" с.ш.; 86°04'11" в.д.) – “Кедровский” и среднегорный таежный (53°42'01" с.ш.; 88°06'27" в. д.) – “Красногорский” (рис. 1).

Для характеристики гидротермических условий опорных полигонов (рис. 2) привлекались значения среднесуточной температуры и осадков, фиксируемых на метеостанциях, ближайших к объектам исследования, за период 2012–2017 гг. (архив сайта <https://gp5.ru>). Анализ полученных параметров (рис. 2) подтверждает выше упомянутую особенность климата Кузнецкой котловины: при близких величинах суммы температур вегетационного периода, наблюдаются существенные различия ЭГР по сумме осадков. Рассчитанный по Г.Т. Селянинову гидротермический коэффициент (ГТК) для засушливых условий центрального остепненного ЭГР составил 1.0<sup>2</sup>, 1.4 – для северного лесостепного – умеренная степень увлажнения и 2.2 – в пределах среднегорно-таежного – избыточное увлажнение.

По результатам маршрутно-рекогносцировочных исследований растительного покрова анализируемых полигонов, подобраны массивы искусственных сосновых насаждений, соответствующие I–II классам бонитета, II классу возраста, I категории жизненного состояния. В пределах

<sup>1</sup> Опорные полигоны обозначены по названиям угольных разрезов, на отвалах которых проводились исследования.

<sup>2</sup> Градации гидроряды приняты по В.Р. Волобуеву (1963).



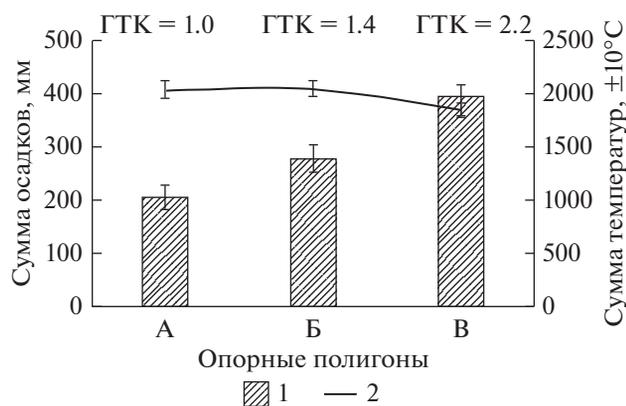
**Рис. 1.** Географическое положение опорных полигонов проведения исследований: “Бачатский” (А), “Кедровский” (Б), “Красногорский” (В), расположенных в различных ЭГР: центральном остепненном (1), северном лесостепном (2) и среднегорно-таежном (3).

каждого из них выбиралось 3 модельных дерева сосны обыкновенной. Таксационные параметры модельных деревьев опубликованы ранее (Уфимцев и др., 2016).

Для исключения мешающего влияния других деревьев исследования проводились на примере фитогенных полей, образованных отдельно стоящими деревьями сосны. Данное допущение считаем оправданным, поскольку исследования направлены (как сказано выше) на изучение эффектов ФП сосны на почвы в различных климатических условиях.

Согласно современной классификации (Классификация ..., 2004), с учетом системы таксономических единиц почв, составленной для почв

угольных отвалов Кемеровской области (Брагина, 2016), культуры изучаемых опорных полигонов формируются на гумусово-слаборазвитых, натечно-карбонатных, литостратных скелетно-гетерогенных техногенных петрозёмах. По результатам оценки ряда параметров эдафического фона петроземы, формирующиеся в различных ЭГР Кузнецкой котловины, мало различаются между собой. Аналогичные выводы сделаны П.С. Брагиной с соавт. (2014) при изучении слаборазвитых почв в различных районах Кузбасса. Это нейтральные и слабощелочные почвы (рН 7.2–7.9, коэффициент вариации –  $S.V. = 4\%$ ), легко- и среднесуглинистого гранулометрического состава. Содержание валового азота составляет 0.360–



**Рис. 2.** Гидротермические условия опорных полигонов: “Бачатский” (А), “Кедровский” (Б), “Красногорский” (В); 1 и 2 – соответственно, сумма средне многолетних осадков и температур периода вегетации. Приведены средние и их стандартные ошибки.

0.364%, фосфора и калия – варьирует от  $62 \pm 11$  до  $201 \pm 40$  мг  $\text{кг}^{-1}$  (С.И. = 42–48%) и от  $6 \pm 1$  до  $15 \pm 2$  мг  $\text{кг}^{-1}$  (С.И. = 26–44%) соответственно.

В практике изучения ФП нет единого мнения по процедуре выделения отдельных структурных единиц и их количества (Демьянов, 1980, 1996; Крышень, 2000). В пределах проекции радиально-концентрического рисунка ФП на поверхности почвы мы выделяли три отдельные зоны: подкороновую, прикороновую и внешнюю.

Внешние границы концентрических кругов подкороновой и прикороновой зон сосны визуально хорошо различимы по изменению характеристик напочвенного покрова (видовой состав, обилие и др.), а также градиенту распределения запасов подстилки. Радиусы зон измерялись в северном и южном направлениях. На основании полученных величин по формуле эллипса рассчитывали площади зон. Границу внешней зоны определяли по дальности распространения корней растения-эдификатора (Левичев, 1975; Демьянов, 1980). По данным (Орлов, Кошельков, 1971), горизонтальные корни сосны могут распространяться на расстояние в 3 раза большее радиуса кроны.

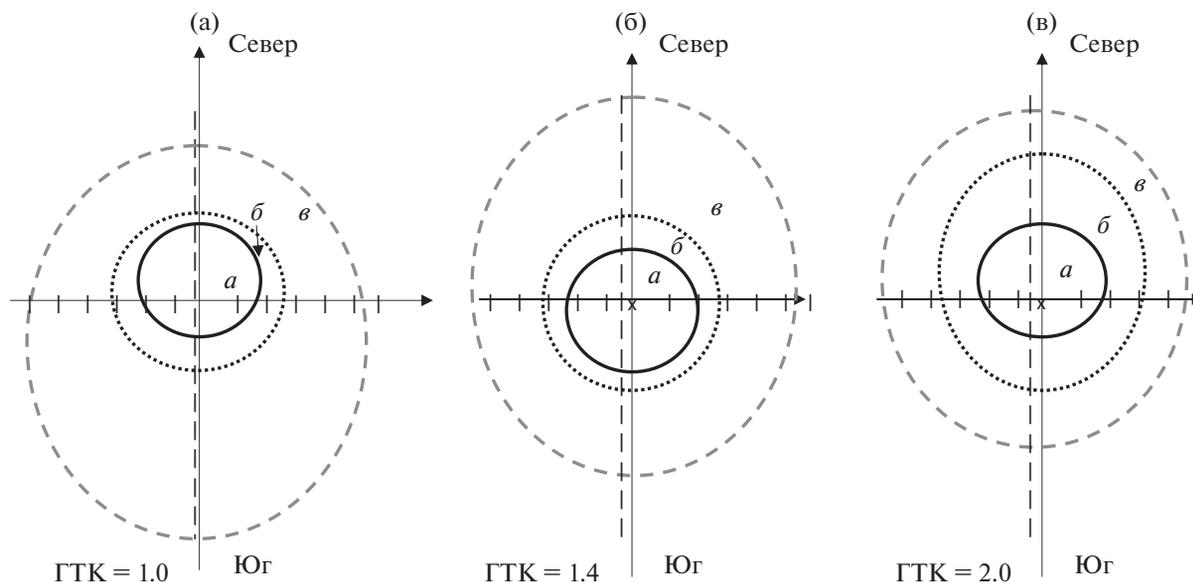
Несмотря на то, что по влиянию на почвы древесные растения в значительной степени превосходят травянистые (Журавлева и др., 2012), факт определённого влияния видов напочвенного покрова на свойства поверхностных почвенных горизонтов не отрицается (Бганцова, 1991; Карпачевский и др., 2007; Лебедева и др., 2009). По данным В.И. Уфимцева с соавт. (2016) напочвенный покров в пределах ФП изучаемых моделей сосны, несмотря на произрастание в различных ЭГР, характеризуется высокой мерой сходства.

Учитывая, что на начальных этапах эволюции почва находится в определяющей зависимости от внешних факторов, накапливает биогенную энергию и вещество (Смагин, 1996), логично предположить, что влияние сосны на почвы, прежде всего, будет проявляться в специфике радиального перераспределения органического вещества и пространственном градиенте интенсивности биологических процессов.

Чтобы определить (установить) различия в пространственном перераспределении фитомассы напочвенного покрова и детрита по зонам ФП модельных деревьев в различных климатических условиях, на радиальных трансектах в северном и южном направлениях от ствола сосны в трехкратной повторности для каждого направления отбирались укосы с учетной площадки  $30 \times 60$  см. Запасы подстилки сосредоточены только в подкороновой зоне, их также учитывали для северной и южной экспозиции ( $n = 3$ ) на площадках  $30 \times 30$  см. В лаборатории отобранные образцы высушивали, взвешивали. Запасы фитомассы (в абсолютно сухом веществе) пересчитывали на площадь соответствующих зон ФП.

Интенсивность почвенного дыхания, как интегрального показателя биологических процессов молодых почв проводили методом закрытых (статичных) камер объемом  $0.125 \text{ м}^3$ , площадки-основания для которых устанавливались в каждой зоне ФП в трехкратной повторности. Для предотвращения перегрева камеры ее поверхность покрывали фольгированным теплоизолирующим материалом. Площадка-основание камеры с водяным замком врезалась на глубину не менее 15 см, перед его установкой надземная фитомасса травяно-кустарничкового яруса предварительно скашивалась. На всех опорных полигонах замеры проводились в полдень при одинаковых погодных условиях. В камере устанавливался автоматический логгер-самописец SenseAir (Швеция), фиксирующий температуру воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) и концентрацию  $\text{CO}_2$ . Для создания равномерной газовой среды в камере был установлен портативный вентилятор. Время насыщения камеры составляло для каждого опыта 1 ч. В дальнейшем концентрацию  $\text{CO}_2$  рассчитывали по уравнению Клапейрона–Менделеева с учетом температуры газа непосредственно в момент измерения. Содержание влаги оценивали весовым методом в лаборатории. Для этого отбирались образцы почвы. Температура и влажность почвы фиксировалась для слоя 0–10 см.

Освещенность в пределах проекции ФП измерялась по подзонам Люксметром TESTO 540 (Германия).



**Рис. 3.** Схема радиально-концентрической проекции зон фитогенного поля ( $a$  – подкروновая,  $b$  – прикروновая и  $v$  – внешняя) для модельных деревьев изучаемых ЭГР: центральный остепненный (а), северный лесостепной (б) и среднегорный таежный (в). Представлены средние биометрические параметры фитогенных полей в масштабе 1 : 200 с учетом сторон света (север и юг).

Для зависимых количественных переменных (интенсивность почвенного дыхания, запас подстилки и фитомассы) рассчитывались стандартные статистики: среднее, медиана, ошибка среднего значения, стандартное отклонение, коэффициенты вариации.

Статистический анализ проводился с помощью программного пакета PAST (Hammer et al., 2001). Нормальность распределения оценивалась по критерию Шапиро–Уилка. Для этого критерия, а также при проведении однофакторного дисперсионного, рангового корреляционного анализа Спирмена, тестов сравнения дисперсий (Левена) и множественного сравнения средних (Тьюки) использовался уровень достоверности 0.05 (Кобзарь, 2006; McDonald, 2014).

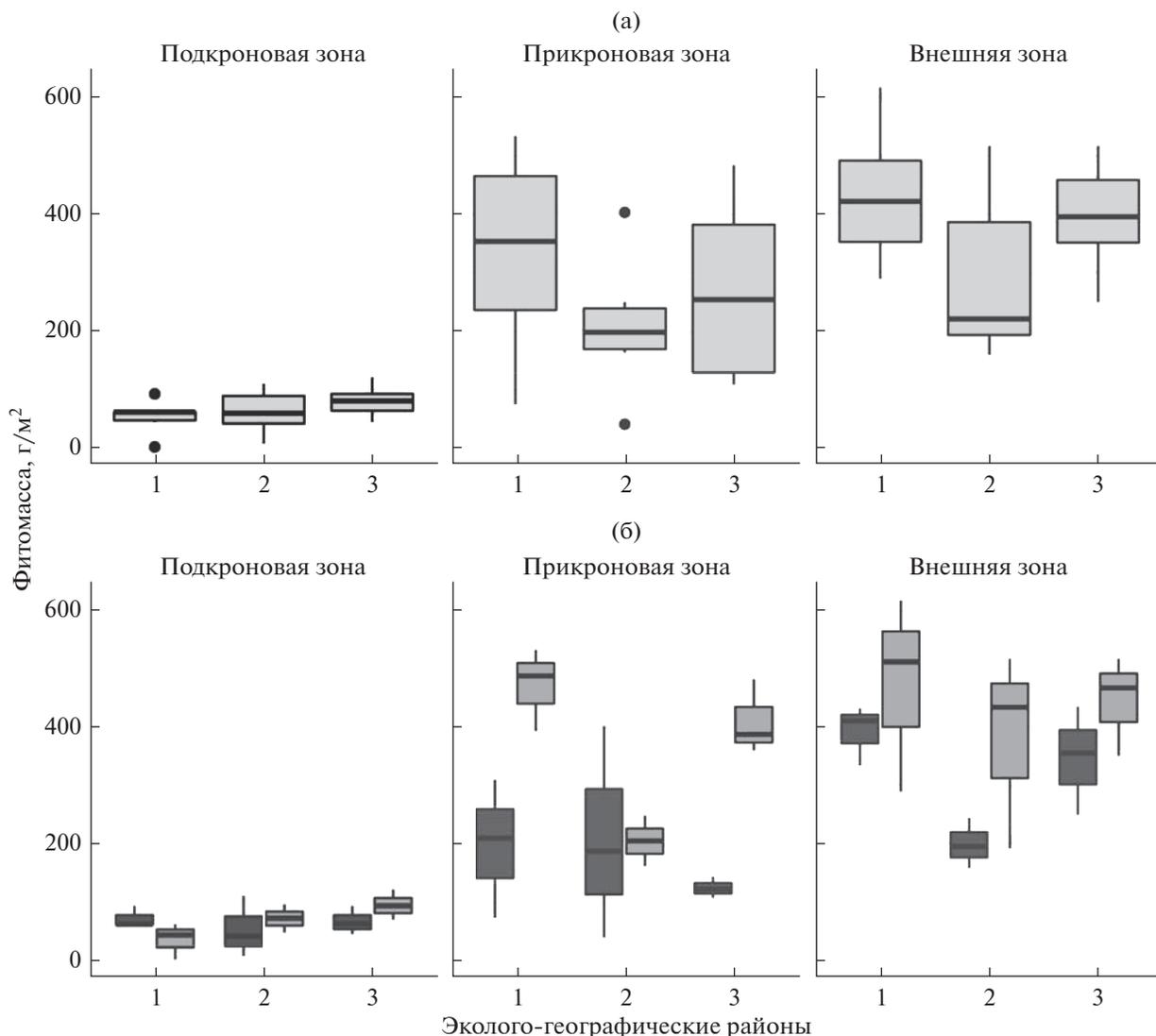
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Площадь зон проекции ФП.** Согласно классификации Е.Н. Журавлевой с соавт. (2012), изучаемые нами модельные деревья сосны обладают средней силой влияния. Средообразующая роль эдификатора наиболее полно проявляется в пределах подкроновой зоны. Ее площадь в пределах проекции радиально-концентрического рисунка ФП модельных деревьев на поверхности почвы в различных эколого-географических районах оценивается, в целом, близкими величинами (рис. 3). Отмечается тенденция к увеличению площади подкроновой зоны с ростом величины ГТК:  $15 \text{ м}^2$  – для

модельных деревьев в центральном остепненном районе (ГТК = 1.0),  $16 \text{ м}^2$  – в лесостепном (ГТК = 1.4) и  $17 \text{ м}^2$  – в среднегорно-таежном ЭГР (ГТК = 2.0). Различия между полученными значениями площадей подкроновой зоны не превышают 10%.

Согласно расчетам, общая площадь проекции радиально-концентрического рисунка ФП изучаемых модельных деревьев составляет:  $155 \text{ м}^2$  – в остепненном,  $141$  и  $131 \text{ м}^2$  в лесостепном и среднегорно-таежном ЭГР, соответственно. Несмотря на то, что величины общей площади ФП являются расчетными, а при их получении привлекалась закономерность, полученная в естественных сосняках, есть основания полагать, что мы не далеки от истины. Так, по данным А.И. Лукьянец (1975), площадь поверхности, занимаемая корневыми системами 12-летних сосен первого бонитета на угольных отвалах севера Свердловской области, составила  $108 \text{ м}^2$ . Раскапывались корневые системы сосен диаметром 10 см, что почти в 2 раза меньше, чем диаметры изучаемых нами модельных деревьев.

В структуре проекции ФП на долю подкроновой зоны приходится от 10 до 13% общей площади. Подкроновую зону отличает наиболее низкий уровень освещенности: от 4 до 12 тыс. лк, что составляет 5–15% от показателей, полученных на открытом пространстве (фоне). Травяной покров здесь сильно разрежен, его общее проективное



**Рис. 4.** Вариабельность запаса фитомассы напочвенного покрова в зонах фитогенного поля сосен в различных ЭГР: центральный остепненный (1), северный лесостепной (2) и среднегорный таежный (3). Анализ проведен без учета (а) и с учетом (б) влияния экспозиции фитогенного поля: темная заливка – север, светлая – юг. Обозначены: медианная линия внутри коробки; 25 и 75% квартили-границы коробки; минимальные и максимальные значения внутри “ограды” – усы; “●” – значения (выбросы), превышающие 1.5 межквартильных расстояния.

покрытие варьирует в широких пределах: от 0 до 60%. Доминантами выступают *Poa angustifolia* L. и *Fragaria vesca* L.

**Фитодетрит и фитомасса в пределах проекции ФП.** Запас надземной фитомассы напочвенного покрова в пределах подкroновой зоны ФП модельных деревьев одного ЭГР изменяется в широких пределах: от 2 до 92 г м<sup>-2</sup> в засушливых условиях центрального остепненного ЭГР; от 7 до 108 и от 61 до 119 г м<sup>-2</sup> в умеренно и избыточно увлажненных ЭГР соответственно (рис. 4). По результатам ANOVA средние значения фитомассы подкroновой зоны ФП изучаемых ЭГР статистически не различаются ( $F = 1.07$ ,  $p = 0.367$ ). На

изменчивость фитомассы травянистого покрова подкroновой зоны экспозиция ФП не влияет ( $F = 0.05$ ,  $p = 0.822$ ).

Почвы подкroновой зоны, особенно в южной экспозиции ФП, в меньшей степени обеспечены влагой, что, вероятно, обусловлено более низким (на 25–40% по сравнению с открытым пространством, вне ФП) количеством поступающих осадков. Определенный вклад в иссушение поверхностных слоев вносит и корневая система подроста сосны. Несмотря на то, что он угнетен, его высота ограничивается высотой прикрепления кроны (10–50 см), густота подроста может достигать 50 экз. м<sup>-2</sup>.

Индикаторным признаком подкороновой зоны является сплошной, довольно мощный (5–15 см) слой лесной подстилки, сформированной преимущественно за счет опада сосны. Морфологически подстилка подразделяется на 2 подгоризонта: опада, на долю которого приходится 30–40%, и ферментации. Подгоризонт гумификации не имеет сплошного распространения, его относительное участие не превышает 10%. Фитогенные поля модельных деревьев эколого-географических районов достоверно различаются по запасу подстилки ( $F = 7.43$ ,  $p = 0.006$ ) на поверхности почвы, при этом средние оценки запаса снижаются с увеличением величины ГТК (рис. 5).

Масса растительных остатков подстилки увеличивается по мере приближения к источнику ФП. Так, в условиях центрального остепненного ЭГР запас подстилки у границы подкороновой зоны составляет 3.7–3.8 кг м<sup>-2</sup>, а на учетных площадках, расположенных вблизи ствола сосны – 7.6–8.0 кг м<sup>-2</sup>. В северном лесостепном ЭГР при умеренной степени увлажнения запас подстилки изменяется по направлению к стволу от 3.1–3.5 до 5 кг м<sup>-2</sup>, а в пределах избыточно увлажненного среднегорно-таежного ЭГР (ОП “Красногорский”) – от 1.5–1.8 до 3.6–4.0 кг м<sup>-2</sup>.

Изменчивость запаса подстилки значимо и с высокой силой связи коррелирует с температурой ( $r_s = -0.85$ ,  $p = 0.007$ ) и влажностью ( $r_s = -0.87$ ,  $p = 0.005$ ) почвы подкороновой зоны ФП, что может указывать на значимую роль сосны в регулировании процессов аккумуляции растительных остатков лесной подстилки.

Полученные средние показатели запаса подстилки в подкороновой зоне ФП модельных деревьев согласуются с данными литературных источников, характеризующих накопление массы органогенного горизонта почв в искусственных сосняках II класса возраста. Так, для культур сосны, формирующихся на отвалах Назаровского угольного разреза, запасы подстилки изменяются в пределах от 1.3 до 3.3 кг м<sup>-2</sup> (Шугалей, Чупрова, 2015). В опытном Серебряноборском лесничестве (Московская область) запасы органогенного горизонта в мертвопокровной парцелле достигали 3–3.5 кг м<sup>-2</sup> (Бганцова, 1983). В лесостепной зоне Приобья на одном квадратном метре поверхности почвы сосредоточено от 2.3 до 3.0 кг растительных остатков (Габеев, 1990). Аналогичные показатели, но для естественных 20-летних сосновых молодняков Енисейской равнины (средняя тайга) составляют 1.6–3.8 кг м<sup>-2</sup> (Трефилова, Ведрова, 2018). Наши оценки выше величин, полученных А.В. Почикаловым с соавт. (2015) в 15–33-летних культурах на отвалах фосфоритового

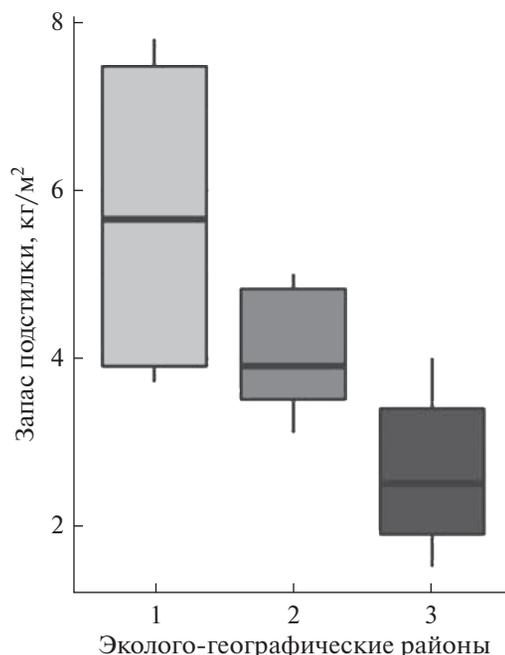


Рис. 5. Вариабельность запаса подстилки в подкороновой зоне фитогенных полей модельных деревьев, произрастающих в центральном остепненном (1), северном лесостепном (2) и среднегорном таёжном ЭГР (3). Обозначены: медиана-линия внутри коробки; 25 и 75% квантили-границы коробки; минимальные и максимальные значения внутри “ограды” – усы.

рудника Хорловского месторождения (Московская область) – 0.3–0.8 кг м<sup>-2</sup>, М.Г. Семечкиной (1983) – 0.6 кг м<sup>-2</sup> для сосновых молодняков разнотравного типа в лесостепной зоне Средней Сибири и А.С. Курочкиным (1983) для Ленинградской области – от 0.5 до 2 кг м<sup>-2</sup>. Различия могут быть обусловлены спецификой как условий биотопа, так и методических подходов, используемых при учете запаса подстилки.

Вторая зона ФП – прикороновая, простирается от границы прямой проекции края кроны модельного дерева на 0.8–3 м. В центральном остепненном и северном лесостепном ЭГР на долю прикороновой зоны приходится 11–13% общей площади проекции ФП. В условиях избыточного увлажнения среднегорно-таежного ЭГР прикороновая зона занимает уже 31% ФП, а ее площадь в 2.4 и 2.2 раза больше аналогичных показателей в ОП “Бачатский” и “Кедровский”, соответственно.

Согласно опубликованным данным (Волокитина, 1979) и результатам собственных наблюдений (Уфимцев и др., 2016) на край кроны сосны, как правило, приходится участки более высокой концентрации атмосферных осадков. Здесь количество осадков достигает 150–180% от фоновых значений, полученных для северной и 100–120% – для

южной экспозиции. Условия повышенного увлажнения, вероятно, способствовали развитию мохового покрова — общее проективное покрытие яруса в пределах прикромовой зоны достигает 100%. В числе доминантов выступают три вида: *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., *Polytrichum juniperinum* Hedw. и *Brachythecium salebrosum* (F.Weber & D.Mohr) Bruch et al.

На фоне увеличения освещенности прикромового пространства до 35–68 тыс. лк, более активно развивается и травянистый покров. Количество видов, формирующих покров, не изменяется — 7–15, преобладает *Melilotus officinalis* (L.) Pall. (общее проективное покрытие составляет 70–100%). Средние величины запаса надземной фитомассы в прикромовой зоне по сравнению с подкромовой возрастают в 3–6 раз. Однако по результатам ANOVA средние значения фитомассы прикромовых зон ФП, формирующихся в различных ЭГР, статистически не различаются ( $F = 1.04$ ,  $p = 0.379$ ). При анализе изменчивости фитомассы в прикромовой зоне отчетливо проявляется влияние экспозиции ФП ( $F = 15.69$ ,  $p = 0.002$ , см. рис. 4).

Подрост в прикромовой зоне единичный — 1–3 шт. м<sup>-2</sup>, в большинстве своем (60–80%) сомнительный, разновозрастный. Высота молодых сосен изменяется от 15 до 140 см.

По мере перехода во внешнюю зону ФП модельных сосен, влияние эдификатора ослабевает, освещенность возрастает до фонового уровня 66–81 тыс. лк, проективное покрытие мохового покрова снижается до 10–40%, активно развиваются подрост и травяной покров. Преобладающая часть подраста (80–100%) является жизнеспособной. В зависимости от возраста высота деревьев подраста может изменяться в пределах от 60 до 460 см. Видовой состав травяного покрова представлен 17–25 видами, из них в пределах центрального остепненного ЭГР доминируют *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth и *Poa angustifolia*, в северном лесостепном и среднегорно-таежном ЭГР — *Dactylis glomerata* L. и *Centaurea scabiosa* L., *Melilotus officinalis* имеет повсеместное распространение и встречается во всех ЭГР, однако его общее проективное покрытие ниже, чем в прикромовой зоне, и не превышает 10–30%.

По сравнению с прикромовой зоной средние запасы надземной фитомассы напочвенного покрова внешней зоны увеличиваются на 28–40%. Внешние зоны ФП модельных деревьев, формирующихся в различных климатических условиях, схожи по среднему запасу надземной фитомассы напочвенного покрова ( $F = 2.16$ ,  $p = 0.15$ ). Из числа факторов, определяющих пространственную изменчивость запаса надземной фитомассы, можно

выделить экспозицию ФП ( $F = 5.04$ ,  $p = 0.044$ ). Масса напочвенного покрова в южной части внешней зоны изучаемых ФП выше значений, полученных для северной экспозиции (рис. 4).

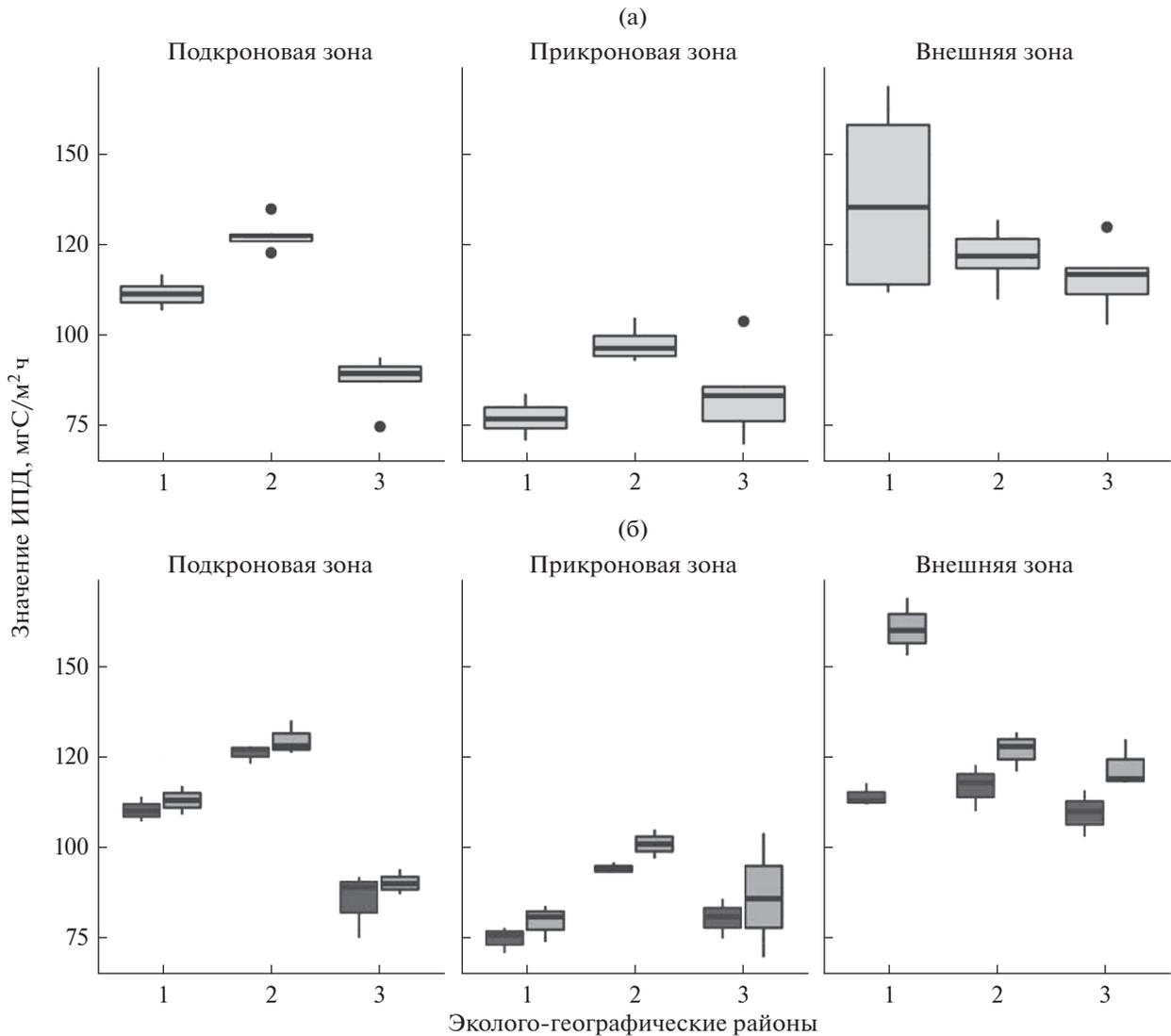
Необходимо отметить, что отсутствие статистически значимых различий в средних значениях надземной фитомассы напочвенного покрова всех зон ФП сопоставляемых опорных полигонов является дополнительным подтверждением близкой трофности эдафического фона отвалов.

Принимая во внимание, что практически вся надпочвенная фитомасса травяного покрова в течение вегетационного сезона постепенно перейдет в состав фитодетрита, а продуктивность травяных сообществ в пределах ФП контролируется модельным деревом-эдификатором, мы попытались сравнить ЭГР по общей массе отмерших растительных остатков, взяв за основу величины запаса фитомассы и площадь соответствующей зоны. Согласно полученным данным, в пределах ФП центрального остепненного ЭГР сосредоточено 161 кг растительных остатков, как поступающих со свежими порциями опада, так и ранее накопленных в составе лесной подстилки. Для северного лесостепного ЭГР эта величина равна 101, а в среднегорном таежном — 85 кг. Примерно половина (55–67%) данного количества сосредоточена в пределах подкромовой зоны, т.е. в наибольшей степени подконтрольно влиянию дерева.

**Интенсивность почвенного дыхания.** Результаты сопоставления оценок интенсивности почвенного дыхания (ИПД) по ЭГР (рис. 6) указывают на значительный уровень их дифференциации в подкромовой ( $F = 97.7$ ,  $p < 0.001$ ) и прикромовой зонах ( $F = 10.73$ ,  $p = 0.001$ ) ФП модельных деревьев. Средние значения ИПД внешней зоны ФП в изучаемых ЭГР отличаются меньшим варьированием значений и слабыми общими (на уровне тенденции) различиями ( $F = 2.71$ ,  $p = 0.099$ ). Полученные численные результаты сравнений хорошо согласуются с визуальной оценкой различий (рис. 6): наиболее высокие средние показатели ИПД зарегистрированы в подкромовой и прикромовой зонах ФП сосен северного лесостепного ЭГР.

Значимое влияние экспозиции на изменчивость ИПД отсутствует как в подкромовой ( $F = 2.53$ ,  $p = 0.138$ ), так и прикромовой ( $F = 2.39$ ,  $p = 0.148$ ) зонах ФП анализируемых эколого-географических районов. Во внешней зоне, где влияние ФП существенно сглаживается, отмечается сильное воздействие экспозиции на изменчивость значений ИПД ( $F = 60.69$ ,  $p < 0.001$ ).

Межзональные изменения ИПД в изучаемых эколого-географических районах имеют схожий, “U-образный” характер: величины почвенного



**Рис. 6.** Вариабельность интенсивности почвенного дыхания в зонах проекции фитогенного поля сосен в центральном остепненном (1), северном лесостепном (2) и среднегорном таежном ЭГР (3). Анализ проведен без учёта (а) и с учётом (б) влияния экспозиции фитогенного поля: темная заливка – север, светлая – юг. Обозначены: медиана-линия внутри коробки; 25 и 75% квантили-границы коробки; минимальные и максимальные значения внутри “ограды” – усы; “●” – значения (выбросы), превышающие 1.5 межквартильных расстояния.

дыхания постепенно снижаются по мере перехода от подкроновой к прикроновой зоне и вновь возрастают во внешней зоне. Механизм пространственной дифференциации ИПД в пределах ФП модельных деревьев пока не ясен. Полагаем, что данное явление может быть обусловлено различиями подкроновой и прикроновой зон ФП по массе и биохимическому составу разлагающегося материала, а также развитием мохового покрова в пределах более обеспеченной атмосферными осадками прикроновой зоны. Более низкие показатели ИПД на участках, покрытых моховым покровом, по сравнению с травяным, получены и в работе (Sedia et al., 2005).

В целом, полученные оценки ИПД согласуются с литературными данными. Интенсивность потока  $\text{CO}_2$  для молодых почв 25-летних отвалов Назаровского угольного разреза (Красноярский край, лесостепная зона) изменяется в пределах от  $70 \pm 21$  до  $107 \pm 35$  мг С  $\text{м}^{-2}$   $\text{ч}^{-1}$  (Наумов, 2009). Аналогичный показатель для отвалов Хорловского месторождения фосфотитов под 22–25-летними культурами сосны в первый год проведения исследования в среднем составил  $202 \pm 75$ , а в следующий – только  $19 \pm 4$  мг С  $\text{м}^{-2}$   $\text{ч}^{-1}$  (Почицалов и др., 2015). Немногом выше оказались показатели ИПД в приспевающих сосняках Ангаро-Енисейского региона, формирующихся на дерно-

во-подзолистой и серой лесной оподзоленной почвах: 128 и 145 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> соответственно (Сорокин и др., 1985). В округе Бадфорд штата Флорида (США) на бедных песчаных почвах, под 9- и 29-летними плантациями *Pinus palustris* Mill. средний за период вегетации поток углекислоты достигал 99 ± 14 и 135 ± 20 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> соответственно (Ewel et al., 1986). По данным июля, ИПД в 16-летнем разреженном разнотравно-злаковом сосняке на постагроденном агроземе иллювиально-железистом в течение двух лет наблюдения изменялась в пределах 120–180 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> (Люри и др., 2013).

Корреляционный анализ данных ИПД показал наличие средней положительной связи между изменчивостью значений интенсивности почвенного дыхания прикромовой и подкромовой ( $r_s = 0.55, p = 0.014$ ), а также внешней и прикромовой ( $r_s = 0.18, p = 0.003$ ) и внешней и подкромовой ( $r_s = 0.30, p = 0.036$ ) зон ФП. Из этого следует, что регистрируемый уровень ИПД регулируется воздействием одного определенного вида-эдификатора. Таким образом, есть основания полагать, что интенсивность почвенного дыхания, в данном случае может рассматриваться как интегральный эффект ФП, позволяющий на более “тонком” уровне оценить влияние деревьев на техногенные молодые почвы.

**Выводы:** 1. На основании полученных данных, можно утверждать, что эффекты ФП отдельно стоящих модельных деревьев сосны (II класса возраста), со средней силой влияния (по: Журавлева и др., 2012) распространяются как минимум в пределах 131–155 м<sup>2</sup> и только 10–13% данной площади находится в подкромовом пространстве – зоне максимального воздействия источника ФП. Радиально-концентрические рисунки изучаемых фитогенных полей различаются по площади прикромовой зоны. Увеличение площади прикромовой зоны в избыточно увлажненном среднегорном таежном ЭГР позволяет предполагать, что воздействие сосны на почвы отвалов в этих условиях проявляется более интенсивно.

2. Запас лесной подстилки в подкромовой зоне убывает по мере увеличения степени увлажнения: от 89 кг при ГТК = 1.0 до 45 кг – ГТК = 2.2. Сильная отрицательная корреляционная связь изменчивости запаса подстилки с температурой в подкромовой и влажностью в подкромовой и прикромовой зонах ФП указывает на значимую роль сосны в регулировании процессов аккумуляции растительных остатков.

3. Зоны ФП модельных деревьев, формирующихся в различных ЭГР, схожи по среднему запасу надземной массы напочвенного покрова. В

определении пространственной изменчивости запаса ведущая роль отводится экспозиции ФП, которая четко проявляется только в прикромовой и внешней зонах. Фитомасса напочвенного покрова в южной части зон выше значений, полученных для северной экспозиции.

4. Общей закономерностью является снижение разброса показателей интенсивности почвенного дыхания по мере удаления от источника фитогенного поля. Наиболее высокие показатели интенсивности почвенного дыхания зарегистрированы в северном лесостепном эколого-географическом районе (условия умеренного увлажнения).

5. Приведенный анализ эффектов ФП показал, что характер влияния сосны на молодые почвы отвалов, формирующиеся в условиях увлажнения различной степени, при определенном сходстве параметров нельзя считать полностью однотипным.

\* \* \*

За ценные советы при обсуждении материала публикации авторы выражают благодарность доктору биологических наук Э.Ф. Ведровой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бганцова В.А.* Связь травяного покрова с запасом подстилки в сосновых культурах. // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 19.
- Бганцова В.А.* Влияние травянистых растений на свойства почвы в лесном БГЦ // Почвоведение. 1991. № 10. С. 60–78.
- Бобровский М.В.* Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 359 с.
- Брагина А.С.* Почвообразование на отходах горнодобывающих предприятий Кемеровской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 25.00.23. М. 2016. 23 с.
- Брагина П.С., Цибарт А.С., Завадская М.П., Шаранова А.В.* Почвы на отвалах вскрышных пород в лесостепной и горно-таежной зонах Кузбасса // Почвоведение. 2014. № 7. С. 878–889.
- Быков Б.А.* Геоботаника. Алма-Ата: Наука, 1978. 288 с.
- Ведрова Э.Ф.* Влияние сосновых насаждений на свойства почв. Новосибирск: Наука, 1980. 104 с.
- Ведрова Э.Ф., Решетникова Т.В.* Масса подстилки и интенсивность ее разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
- Волобуев В.Р.* Экология почв (очерки). Баку: Изд-во Акад. наук АзССР, 1963. 260 с.
- Волокитина А.В.* Особенности распределения осадков под пологом хвойного леса // Лесоведение. 1979. № 2. С. 40–48.
- Габеев В.Н.* Экология и продуктивность сосновых лесов. Новосибирск: Наука, 1990. 229 с.
- Галанин А.В.* Влияние фитогенного поля на распределение растений // Экология. 1980. № 6. С. 76–78.

- Головенко С.В. Экологическое почвоведение-предмет и метод // Методология и методика почвенных и ландшафтно-геохимических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1977. С. 25–37.
- Горелов А.М. Фитогенное поле и его структура // Электронный журн. “Вестник Московского государственного областного университета”. 2013. № 1. С. 1–9.
- Демьянов В.А. Анализ ценотической роли листовницы Гмелина на крайнем северном пределе распространения древесной растительности (Таймыр) // Ботанический журнал. 1980. Т. 65. № 7. С. 926–937.
- Демьянов В.А. Представление о фитогенном поле растений и проблема сущности фитоценоза // Известия РАН. Серия биологическая. 1996. № 3. С. 359–363.
- Дылис Н.В., Уткин А.И., Успенская И.М. О горизонтальной структуре лесных биогеоценозов // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1964. Т. 30. Вып. 4. С. 65–72.
- Жукова Л.А. Концепция фитогенных полей и современные аспекты их изучения // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1(6). С. 1462–1465.
- Журавлева Е.Н., Ипатов В.С., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. Изучение растительности на лугах под влиянием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2012. Вып. 2. Сер. 3. С. 3–12.
- Зонн С.В. К вопросу о взаимодействии лесной растительности с почвами // Почвоведение. 1954. № 4. С. 51–60.
- Зонн С.В. Современные проблемы генезиса и географии почв. М.: Наука, 1983. 168 с.
- Ипатов В.С. Фитогенные поля одиночных деревьев некоторых пород в одном экотопе // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 8. С. 1186–1192.
- Ипатов В.С., Журавлёва Е.Н., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. Фитогенное поле *Picea abies*, *P. obovate* (*Pinaceae*) // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 4. С. 558–568.
- Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
- Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность, 1981. 264 с.
- Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Ташинова Л.Н., Руденко Р.Н. Почвенный покров и парцеллярная структура лесного биогеоценоза // Лесоведение. 2007. № 6. С. 107–113.
- Классификация и диагностика почв России / Сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- Кожневиков Ю.П. О концепции фитогенного поля // Известия АН. Серия биологическая. 1998. № 3. С. 356–362.
- Крышень А.М. Фитогенное поле: теория и проявление в природе // Известия АН. Серия биологическая. 2000. № 4. С. 437–443.
- Курочкин А.С. Динамика запасов и состав лесной подстилки в плантационных культурах сосны обыкновенной. Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 108.
- Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. Фитогенное поле герани лесной *Geranium sylvaticum* (*Geraniaceae*) // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 6. С. 833–847.
- Левичев И.Г. О динамике травянистых микрогруппировок в фишашниках Бадхыза (Туркменская ССР) // Ботанический журн. 1975. Т. 60. № 7. С. 969–976
- Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва–растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45–56.
- Лукиянец А.И. Архитектоника и фитомасса корневой системы естественных сосняков на железнодорожных отвалах Богославского и Веселовского месторождений бурого угля // Рекультивация земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых: Тез. докл. координационного совещания. Тарту, 1975. С. 151–157.
- Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072.
- Маслов А.А. О взаимодействии фитогенных полей деревьев в сосняке чернично-брусничном // Ботанический журнал. 1986. Т. 71. № 12. С. 1646–1652.
- Меняйло О.В. Влияние древесных пород Сибири на образование и потребление N<sub>2</sub>O // Известия РАН. Серия биологическая. 2006. № 5. С. 606–612.
- Наумов А.В. Дыхание почв: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
- Наумова Н.Б., Макарикова Р.П., Тараканов В.В., Кузьмина Н.А., Новикова Т.Н., Милютин Л.И. Влияние климатических типов сосны обыкновенной на некоторые химические и микробиологические свойства почв // Сибирский экологический журнал. 2009. № 2. С. 287–292.
- Орлов А.Я., Кошельков С.П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.
- Орловский Н.В. Послесловие. Лес и почва: Тр. Всесоюз. научн. конф. по лесному почвоведению. Красноярск: Красноярское книж. издательство, 1968. С. 593.
- Паркина И.Н. Особенности биологической активности почвы в фитогенном поле березы повислой // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. 2006. № 7(47). С. 148–152.
- Почикалов А.В., Ларин Я.А., Арешин А.В., Карелин Д.В. Компоненты бюджета углерода в лесных посадках при рекультивации открытых горных выработок // Лесоведение. 2015. № 6. С. 447–457.
- Прокушкин С.Г., Бугаенко Т.Н., Сорокин Н.Д., Каверзина Л.Н., Зырянова О.А. Роль фитогенного поля листовницы допозарной генерации в формировании эдафических условий на гари // Известия АН. Серия биологическая. 2004. № 1. С. 49–58.
- Пуртова Л.Н., Зимина М.П. Изменчивость физико-химических показателей бурых лесных почв в пределах фитогенных полей деревьев (юг Дальнего Востока) // Почвоведение. 2007. № 1. С. 31–37.
- Работнов Т.А. О конкуренции между растениями в растительных сообществах // Бюллетень Московского общества испытателей природы Отдел биологический. 1984. Т. 89. Вып. 5. С. 82–93.
- Самойлов Ю.И. Структура фитогенного поля на примере одиночных дубов *Quercus robur* (*Fagaceae*) // Ботанический журнал. 1983. Т. 68. № 8. С. 1022–1034.
- Самойлов Ю.И., Тархова Т.Н. Анализ фитогенных полей одиночных деревьев с использованием метода главных компонент // Ботанический журнал. 1993. Т. 78. № 5. С. 61–77.

- Семечкина М.Г.* Запасы подстилки в сосняках разнотравных островных лесостепей Средней Сибири. Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 182.
- Смагин А.В.* Почва как результат самоорганизации биогеоценоза // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 729–731.
- Смагин А.В.* Биогеоценотическое направление в почвоведении // Почвоведение. 1996. № 3. С. 298–309.
- Солнцева Н.П., Герасимова М.И., Рубилина Н.Е.* Морфогенетический анализ техногенно-преобразованных почв // Почвоведение. 1990. № 8. С. 124–129.
- Сорокин Н.Д., Горбачев В.Н., Гиголян Д.К.* Микробиоценозы и биологическая активность лесных почв Ангаро-Енисейского региона // Биологическая активность лесных почв. Красноярск: Институт леса и древесины, 1985. С. 35.
- Таргульян О.В.* Память почв: общие подходы к проблеме // Память почв: почвы как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий. Отв. ред. Таргульян О.В., Горячкин С.В. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. С. 24–57.
- Трефилова О.В., Ведрова Э.Ф.* Минерализационный поток углерода в постпирогенных сосняках Среднего Енисея // Лесоведение. 2018. № 3. С. 210–224.
- Трофимов С.С.* Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области. Новосибирск. 1975. 300 с.
- Уранов А.А.* Фитогенное поле. Проблемы современной ботаники. М. Л.: Наука. 1965. Т. 1. С. 251–254.
- Уранов А.А., Михайлова Н.Ф.* Из опыта изучения фитогенного поля *Stipa pennata* L. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1974. Т. LXXIX(5). С. 151–159.
- Уфимцев В.И.* Опыт и современное состояние лесной рекультивации в Кузбассе // Сибирский лесной журн. 2017. № 4. С. 12–27.
- Уфимцев В.И., Беланов И.П., Куприянов О.А.* Эколого-ценотическая роль фитогенных полей сосны обыкновенной на отвалах угольной промышленности // Сибирский экологический журн. 2016. № 1. С. 164–175.
- Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Солодовников А.Н.* Пространственная изменчивость почвенного покрова в сосняке лишайниковом // Лесоведение. 2006. № 3. С. 64–79.
- Черняева Е.В., Викторов В.П.* История и современное состояние изучения фитогенных полей // Социально-экологические технологии. 2016. № 1. С. 89–105.
- Шугалей Л.С., Чупрова В.В.* Почвообразование в техногенных ландшафтах. Красноярск: Красноярский гос. аграрный ун-т, 2015. 239 с.
- Экологическая карта Кемеровской области. Масштаб 1 : 500000. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1995. Л. 1.
- Ястребов А.Б.* Напряженность фитогенных полей деревьев в лишайниково-зеленомошных сосняках // Экология. 1996. № 1. С. 3–9.
- Ястребов А.Б., Лычная Н.В.* Исследование фитогенных полей деревьев в лишайниково-зеленомошных сосняках // Ботанический журнал. 1993. Т. 78. № 5. С. 78–92.
- Binkley D.* The influence of tree species on forest soils: Processes and patterns // Proceeding of the Trees and Soil Workshop. Eds.: Mead D.J., Cornforth I.S. Canterbury: Lincoln University Press, 1995. P. 1–33.
- Chodak M., Niklińska M.* The effect of different tree species on the chemical and microbial properties of reclaimed mine soils // Biology & Fertility of Soils 2010. V. 46. P. 555–566.
- Ewel K.C., Cropper W.P., Jr., Gholz H.L.* Soil CO<sub>2</sub> evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time // Canadian J. Forest Research. 1986. V. 17. P. 325–329.
- Finzi A.C., Canham C.D., Breemen N.V.* Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations // Ecology Applications. 1998. № 8(2). P. 447–454.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D.* PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. № 1. P. 9.
- Hokkanen T.J., Järvinen E., Kuuluvainen T.* Properties of top soil and relationship between soil and trees in a boreal Scots pine stand // Silva Fennica. 1995. V. 29(3). P. 189–203.
- McDonald J.H.* Handbook of Biological Statistics, 3rd ed. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland: 2014. 299 p.
- Priha O., Lehto T., Smolander A.* Mycorrhizas and C and N transformations in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings // Plant and Soil. 1999. V. 206. P. 191–204.
- Reich P.B., Oleksyn J., Mrozinski P., Hobbie S.E., Eissenstat D.M., Chorover J., Chadwick O.A., Hale C.M., Tjoelker M.G.* Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species // Ecology Letters. 2005. V. 8. № 8. P. 811–818.
- Sedia E.G., Ehrenfeld J.G.* Differential effects of lichens, mosses and grasses on respiration and nitrogen mineralization in soils of the New Jersey Pinelands // Oecologia. 2005. V. 144. № 1. P. 137–147.
- Shugalei L.S.* The Siberian afforestation experiment: history, methodology, and problems // Tree species effects on soil: implications for global change: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Trees and Soil Interactions, Implications to Global Climate Change August 2004 Krasnoyarsk, Russia. Series IV: Earth environmental sciences / Ed. by D. Binkley, O. Menyail. Amsterdam: IOS Press and Springer 2005. 2005. P. 257–268.
- Vedrova E.F.* Biochemistry of carbon and nitrogen in the Siberian afforestation experiment // Tree species effects on soil: implications for global change: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Trees and Soil Interactions, Implications to Global Climate Change August 2004 Krasnoyarsk, Russia. Series IV: Earth environmental sciences / Ed. by D. Binkley, O. Menyail. Amsterdam: IOS Press and Springer 2005. P. 257–268.
- Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J.R., Callesen I., Schmidt I. K.* Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species // Forest Ecology and Management. 2012. V. 264. P. 185–196.
- Vesterdal L., Schmidt I. K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P.* Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species // Forest Ecology & Management. 2008. V. 255. P. 35–48.
- Walker J., Sharpe P.J.H., Penridge L.K., Wu H.* Ecological field theory: the concept and field tests // Vegetation. 1989. V. 83. P. 81–95.
- Wu H., Sharpe P.J.H., Walker J., Penridge L.K.* Ecological field theory (EFT): A spatial analysis of resource interference among plants // Ecological Modelling. 1985. № 29. P. 215–243.

## Pine's Phytogenic Field's Effects in Different Climate Conditions

O. V. Trefilova<sup>1, \*</sup>, I. P. Belanov<sup>2</sup>, V. I. Ufimtsev<sup>3</sup>, and D. Yu. Efimov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, 660037 Russia

<sup>2</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian branch of RAS,  
Akademika Lavrent'eva prosp., 8/2, Novosibirsk, 630099 Russia

<sup>3</sup>Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of RAS,  
Leningradsky prosp., 10, Kemerovo, 650065 Russia

<sup>4</sup>Papanin Institute for Biology of Inland Waters, RAS,  
Borok stl., 109, Nekouzsky district, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia

\*E-mail: ovtrefilova\_ilsoran@mail.ru

In the framework of this work, an attempt has been made to assess the nature (uniformity or uniqueness) of the trees' influence on soils in various climatic conditions. To achieve the goal of the study, a series of reference polygons was selected, where a single tree species – Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – has been developing in different ecological and geographical regions (EGR) (steppe; northern forest-steppe and middle-mountain taiga), but with a similar edaphic background. The formation of stands occurs on the underdeveloped soils of the dumps. These are young soils in which the processes of the “soil memory” formation (according to Targulian) is just starting, which made it possible to assess the direct influence of the present stand on the soils. The methodological basis of the work is the concept of phytogenic field (PF). It is shown that the influence of a solitary pine tree of the second age class extends to 131–155 m<sup>2</sup>, and only 10–13% of this area is located under its crown, in the zone of the PF source maximum influence. Comparison of the direct and indirect PF effects manifestation degree (parameters of the radial-concentric pattern of PF, illumination degree, forest litter and phytomass stock, intensity of soil respiration, soil temperature and moisture) and correlation analysis of biogenic and abiogenic parameters allow us to conclude that the effect of pine trees on young coal dump soils with varying degrees of moisture is highly heterogenous. The radial-concentric projection patterns of the studied phytogenic fields differ in the area of the near-crown area. The increase of the of the near-crown area in the excessively humid middle-mountain taiga EGR allows us to assume that the effect of pine trees on the dump soils in these conditions is more intense.

*Keywords: phytogenic field, industrial dumps recultivation, forest-soil interactions, soil respiration, forest litter, pine cultures.*

### REFERENCES

- Bgantsova V.A., Svyaz' travyanogo pokrova s zapasom podstilki v sosnovykh kul'turakh (Connection between grass cover and litter store in pine crops), In: *Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh* (The role of litter in forest biogeocenoses), M.: Nauka, 1983, pp. 19.
- Bgantsova V.A., Vliyanie travyanistykh rastenii na svoystva pochvy v lesnom BGTs (Influence of herbaceous plants on soil properties in forest biogeocenosis), *Pochvovedenie*, 1991, No. 10, pp. 60–78.
- Binkley D., The influence of tree species on forest soils: Processes and patterns, In: *Proceeding of the Trees and Soil Workshop*, Canterbury: Lincoln University Press, 1995, pp. 1–33.
- Bobrovskii M.V., *Lesnye pochvy Evropeiskoi Rossii. Bioticheskie i antropogennye faktory formirovaniya* (Forest soil in European Russia: biotic and anthropogenic factors in pedogenesis), M.: KMK, 2010, 359 p.
- Bragina A.S., *Pochvoobrazovanie na otkhodakh gornodobyvayushchikh predpriyatii Kemerovskoi oblasti. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* (Soil formation on the waste of mining enterprises of the Kemerovo region. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), M., 2016, 23 p.
- Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V., Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 7, pp. 723–733.
- Bykov B.A., *Geobotanika* (Geobotany), Alma-Ata: Nauka, 1978, 288 p.
- Chernyaeva E.V., Viktorov V.P., Istoriya i sovremennoe sostoyanie izucheniya fitogennykh polei (History and current status of research phytogenic fields), *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii*, 2016, No. 1, pp. 89–105.
- Chodak M., Niklin'ska M., The effect of different tree species on the chemical and microbial properties of reclaimed mine soils, *Biology & Fertility of Soils*, 2010, Vol. 46, pp. 555–566.
- Dem'yanov V.A., Analiz tsenoticheskoi roli listvennitsy Gmelina na krainem severnom predele rasprostraneniya drevesnoi rastitel'nosti (Taimyr) (An analysis of coenotical role of *Larix gmelinii* in the extreme northern limit of woody vegetation (Taimyr)), *Botanicheskii zhurnal*, 1980, Vol. 65, No. 7, pp. 926–937.
- Dem'yanov V.A., Predstavlenie o fitogennom pole rastenii i problema sushchnosti fitotsenozov (The concept of the phytogenic field of plants and the problem of the essence of phytocenosis), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 1996, No. 3, pp. 359–363.
- Dylis N.V., Utkin A.I., Uspenskaya I.M., O gorizonta'noi strukture lesnykh biogeotsenozov (The lateral structure of forest biogeocenoses), *Byulleten' Moskovskogo obshchestva*

- ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 1964, Vol. 69, No. 4, pp. 65–73.
- Ekologicheskaya karta Kemerovskoi oblasti. Masshtab 1 : 500000*, (Ecological map of the Kemerovo region. Scale 1 : 500,000), M.: Federal'naya sluzhba geodezii i kartografii Rossii, 1995.
- Ewel K.C., Cropper W.P., Jr., Gholz H.L., Soil CO<sub>2</sub> evolution in Florida slash pine plantations. I., Changes through time, *Canadian J. Forest Research*, 1986, Vol. 17, pp. 325–329.
- Fedorets N.G., Morozova R.M., Solodovnikov A.N., Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennogo pokrova v sosnyake lishainikovom (Spatial variability of the soil cover in a lichen pine forest), *Lesovedenie*, 2006, No. 3, pp. 64–79.
- Finzi A.C., Canham C.D., Breemen N.V., Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations, *Ecology Applications*, 1998, No. 8(2), pp. 447–454.
- Gabeev V.N., *Ekologiya i produktivnost' sosnovykh lesov* (Ecology and productivity of pine forests), Novosibirsk: Nauka, 1990, 229 p.
- Galanin A.V., Vliyaniye fitogennoy polya na raspredeleniye rasteniy (The influence of the phytogeneous field on the distribution of plants), *Ekologiya*, 1980, No. 6, pp. 76–78.
- Golovenko S.V., *Ekologicheskoe pochvovedenie-predmet i metod* (Ecological soil science - subject and method), In: *Metodologiya i metodika pochvennykh i landshaftno-geokhimicheskikh issledovaniy* (Methodology and technique of soil and landscape-geochemical research), Moscow: Izd-vo MGU, 1977, pp. 25–37.
- Gorelov A.M., Fitogennoye pole i ego struktura (Phytogenic field and its structure), *Elektronnyi zhurnal "Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta"*, 2013, No. 1, pp. 1–9.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D., PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica*, 2001, Vol. 4, No. 1, pp. 9.
- Hokkanen T.J., Järvinen E., Kuuluvainen T., Properties of top soil and relationship between soil and trees in a boreal Scots pine stand, *Silva Fennica*, 1995, Vol. 29(3), pp. 189–203.
- Ipatov V.S., Fitogennye polya odinodnykh derev'ev nekotorykh porod v odnom ekotipe (Phytogenic areas of single trees of some species in the same ecotope), *Botanicheskii zhurnal*, 2007, Vol. 92, No. 8, pp. 1186–1192.
- Ipatov V.S., Zhuravleva E.N., Lebedeva V.K., Tikhodeeva M.Y., Fitogennoye pole *Picea abies*, *P. obovata* (*Pinaceae*) (Ecological field of *Picea abies* and *P. obovata* (*Pinaceae*)), *Botanicheskii zhurnal*, 2009, Vol. 94, No. 4, pp. 558–568.
- Karpachevskii L.O., *Les i lesnye pochvy* (Forest and forest soils), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1981, 261 p.
- Karpachevskii L.O., *Pestrotta pochvennogo pokrova v lesnom biogeotsenoze* (Diversity of soil cover in forest biogeocoenosis), Moscow: Izd-vo MGU, 1977, 312 p.
- Karpachevskii L.O., Zubkova T.A., Tashninova L.N., Rudenko R.N., Pochvennyi pokrov i partsellyarnaya struktura lesnogo biogeotsenoza (The soil cover and parcel structure of a forest biogeocoenosis), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 107–113.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and recognition of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
- Kobzar' A.I., *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied mathematical statistics), Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p.
- Kozhevnikov Y.P., O kontseptsii fitogennoy polya (About the phytogenic field concept), *Izvestiya AN. Seriya biologicheskaya*, 1998, No. 3, pp. 356–362.
- Kryshen' A.M., The phytogenic field: theory and manifestations in nature, *Biology Bulletin*, 2000, Vol. 27, No. 4, pp. 364–369.
- Kurochkin A.S., *Dinamika zapasov i sostav lesnoi podstilki v plantatsionnykh kul'turakh sosny obyknovennoi. Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh* (Dynamics of stocks and composition of forest litter in Scots pine plantation crops. The role of litter in forest biogeocoenoses), Moscow: Nauka, 1983, 108 p.
- Lebedeva V.K., Tikhodeeva M.Y., Ipatov V.S., Fitogennoye pole gerani lesnoi *Geranium sylvaticum* (*Geraniaceae*) (The ecological field of wood cranesbill *Geranium sylvaticum* (*Geraniaceae*)), *Botanicheskii zhurnal*, 2009, Vol. 94, No. 6, pp. 833–847.
- Levichev I.G., O dinamike travyanistykh mikrogruppirovok v fistashnikakh Badkhyza (Turkmenskaya SSR) (On the dynamics of herbaceous plant microcoenoses in pistacieta forests of Badkhyz (Turkmenia)), *Botanicheskii zhurnal*, 1975, Vol. 60, No. 7, pp. 969–976.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Forest soil fertility: the base of relationships between soil and vegetation, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 725–733.
- Luk'yanets A.I.S., Arkhitektonika i fitomassa kornevyy sistemy estestvennykh sosnyakov na zheleznodorozhnykh otvalakh Bogoslavskogo i Veselovskogo mestorozhdenii burogo uglya (Architectonics and phytomass of the root system of natural pine forests on the railway dumps of the Bogoslavsky and Veselovsky brown coal deposits), In: *Rekul'tivatsiya zemel', narushennykh pri dobyche poleznykh iskopaemykh: Tez. dokl. koordinatsionnogo soveshchaniya* (Reclamation of lands disturbed during mining: Abstracts of the coordination meeting), Tartu, 1975, pp. 151–157.
- Lyuri D.I., Karelin D.V., Kudikov A.V., Goryachkin S.V., Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 9, pp. 935–947.
- Maslov A.A., O vzaimodeystvii fitogennykh polei derev'ev v sosnyake chernichno-brusnichnom (On the interaction of phytogenic fields of trees in bilberry-cowberry pine forest), *Botanicheskii zhurnal*, 1986, Vol. 71, No. 12, pp. 1646–1652.
- McDonald J.H., *Handbook of Biological Statistics*, Baltimore, Maryland: Sparky House Publishing, 2014, 299 p.
- Menyailo O.V., Effect of Siberian tree species on N<sub>2</sub>O production and consumption, *Biology Bulletin*, 2006, Vol. 33, No. 5, pp. 492–497.
- Naumov A.V., *Dykhaniye pochv: sostavlyayushchie, ekologicheskie funktsii, geograficheskie zakonomernosti* (Respiration of soils: components, ecological functions, geographic patterns), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009, 208 p.
- Naumova N.B., Makarikova R.P., Tarakanov V.V., Kuz'mina N.A., Novikova T.N., Milyutin L.I., Influence of climatypes of Scots pine on certain chemical and microbiological characteristics of soils, *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, Vol. 2, No. 2, pp. 147–151.

- Orlov A.Y., Koshel'kov S.P., *Pochvennaya ekologiya sosny* (Soil ecology of the pine), M.: Nauka, 1971, 323 p.
- Orlovskii N.V., Posleslovie (Afterword), *Les i pochva* (Forest and soil), Proc. of the All-Union Scientific. conf. on forest soil science, Krasnoyarsk: Krasnoyarskoe knizh. izdatel'stvo, pp. 593.
- Parkina I.N., Osobennosti biologicheskoi aktivnosti pochvy v fitogenom pole berezy povisloi (Features of soil biological activity into the phytogenic field of birch (*Betula pendula* Roth.)), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya*, 2006, No. 7(47), pp. 148–152.
- Pochikalov A.V., Larin Y.A., Areshin A.V., Karelin D.V., Komponenty byudzheta ugleroda v lesnykh posadkakh pri rekul'tivatsii otkrytykh gornyykh vyrabotok (Components of the carbon budget of the forest plantations of reclamations of the open-mined lands), *Lesovedenie*, 2015, No. 6, pp. 447–457.
- Priha O., Lehto T., Smolander A., Mycorrhizas and C and N transformations in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings, *Plant and Soil*, 1999, Vol. 206, pp. 191–204.
- Prokushkin S.G., Bugaenko T.N., Sorokin N.D., Kaverzina L.N., Zyryanova O.A., Role of the phytogenic field of larch of the prefire generation in forming edaphic conditions in burned-out forest areas, *Biology Bulletin*, 2004, Vol. 31, No. 1, pp. 42–50.
- Purtova L.N., Zimina M.P., Variability of physicochemical characteristics of brown forest soils within the phytogenic fields of trees (the Southern Far East), *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 1, pp. 26–31.
- Rabotnov T.A., O konkurentzii mezhdru rasteniyami v rastitel'nykh soobshchestvakh (On the competition between plants in plant communities), *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody, Otdel biologicheskii*, 1984, Vol. 89, No. 5, pp. 82–93.
- Reich P.B., Oleksyn J., Mrozinski P., Hobbie S.E., Eissenstat D.M., Chorover J., Chadwick O.A., Hale C.M., Tielerker M.G., Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species, *Ecology Letters*, 2005, Vol. 8, No. 8, pp. 811–818.
- Samoilov Y.I., Struktura fitogenogo polya na primere odinichnykh dubov *Quercus robur* (Fagaceae) (The structure of the phytogenic field as exemplified by the single oak-trees *Quercus robur* (Fagaceae)), *Botanicheskii zhurnal*, 1983, Vol. 68, No. 8, pp. 1022–1034.
- Samoilov Y.I., Tarkhova T.N., Analiz fitogenykh polei odinichnykh derev'ev s ispol'zovaniem metoda glavnykh komponent (The analysis of phytogenic fields of solitary trees using the method of principal components), *Botanicheskii zhurnal*, 1993, Vol. 78, No. 5, pp. 61–77.
- Sedia E.G., Ehrenfeld J.G., Differential effects of lichens, mosses and grasses on respiration and nitrogen mineralization in soils of the New Jersey Pinelands, *Oecologia*, 2005, Vol. 144, No. 1, pp. 137–147.
- Semechkina M.G., Zapasy podstilki v sosnyakh razno-travnykh ostrovnykh lesostepi Srednei Sibiri. Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh (Litter reserves in pine forests of forb island forest-steppes of Central Siberia. The role of litter in forest biogeocenoses), Moscow: Nauka, 1983, 182 p.
- Shugalei L.S. The Siberian afforestation experiment: history, methodology, and problems, *Tree species effects on soil: implications for global change*, Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Trees and Soil Interactions, Implications to Global Climate Change, August 2004 Krasnoyarsk, Russia. Series IV: Earth environmental sciences, Amsterdam: IOS Press and Springer 2005, pp. 257–268.
- Shugalei L.S., Chuprova V.V., *Pochvoobrazovanie v tekhnogenykh landshaftakh* (Soil formation in technogenic landscapes), Krasnoyarsk: Krasnoyarskii gos. agrarnyi un-t, 2015, 239 p.
- Smagin A.V., Biogeocenological approach in soil science, *Eurasian Soil Science*, 1996, Vol. 29, No. 3, pp. 264–274.
- Smagin A.V., Pochva kak rezul'tat samoorganizatsii biogeotsenoza (Soil as a result of self-organization of biogeocenosis), *Doklady AN SSSR*, 1989, Vol. 308, No. 3, pp. 729–731.
- Solntseva N.P., Gerasimova M.I., Rubilina N.E., Morfogeticheskii analiz tekhnogenno-preobrazovannykh pochv (Morphogenetic analysis of technogenically transformed soils), *Pochvovedenie*, 1990, No. 8, pp. 124–129.
- Sorokin N.D., Gorbachev V.N., Gigolyan D.K., Mikrobootsenozy i biologicheskaya aktivnost' lesnykh pochv Angaro-Eniseiskogo regiona (Microbiocenoses and biological activity of forest soils of the Angara-Yenisei region), In: *Biologicheskaya aktivnost' lesnykh pochv* (Biological activity of forest soils), Krasnoyarsk: Institut lesa i drevesiny, 1985, pp. 35.
- Targul'yan O.V., Pamyat' pochv: obshchie podkhody k probleme (Soil memory: general approaches to the problem), In: *Pamyat' pochv: pochvy kak pamyat' biosferno-geosferno-antroposfernykh vzaimodeistvii* (Soil memory: soils as a memory of biosphere-geosphere-anthropospheric interactions), M.: Izd-vo LKI, 2008, pp. 24–57.
- Trefilova O.V., Vedrova E.F., Mineralizatsionnyi potok ugleroda v postpirogennykh sosnyakh Srednego Eniseya (Flux from mineralization of carbon in post-fire pine forests in Midstream of Yenisey), *Lesovedenie*, 2018, No. 3, pp. 210–224.
- Trofimov S.S., *Ekologiya pochv i pochvennye resursy Kemerovskoi oblasti* (Ecology of soils and soil resources of the Kemerovo region), Novosibirsk: 1975, 300 p.
- Ufimtsev V.I., Kupriyanov O.A., Belanov I.P., Ecological-ecotonic role of phytogenous fields of Scots pine on coal dumps, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 140–149.
- Ufimtsev V.I., Opyt i sovremennoe sostoyanie lesnoi rekul'tivatsii v Kuzbasse (An experience and contemporary status of forest recultivation in Kuzbass), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 4, pp. 12–27.
- Uranov A.A., Fitogennoe pole (Phytogenic field), In: *Problemy sovremennoi botaniki* (Challenges of modern botany), Moscow, Leningrad: Nauka, 1965, Vol. 1, pp. 251–254.
- Uranov A.A., Mikhailova N.F., Iz opyta izucheniya fitogenogo polya *Stipa pennata* L. (From the experience of studying the *Stipa pennata* L. phytogenic field), *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody, Otdel biologicheskii*, 1974, Vol. LXXIX (5), pp. 151–159.
- Vedrova E.F. Biochemistry of carbon and nitrogen in the Siberian afforestation experiment, *Tree species effects on soil: implications for global change*, Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Trees and Soil Interactions, Implications to Global Climate Change, August 2004 Krasnoyarsk, Russia. Series IV: Earth environmental sciences, Amsterdam: IOS Press and Springer 2005, pp. 257–268.

- Vedrova E.F., Reshetnikova T.V., Massa podstilki i intensivnost' ee razlozheniya v 40-letnikh kul'turakh osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sibiri (Litter mass and intensity of litter decomposition in 40-year old plantations of the main forest forming species of Siberia), *Lesovedenie*, 2014, No. 1, pp. 42–50.
- Vedrova E.F., *Vliyaniye sosnovykh nasazhdenii na svoystva pochv* (The influence of pine plantations on soil properties), Novosibirsk: Nauka, 1980, 104 p.
- Vesterdal L., Elberling B., Christiansen J.R., Callesen I., Schmidt I.K., Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species, *Forest Ecology and Management*, 2012, Vol. 26, pp. 185–196.
- Vesterdal L., Schmidt I. K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species, *Forest Ecology & Management*, 2008, Vol. 255, pp. 35–48.
- Volobuev V.R., *Ekologiya pochv (ocherki)* (Soils ecology (articles)), Baku: Izd-vo Akad. nauk AzSSR, 1963, 260 p.
- Volokitina A.V., Osobennosti raspredeleniya dozhdevykh osadkov pod pologom khvoynogo lesa (Peculiarities of rainfall distribution under a coniferous stand canopy), *Lesovedenie*, 1979, No. 2, pp. 40–48.
- Walker J., Sharpe P.J.H., Penridge L.K., Wu H., Ecological field theory: the concept and field tests, *Vegetation*, 1989, Vol. 83, pp. 81–95.
- Wu H., Sharpe P.J.H., Walker J., Penridge L.K. Ecological field theory (EFT): A spatial analysis of resource interference among plants, *Ecological Modelling*, 1985, No. 29, pp. 215–243.
- Yastrebov A.B., Lychnaya N.V., Issledovanie fitogennykh polei derev'ev v lishainikovo-zelenomoshnykh sosnyakakh (The study of phytogenic fields of trees in the lichen-moss pine forests), *Botanicheskii zhurnal*, 1993, Vol. 78, No. 5, pp. 78–92.
- Yastrebov A.B., Napryazhennost' fitogennykh polei derev'ev v lishainikovo-zelenomoshnykh sosnyakakh (Tension of phytogenic tree fields in lichen-green moss pine forests), *Ekologiya*, 1996, No. 1, pp. 3–9.
- Zhukova L.A., Kontseptsiya fitogennykh polei i sovremennye aspekty ikh izucheniya (Concept phytogenic fields and current issues their study), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk*, 2012, Vol. 14, No. 1–6, pp. 1462–1465.
- Zhuravleva E.N., Ipatov V.S., Lebedeva V.K., Tikhodeeva M.Y., Izuchenie rastitel'nosti na lugakh pod vliyaniem sosny obyknovЕННОI (*Pinus sylvestris* L.) (Vegetation changes in meadows under the influence of Scotts pine (*Pinus sylvestris* L.)), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3*, 2012, No. 2, pp. 3–12.
- Zonn S.V., K voprosu o vzaimodeistvii lesnoi rastitel'nosti s pochvami (To the question of the interaction of forest vegetation with soils), *Pochvovedenie*, 1954, No. 4, pp. 51–60.
- Zonn S.V., *Sovremennye problemy genezisa i geografii pochv* (Modern problems of genesis and geography of soils), M.: Nauka, 1983, 168 p.

УДК 630х11:582.47(571.51/.52)

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ ХВОЙНЫХ ПОРОД В СРЕДНЕЙ СИБИРИ С 1960 г.<sup>1</sup>

© 2021 г. И. В. Тихонова<sup>а, \*</sup>, М. А. Корец<sup>б, с</sup>

<sup>а</sup>Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – филиал ФГБНУ  
“Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”,  
ул. Жуковского, 100/1, Новосибирск, 630082 Россия

<sup>б</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (ФГБНУ “Красноярский научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук”), Академгородок, 50, стр. 28, Красноярск, 660036 Россия

<sup>с</sup>Сибирский Федеральный Университет, ул. Киренского, 79, Красноярск, 660041 Россия

\*E-mail: selection@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Представлены результаты анализа пространственной и временной (по годам) изменчивости условий произрастания основных лесообразующих хвойных видов (ели сибирской *Picea obovata* Ledeb., лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb., лиственницы Гмелина *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* Du Tour., сосны обыкновенной *P. sylvestris* L., пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb.) в Средней Сибири и в горах Южной Сибири, включая районы Красноярского края, Иркутской области, республик Хакасия, Тыва, Бурятия, Якутия. Установлены пределы изменчивости некоторых климатических переменных в местообитаниях популяций хвойных видов по амплитудам среднегодовых температур, суммам осадков и гидротермическим коэффициентам за 1960–2016 гг. Показаны различия между видами по корреляциям между занимаемой ими относительно площади с величинами временной изменчивости метеорологических показателей. Сравниваются уровни изменчивости метеорологических условий произрастания хвойных лесов в таежной зоне с условиями произрастания популяций, расположенных на южной и северной границах ареала хвойных лесов, а также корреляции с ними у отдельных видов. Показаны особенности временной и пространственной изменчивости климатических показателей в местах произрастания хвойных видов в разных природно-климатических зонах Сибири. Выявлены достоверные различия по уровням межгодовой изменчивости тепло- и влагообеспеченности местообитаний хвойных видов, групп популяций и отдельных популяций, что подтверждает необходимость учитывать их в прогнозировании реакции видов на изменения климата. Отмечено, что динамика изменений температуры последних десятилетий специфична для разных природно-климатических зон и локальных местообитаний популяций. Для долгосрочного прогноза предлагается использовать частотные характеристики изменений климата в масштабах столетних и тысячелетних хронологий.

**Ключевые слова:** популяции лесообразующих хвойных видов, изменчивость климата, Средняя Сибирь.

DOI: 10.31857/S002411482102008X

Как известно, бореальные леса имеют важное хозяйственное и экологическое (климато-, средо- и почвообразующее) значение (Протопопов, 1975; Молчанов, 1978; Рахманов, 1984; Davin, Noublet-Ducoudre, 2010). В свою очередь, распространение лесов, видовой состав и продуктивность лесных фитоценозов в большой степени зависят от климата (Берг, 1925; Бузыкин, 1970; Сочава, 1980; Поликарпов и др., 1986; Кузьмичев, 2013; Усольцев, 2016). Примеры современного усыхания хвойных лесов, смещения их границ в Евразии

(Шиятов и др., 2007; Allen et al., 2010; Замолодчиков, 2011; Харук и др., 2016) и изменения продуктивности (Алексеев, Марков, 2003; Игошин, Кузьмичев, 2008; Martinez-Vilalta et al., 2008; Демаков, Смыков, 2009) свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности лесных экосистем к изменениям климата и составу воздуха. Поэтому повышение точности прогнозирования как изменений климата, так и реакции лесных экосистем имеет большое значение при долгосрочном планировании способов и интенсивности эксплуатации лесных ресурсов и мер содействия их восстановлению, с расчетом на будущее состояние лесов и окружающей среды.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ФГБНУ ЗСО ИЛ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (00356-2019-0024).

Необходимо отметить, что основные площади наиболее ценных хвойных лесов Евразии сосредоточены в России, а внутри России – в Сибири и на Дальнем Востоке. При этом в Сибири, особенно на севере и в горных районах, отмечены наиболее быстрые изменения климата и, соответственно, реакция природных экосистем (Замолодчиков, 2011; Изменение климата ..., 2013). Для уточнения экологических характеристик видов, в развитие и дополнение исследования закономерностей распределения лесов Сибири в экологических градиентах (Шумилова, 1962; Пузаченко, Скулкин, 1981; Назимова и др., 2004; Цельникер и др., 2010; Tchebakova et al., 2016; Усольцев, 2016; и др.), необходимо учитывать разную способность популяций к акклиматизации, показанную на примере многих видов животных и растений (Мамаев и др., 1988; Алтухов, 2004). И такие попытки предпринимаются на основе наблюдений за ростом географических культур (Rehfeldt et al., 2002; Berlin et al., 2016). Хотя необходимо отметить, что географические культуры произрастают в условиях загущенных рядовых посадок, а не естественно размещены на площади, поэтому только этих данных для выяснения устойчивости популяций, на наш взгляд, недостаточно. Разрабатываются также морфологические подходы к установлению границ популяций видов (Семериков, 1986; Видякин, 2014; Тихонова и др., 2014; Зацепина и др., 2016), но это очень трудоемкая и длительная работа, особенно для крупных лесных стран. Мы предположили, что решить эту проблему можно с помощью анализа изменчивости условий произрастания популяций, считая их (условия) неотъемлемой характеристикой самих популяций.

Целью проводимых исследований являлось получение информации о пределах пространственно-временной изменчивости метеорологических показателей в местах произрастания популяций хвойных видов и примерной оценке на ее основе потенциальной устойчивости популяций в меняющемся климате с использованием метеорологической и лесоустроительной баз данных.

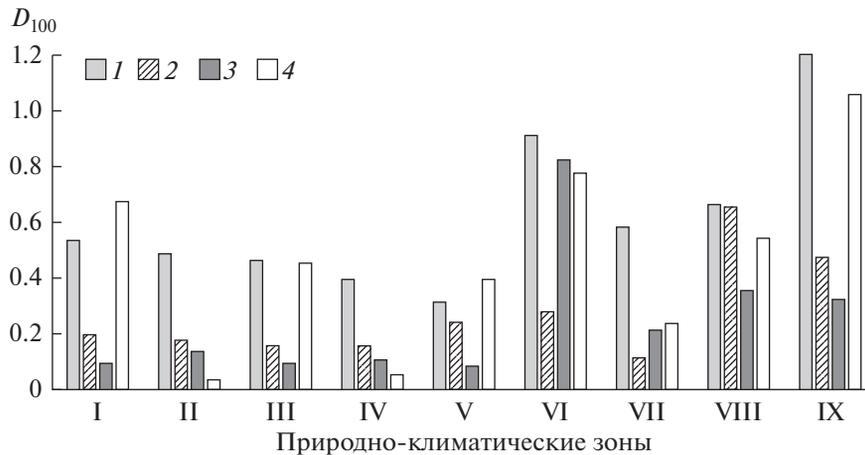
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В работе были использованы карта “Леса СССР” масштаба 1 : 2500000 (1990), материалы лесоустройства и карта растительного покрова России масштаба 1 : 2500000 (Барталев и др., 2011). Для климатического анализа изучаемой территории и построения климатической карты использовали среднемесячные значения приземной температуры воздуха и суммы осадков по 116 метеостанциям Средней Сибири, включая районы Красноярского края, Иркутской области, республик Хакасия, Тыва и Бурятия, районы Якутии западнее р. Лена за 1960–2016 гг. (база данных Всероссийского научно-исследовательского ин-

ститута гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД)). Ввиду недостатка и неравномерности распределения метеостанций на исследуемой территории для составления климатических карт была использована база данных UEA CEDA, CRU (Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia) (Mitchell, Jones, 2005; Harris et al., 2014) в виде матриц экстраполированных значений среднемесячной температуры воздуха с ячейками  $0.5^\circ$  с.ш.  $\times$   $0.5^\circ$  в.д. Для каждой метеостанции и каждой ячейки матрицы были рассчитаны среднееголетние значения, экстремумы и среднеквадратичные отклонения метеорологических показателей. Матрицы данных были преобразованы в формат растровых изображений в ГИС средствами пакета ESRI ArcGIS. Пространственную привязку осуществляли с помощью цифровой векторной топоосновы масштаба 1 : 1000000 и цифровой модели рельефа (SRTM 90 DEM). При составлении климатических карт учитывался рельеф местности. Были использованы следующие метеорологические показатели: среднегодовая температура воздуха ( $T_{cp}$ ), годовая сумма осадков ( $CO_r$ ), амплитуда среднемесячных температур воздуха ( $A$ ), индекс континентальности Конрада ( $ИК = 1.7A/\sin(\varphi + 10) - 14$ , где  $A$  – средняя годовая амплитуда температур местности,  $\varphi$  – широта местности), гидротермические коэффициенты за год и за ноябрь, которые рассчитывались по формулам: гидротермический коэффициент по Де Мартону (Хромов, Мамонтов, 1974) с поправкой на более низкие температуры  $ГТК_r = CO_r(T_{cp} + 20)^{-1}$  и гидротермический коэффициент  $ГТК_n = T_{cp_n}CO_n^{-1}$  ( $T_{cp_n}$  и  $CO_n$  – средняя температура и сумма осадков за ноябрь) для примерной оценки степени промерзания почвы в ноябре при невысоком снежном покрове. Изменчивость условий произрастания в пространстве оценивали по среднеквадратичному отклонению ( $\sigma$ ), амплитуде среднееголетних значений ( $A_p$ ) и разнице среднееголетних значений метеорологических показателей, деленной на 100 км расстояния между точками ( $D_{100}$ ). Дополнительно проводился анализ временной (по годам) изменчивости перечисленных показателей для всех метеостанций (по  $\sigma$  и по амплитудам среднегодовых значений ( $A_t = T_{cp\ max} - T_{cp\ min}$ )).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вычисления изменчивости метеорологических показателей в местах произрастания хвойных лесов проводили в границах природно-климатических зон. Расчеты были выполнены в целом для хвойных лесов и отдельно для каждого из пяти лесобразующих хвойных видов (виды лиственницы сибирскую и Гмелина не разделяли). Было установлено, что наиболее изменчивы в



**Рис. 1.** Разница среднееголетних значений метеорологических показателей, деленная на 100 км расстояния между точками ( $D_{100}$ ) (пространственная изменчивость)  $T_{cp}$  (1),  $CO_2 \times 10^{-2}$  (2),  $ГТК_г$  (3) и  $ТГК_н \times 10$  (4) внутри природно-климатических зон. I – лесотундра и предтундровые леса, II, III, IV – соответственно, подзоны северной, средней и южной тайги, V – зона лесостепи, VI – горные территории с субарктическим типом поясности, VII – горные территории с бореальным типом поясности, VIII – горные территории с суббореальным типом поясности, IX – горные территории с субаридным типом поясности.

пространстве условия произрастания хвойных лесов в горных районах с субарктическим, субаридным и суббореальным типами высотной поясности (рис. 1). Для этих природно-климатических зон получены наибольшие пространственные дисперсии ( $\sigma$ ), средние значения  $D_{100}$  и пределы экстремальных значений всех используемых климатических показателей, кроме  $ТГК_н$ . Вместе с тем, в двух из перечисленных природно-климатических зонах климат характеризуется меньшей межгодовой изменчивостью метеорологических переменных: в горах с субаридным типом поясности – по  $T_{cp}$ , в горах с суббореальным типом поясности – по  $T_{cp}$  и гидротермическим коэффициентам  $ГТК_г$  и  $ТГК_н$ . В других природно-климатических зонах (их обозначения приведены в табл. 1) условия менее изменчивы в пространстве. Из них относительно более высоким диапазоном значений  $ТГК_н$  в пространстве отличаются горы с бореальным типом поясности, а  $T_{cp}$  и ИК – лесотундра (табл. 1). Наименее изменчивы по годам условия произрастания хвойных лесов в южной тайге, а из горных территорий – в горах с суббореальным типом поясности, что существенно отличает их от других природно-климатических зон.

На исследуемой территории хвойные леса произрастают в интервале среднееголетних значений  $T_{cp}$ , равном  $24.0^{\circ}C$ , а с учетом экстремумов (предельных отклонений) –  $28.7^{\circ}C$ ;  $CO_2$ , соответственно 918 и 1600 мм;  $ГТК_г$  – 31.3 и 38.2;  $ТГК_н$  – 7.7 и 37.6. Амплитуды значений метеорологических переменных внутри ареалов каждого из хвойных видов приведены в табл. 2. Наиболь-

ший по региону интервал среднееголетних температур воздуха ( $A_p, T_{cp}$ ) характерен для лиственницы, он сопоставим с общим интервалом для хвойных видов –  $23.0^{\circ}C$  (с учетом наибольших отклонений температуры воздуха в отдельные годы –  $27.5^{\circ}C$ ), за ней идут ель сибирская (соответственно 16.3 и  $21.0^{\circ}C$ ) и сосна обыкновенная (14.3 и  $19.0^{\circ}C$ ). Сосна сибирская кедровая (11.4 и  $15.5^{\circ}C$ ) и пихта сибирская (9.3 и  $15.2^{\circ}C$ ) распространены в более узких границах условий теплообеспеченности территории. По гидротермическим коэффициентам эти пределы составили: по среднееголетним данным  $ГТК_г$  – 3.9–4.3 (пихта сибирская, сосна обыкновенная и сосна сибирская, с учетом экстремальных значений – 6.6–8.0), 5.9 (ель сибирская, с экстремумами 14.5) и 7.8 (виды лиственницы, только в горах субарктики и лесотундре  $ГТК_г$  достигают значений 29.0–37.8);  $ТГК_н$  – 2.0 и 3.4 у пихты сибирской и ели сибирской (с крайне редкими для них экстремальными отклонениями до 20.6 и 21.2), 3.1 у сосны сибирской кедровой (соответственно 28.6), 2.7 и 7.6 соответственно, у светлохвойных видов сосны обыкновенной и лиственницы (с учетом отдельных экстремумов – 33.5 и 36.8). По индексу континентальности различия между видами были несущественными, за исключением пихты сибирской, ограниченной условиями с меньшей амплитудой температур внутри сезона.

В обобщенном анализе для всех природно-климатических зон, где растут хвойные леса, установлена статистически значимая корреляция их относительной площади (в % к площади участков  $0.5^{\circ}$  с.ш.  $\times$   $0.5^{\circ}$  в.д.) со среднееголетними значениями  $T_{cp}$ ,  $ГТК_г$  и  $ТГК_н$  ( $r = 0.49, -0.40, 0.52$

**Таблица 1.** Пространственная изменчивость метеорологических показателей в местах произрастания хвойных лесов в границах природно-климатических зон (ПКЗ) Средней Сибири

Природно-климатическая зона		Метеорологические показатели				
		$T_{cp}$ , °C	$CO_r$ , мм	ГТК <sub>r</sub>	ТГК <sub>н</sub>	ИК
Лесотундра и предтундровые леса	СМ	-9.6	420	4.1	-1.16	67.6
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-17.9...-6.3	227-552	3.2...28.4	-3.1...-0.5	58.7-90.6
	$Extr_{min/max}$	-20.1...-4.5	124-720	2.1...31.7	-13.4...-0.12	42.5-101.7
Горные территории с субарктическим типом поясности	СМ	-12.6	415	6.0	-1.19	70.7
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-21.5...-8.2	193-530	3.8...33.6	-5.6...-0.2	60.2-91.6
	$Extr_{min/max}$	-23.8...-4.2	167-740	1.9...38.9	-25.7...-0.15	45.2-104.8
Горные территории с бореальным типом поясности	СМ	-7.1	462	3.7	-1.27	70.9
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-15.0...-2.4	320-564	2.3...5.2	-9.4...-0.3	59.3-79.9
	$Extr_{min/max}$	-17.2...-0.3	217-850	1.7...15.3	-37.6...-0.2	45.9-94.5
Подзона северной тайги	СМ	-10.1	383	3.9	-1.23	73.7
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-14.8...-4.0	259-580	2.7...5.6	-4.3...-0.4	61.3-93.4
	$Extr_{min/max}$	-18.5...-0.4	166-765	1.75...25.1	-10.9...-0.1	43.8-107.1
Подзона средней тайги	СМ	-7.8	350	3.0	-0.84	74.2
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-16.1...-1.0	247-578	2.1...6.3	-3.6...-0.3	47.3-95.1
	$Extr_{min/max}$	-18.1...1.3	185-706	1.5...11.6	-8.0...-0.03	45.7-109.4
Подзона южной тайги	СМ	-1.7	426	2.4	-0.45	64.3
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-4.6...0.0	285-630	1.7...4.0	-1.1...-0.3	59.0-70.8
	$Extr_{min/max}$	-7.5...2.9	224-683	1.3...4.3	-6.5...-0.05	42.7-92.0
Зона лесостепи	СМ	-0.4	430	2.2	-0.83	63.6
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-3.7...1.2	287-510	1.1...2.7	-3.5...-0.3	56.1-75.7
	$Extr_{min/max}$	-6.1...4.0	173-657	0.7...4.2	-12.6...-0.04	38.3-91.4
Горные территории с суббореальным типом поясности	СМ	-4.7	615	3.6	-0.81	66.2
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-9.0...-0.3	363-1248	2.4...5.9	-2.9...-0.3	57.3-77.8
	$Extr_{min/max}$	-10.9...2.9	254-1740	1.0...8.9	-10.0...-0.06	44.0-92.8
Горные территории с субаридным типом поясности	СМ	-4.4	457	2.8	-1.09	69.9
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-7.9...-1.2	332-542	1.6...3.8	-8.7...-0.3	57.2-79.0
	$Extr_{min/max}$	-10.3...2.6	179-653	1.04...6.6	-14.8...-0.1	47.6-92.8

Примечание. В таблицах 1 и 2:  $T_{cp}$  – среднегодовая температура воздуха,  $CO_r$  – среднегодовая сумма осадков, ГТК<sub>r</sub>, ТГК<sub>н</sub> – гидротермические коэффициенты за год и ноябрь, ИК – индекс континентальности. СМ – среднегодовое значения,  $СМ_{min}/СМ_{max}$  и  $Extr_{min/max}$  соответственно – среднегодовое и абсолютные значения минимума и максимума внутри природно-климатической зоны.

соответственно), а также со среднеквадратичными отклонениями ( $\sigma$ ) и амплитудами экстремальных значений ( $A_r$ ) гидротермических коэффициентов ГТК<sub>r</sub> и ТГК<sub>н</sub> ( $r = -0.45...-0.57$ ). Как видим, наиболее тесные связи получены с ТГК<sub>н</sub>. При этом не выявлено достоверной корреляции между площадью хвойных лесов и показателями временной изменчивости  $T_{cp}$  и  $OS_r$ , вероятно, из-за сопряженных эффектов между ними и различий между видами. Более тесные связи со среднегодовыми значениями  $T_{cp}$  обнаруживаются ближе к границам ареалов: положительные – на севе-

ре (в лесотундре, горах субарктики и северной тайге), и от положительных до отрицательных – на юге (в лесостепи и горах с субаридным типом поясности) (рис. 2). Поскольку на границах природно-климатических поясов происходит смена лимитирующих факторов (Сочава, 1980; Одум, 1986), был проведен анализ временной изменчивости климатических показателей в области сплошного распространения хвойных лесов и за ее пределами: сравнивали условия произрастания популяций хвойных видов в южной и средней тайге, отличающихся наибольшей продуктивно-

**Таблица 2.** Средние значения и пределы климатических показателей за 1960–2016 гг. в популяциях исследуемой части ареалов видов хвойных

Вид	Показатели	$T_{cp}$ , °C	$CO_r$ , мм	$ГТК_r$	$ГТК_n$
Лиственницы сибирская и Гмелина	СМ	-9.1	378	4.22	-1.38
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-22.5/0.5	227/900	1.72/32.60	-7.9/-0.3
	$Extr_{min/max}$	-24.7/2.8	152/1244	0.86/38.9	-37.6/-0.04
	$\sigma_{min/max}$	0.8/1.66	35.7/127.7	0.31/9.79	0.14/7.64
	$\Delta_{extr}$	3.4/7.0	156/568	1.32/37.3	0.66/36.8
Сосна обыкновенная	СМ	-5.4	403	2.82	-0.90
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-12.9/1.4	234/698	1.1/4.96	-3.0/-0.28
	$Extr_{min/max}$	-15.0/4.0	141/917	0.70/7.7	-34.2/-0.04
	$\sigma_{min/max}$	0.78/1.4	39.8/118.5	0.31/1.03	0.15/4.34
	$\Delta_{extr}$	3.5/6.08	170/534	1.3/4.79	0.62/33.5
Ель сибирская	СМ	-5.7	453	3.31	-0.73
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-16.1/0.2	248/911	1.88/7.82	-3.65/-0.25
	$Extr_{min/max}$	-18.1/2.9	172/1153	1.23/14.7	-21.7/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.84/1.37	40.8/127.7	0.30/3.62	0.15/2.79
	$\Delta_{extr}$	3.60/6.10	159/646	1.39/11.3	0.62/21.2
Сосна сибирская кедровая	СМ	-4.3	492	3.17	-0.67
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-9.9/1.3	330/1248	1.75/5.97	-3.36/-0.25
	$Extr_{min/max}$	-12.1/3.4	166/1740	0.87/8.9	-29.1/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.78/1.36	40.8/127.7	0.31/1.17	0.15/3.99
	$\Delta_{extr}$	3.55/6.09	186/568	1.31/5.12	0.64/28.6
Пихта сибирская	СМ	-3.3	514	3.12	-0.43
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-8.9/1.4	341/1248	1.80/5.85	-2.24/-0.25
	$Extr_{min/max}$	-11.2/4.0	166/1740	0.87/7.50	-21.7/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.79/1.36	46.9/115.0	0.31/1.07	0.14/2.75
	$\Delta_{extr}$	3.59/6.1	202/547	1.32/4.86	0.62/20.6

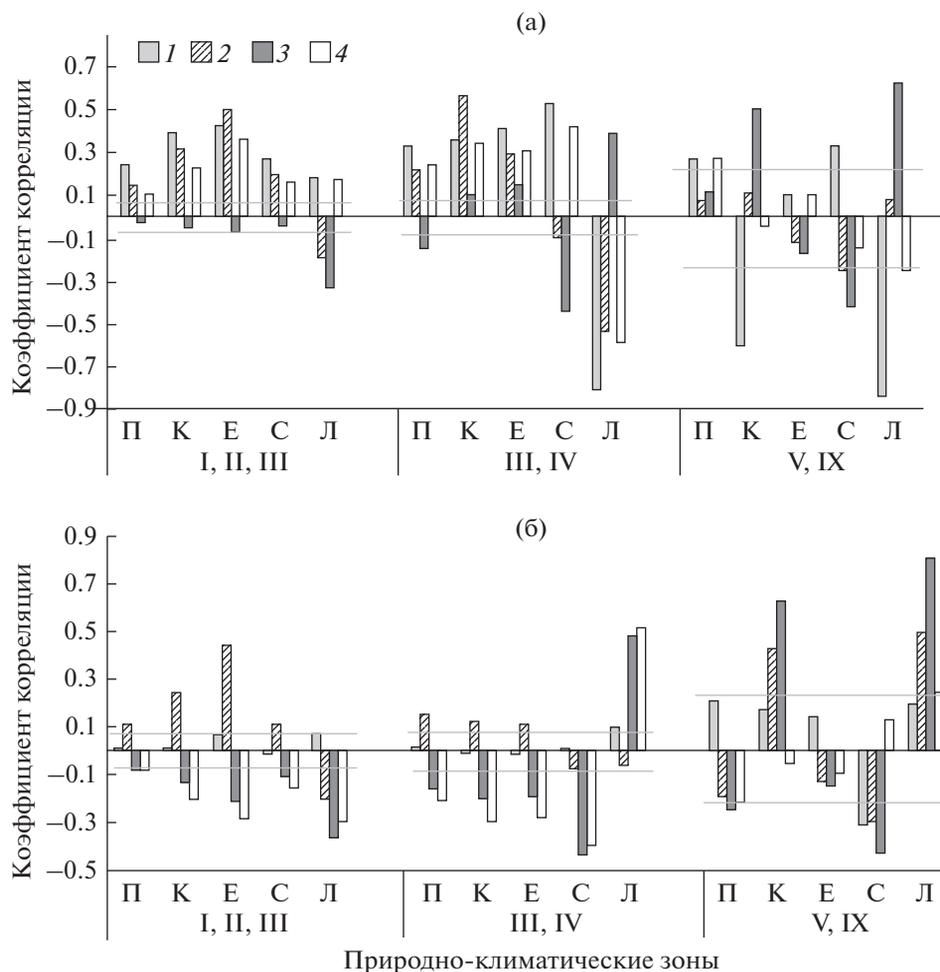
Примечание: СМ – среднееголетнее;  $СМ_{min}/СМ_{max}$  и  $Extr_{min/max}$  – среднееголетние и среднегодовые максимальное и минимальное значения показателя. *Изменчивость во времени внутри популяций*:  $\sigma_{min/max}$  – популяционные пределы временной изменчивости (среднеквадратичных отклонений);  $\Delta_{extr}$  – интервалы (разница) между минимальным и максимальным значением показателя за отдельные годы внутри популяций.

стью, – одним из основных критериев оптимальности (Заугольнова, 1985; Плюта, 1994; и др.), с местообитаниями северных и южных популяций (перечислены перед ссылкой на рис. 2).

Было установлено, что в подзонах средней и южной тайги среднеквадратичные отклонения и амплитуды экстремальных значений  $ГТК_r$  и  $ГТК_n$  достоверно отличаются в 2–3 раза более низкими величинами по сравнению с другими природно-климатическими зонами, в том числе по сравнению с рядом расположенными горами бореальной зоны. Меньшей временной изменчивостью, как мы отмечали ранее, характеризуется также в целом прохладный гумидный климат гор Южной Сибири с суббореальным типом высотной пояс-

ности. Условия в средней и южной тайге, горах с суббореальным типом поясности отличаются также более высокими амплитудами и среднеквадратичными отклонениями  $CO_r$  и более низкой изменчивостью  $T_{cp}$ . При этом меньшая изменчивость  $ГТК_r$  в этих природно-климатических зонах свидетельствует о большей частоте лет с однонаправленными изменениями температуры и осадков и поэтому меньшей вероятности возникновения засух.

Они также характеризуются относительно невысокой степенью промерзания почвы в ноябре: за пределами этих природно-климатических зон в отдельные годы почва в конце осени – начале зи-



**Рис. 2.** Коэффициенты корреляции ( $r$ ) относительной площади, занимаемой хвойными видами, со среднемноголетними значениями (а) и среднеквадратичными отклонениями (б)  $T_{cp}$ ,  $OS_r$ ,  $ГТК_r$ ,  $ТГК_n$  в Средней Сибири (горизонтальные линии – порог достоверности  $r$  при  $p < 0.01$ , для лесостепи и гор с субаридным типом поясности он выше из-за меньшей площади природно-климатических зон и, соответственно, выборки участков); I–IX – природно-климатические зоны (см. рис. 1); П – пихта сибирская, К – сосна сибирская, Е – ель сибирская, С – сосна обыкновенная, Л – виды лиственницы.

мы может более резко охлаждаться, а  $ТГК_n$  – опускаться до  $-12.6...-14.8$  в лесостепной зоне и в горах с субаридным типом поясности, до  $-10.9...-37.6$  в лесотундре, горах субарктики, горах бореальной зоны и в северной тайге (табл. 1). А, как было отмечено выше, между площадью, занимаемой хвойными лесами, и этим показателем (и его изменчивостью) были получены самые высокие коэффициенты корреляции, чувствительность темнохвойных видов к позднему весенним и ранним осенним заморозкам перечисляется в их био-экологической характеристике во многих справочниках по дендрологии (Шиманюк, 1967; и др.). Таким образом, и на северной границе ареала, там, где рост деревьев ограничен недостатком тепла, и на юге в условиях семиаридного климата, где рост чаще ограничивается осадками, гидротермические коэффициенты отличаются более

высокой межсезонной изменчивостью, наиболее высокой в северных районах Средней Сибири.

Обращает также на себя внимание увеличение степени проявления экологических различий между видами с севера на юг (рис. 2). В таежной зоне лиственница занимает более прохладные и влажные места, а сосна обыкновенная – более сухие, при этом сосна предъявляет большие требования к стабильности гидротермических условий (отрицательные значения коэффициентов корреляции с  $\sigma ГТК_r$  получены во всех природно-климатических зонах). У южной границы хвойных лесов сосна сибирская кедровая и лиственница сибирская встречаются в более прохладных местообитаниях с более высокой изменчивостью климатических показателей по сравнению с другими видами. Пихта сибирская везде обнаруживает положительные корреляции со среднемного-

голетним значениями  $T_{cp}$ ,  $OS_r$ ,  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  и отрицательные – с изменчивостью ( $\sigma$ ,  $A_t$ )  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ , невысокие, по-видимому, из-за более ограниченного в целом ее распространения. Ель сибирская занимает промежуточное положение. Таким образом, именно на юге ареалов лучше изучать экологические особенности хвойных видов по реакции популяций на временную изменчивость климатических условий, особенно водного режима местности.

В результате дискриминантного анализа было установлено, что на исследуемых участках относительная площадь, занимаемая видами, на 53.8% объясняется зависимостью от среднегодовых климатических характеристик местообитаний (4 достоверных канонических корня,  $F = 192.08$ ,  $p < 0.00001$ ), и на 45.4% – их межсезонной изменчивостью ( $\sigma$  и  $A_t$ ) в популяциях (также 4 достоверных канонических корня,  $F = 79.66$ ,  $p < 0.00001$ ). В обоих вариантах анализа дистанции Махаланобиса между всеми видами были достоверны. Таким образом, временная изменчивость климатических показателей также является существенной экологической характеристикой хвойных видов, и ее изучение в отдельных популяциях представляет определенный интерес, в том числе для уточнения лесосеменного районирования.

Внутри видов отдельные популяции различались между собой в 1.4–2 раза по уровню временной изменчивости среднегодовой температуры, в 2.5–4 раза – по изменчивости суммы осадков за год (табл. 2). Амплитуды экстремальных значений среднегодовой температуры ( $A_t$ ) за 1960–2016 гг. в популяциях составили от 3.4 до 7.0°C, среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ )  $T_{cp}$  в местообитаниях популяций хвойных видов варьировали в пределах  $\pm 0.8$ – $1.7^\circ\text{C}$  (при включении 95% случаев ( $\pm 2\sigma$ ) –  $3.6$ – $6.8^\circ\text{C}$ ). Наибольшие различия между популяциями внутри видов наблюдались по гидротермическим коэффициентам:  $ГТК_r$  – у видов лиственницы в 31 раз, (в абсолютных значениях – это величина  $\sigma_{min/max}$  приведена в табл. 2), у ели сибирской (в 12 раз) и в 3–4 раза у остальных видов;  $ТГК_n$  – в 54 раза у видов лиственницы, в 29 и 27 раз соответственно у сосны обыкновенной и сосны сибирской кедровой, в 19–20 раз у пихты сибирской и ели сибирской. Как видим, наибольшей временной изменчивостью части популяций и межпопуляционными различиями по сочетанию условий тепло- и влагообеспеченности местообитаний ( $ГТК_r$ ) характеризуются виды лиственницы и ель сибирская, а по  $ТГК_n$  (числу градусов ниже 0, приходящихся на 1 мм снежного покрова к началу зимы) – стлетьнохвойные виды и сосна сибирская, что вполне соответствует их эколого-фитоценологическим характеристикам (Шиманюк, 1967). Отметим, что в анализе изменчивости условий произрастания

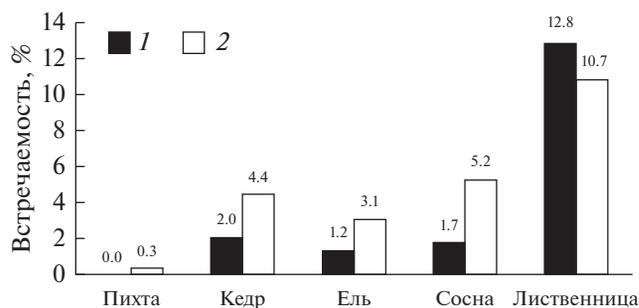
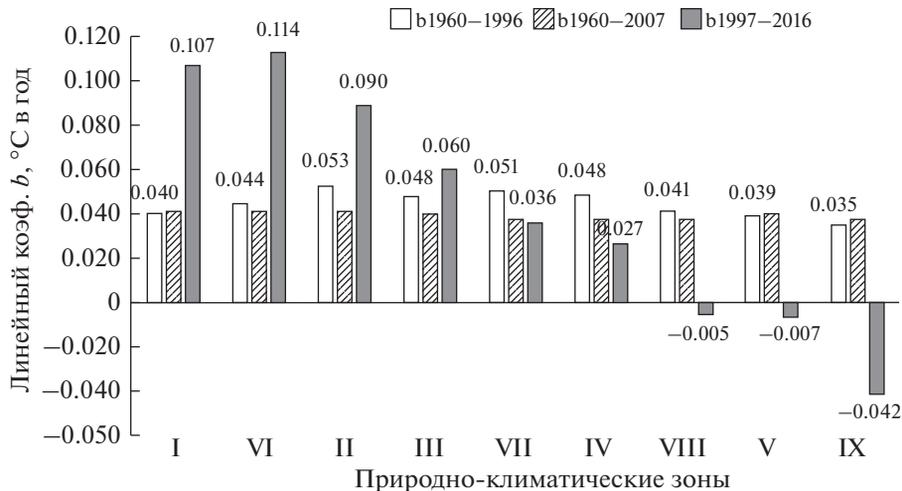


Рис. 3. Относительная встречаемость вида (% площадок к числу площадок с участием каждого вида) в условиях высокой временной изменчивости ( $\sigma \geq 1$ ) сразу двух показателей  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  (1), только одного  $ТГК_n$  (2).

популяций сразу по двум коэффициентам  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  размах значений существенно сужается для ели сибирской, и особенно, пихты сибирской по сравнению с другими видами, что может объяснять худшую приспособляемость этих видов к современным изменениям климата (Манько, Гладкова, 1995), особенно к разнонаправленным изменениям температуры и осадков в отдельные годы (Неволин и др., 2007). Из хвойных видов лиственница ssp. наиболее устойчива к условиям высокой временной изменчивости (по обоим коэффициентам).

Результаты расчетов встречаемости популяций видов, произрастающих в условиях высокой временной изменчивости одновременно двух гидротермических коэффициентов  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ , приведены на рис. 3. Такие местообитания находятся большей частью в лесотундре, горах субарктики, северной тайге, редко обнаруживаются в средней тайге и горах бореальной зоны, единично в горах Южной Сибири с суббореальным типом поясности. Отметим, что для всех исследуемых видов получены достоверные различия между группами популяций, приуроченных к крупным геоморфологическим единицам рельефа, по изменчивости климатических условий во времени ( $F = 2.89$ – $497.9$ ,  $p < 0.038$ ).

Нельзя не отметить, что проведенное нами исследование включает период наибольших зафиксированных в последнее столетие изменений климата – уменьшения континентальности и увеличения теплообеспеченности территории Евразии (Семенов и др., 2014), в результате которых сдвинулись *потенциальные* климатические границы природно-климатических зон и некоторых хвойных видов (Назимова и др., 2005; Изменение климата ..., 2013). В меньшей степени при этом изменились ареалы самих видов, поскольку для этого требуется значительно больший период времени (Назимова, Поликарпов, 2001). В литературе приводятся многочисленные свидетельства продви-



**Рис. 4.** Изменение среднегодовой температуры воздуха на территории Средней Сибири за 3 разных по длительности периода: 1960–1996 гг., 1960–2007 гг. и в 1960–2016 гг.; I–IX – природно-климатические зоны (см. рис. 1).

жения хвойных видов на десятки и сотни метров к северу в глубь лесотундры и выше границы леса в горах (Харук и др., 2005; Шиятов и др., 2007; Замолотчиков, 2011), распространение подроста мы наблюдали также вокруг лесостепных боров в Южной Сибири. Однако используемые нами источники информации (карты мелкого масштаба, особенно по климату) не позволяют зафиксировать данные изменения ареалов видов, поэтому такая задача нами не ставилась. При этом перечисленные изменения климата никоим образом не отразились на достоверности результатов приведенного выше анализа (территории сравнивались за аналогичные периоды времени по каждой природно-климатической зоне). И все же для получения дополнительной информации о временной изменчивости показателей в этот период были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии изменений температуры (тренды) за периоды 1960–1996, 1960–2007 и 1960–2016 гг. (рис. 4) – в переломных точках на кривых и соответственно оценена изменчивость  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ . Было установлено, что динамика изменений температуры носит не только региональный характер, но и специфична для разных природно-климатических зон, что неоднократно было отмечено многими исследователями (Назимова, Поликарпов, 2001; Изменение климата ..., 2013). Как видно из рис. 4, дальнейшее заметное потепление продолжается не во всех районах Сибири – в лесотундре, северной тайге и горах субарктики. В южных районах с 2007 г. положительный тренд сменился на отрицательный (в лесостепи, горах с субарктическим и суббореальным типами поясности). Вместе с ростом  $T_{cp}$  наблюдалось снижение изменчивости гидротермических коэффициентов в районах севера; отсутствие заметных однонаправленных изменений в горах бореальной зоны, средней и юж-

ной тайге; для пунктов, расположенных в лесостепи и горах с субарктическим типом поясности, обнаружилось большое разнообразие локальных изменений – от постепенного снижения изменчивости  $ГТК_r$ ,  $ТГК_n$  с 1996 г. до отсутствия определенных изменений  $\sigma$  и  $A_p$  или роста изменчивости  $ГТК_r$  с 2007 г.

В заключение проведенного предварительного исследования отметим, что для практического использования полученных результатов потребуются расширение набора климатических показателей по их внутрисезонной изменчивости для установления частоты и продолжительности засушливых периодов, а также анализ почвенных условий (Тихонова и др., 2018), что и планируется сделать в дальнейшем. При этом необходимо иметь в виду, что географические пределы распространения видов определяются не только климатом, но и историей и стадией развития лесного фитоценоза, пожарами, вырубками (Щербаков, 1975; Сафронова, 1993). В пограничных условиях роста они с трудом конкурируют с теми видами, для которых данный климат более благоприятен, и поэтому часто не достигают потенциально возможных границ своих климатических ареалов (Воейков, 1884). Например, отмечается высокая холодостойкость не только лиственницы, но и сосны с елью на севере Якутии, где среди лиственничных редколесий часто встречается ель сибирская (Щербаков, 1975; Сочава, 1980). По берегам р. Хатанги этот вид доходит до  $70^\circ$  с.ш. (Берг, 1947, с. 154), часто проникает в лесотундру и лесостепь (Крылов, 1961; Кулагин, 1980), а сосна обыкновенная в Якутии доходит до северной границы лесов и нередко преобладает в подросте лиственничников (Щербаков, 1975), хотя считается, что она не выносит мерзлотности почвы.

Сосна сибирская кедровая также отличается достаточно высокой холодостойкостью и в северо-восточной части ареала может образовывать древостой большей продуктивности по сравнению с другими видами (!), занимая при этом самые высокие и холодные местообитания (Щербаков, 1975), т.е. эта граница резкая, без признаков постепенного ослабления вида. Поэтому можно предположить, что ее распространению на севере (как и на юге (Назимова и др., 2005)) также препятствуют пожары (темнохвойные виды наименее устойчивы к ним), вырубки, поедание животными. Лишь у пихты сибирской ареал не выходит за границы лесной зоны. Поэтому результаты исследования и оценки потенциальной устойчивости популяций, групп популяций и видов верны только для современного состояния лесов, влияние других неучтенных факторов вносит определенную, по-видимому, немалую ошибку при изучении климатических закономерностей географии распространения хвойных видов.

Представляется, что для получения более надежных прогнозов устойчивости хвойных лесов необходимо комплексное прогнозирование изменений таких факторов, как пожары и вредители, опосредованные климатическими и антропогенными (вырубки и пожары) факторами, а с учетом цикличности изменений климата (Шнитников, 1957; Максимов, 1995; Кашкаров, Поморцев, 2007; Семенов и др., 2014) надежнее для долгосрочных прогнозов использовать частотные характеристики изменений климата (амплитуды и периодичность колебаний) в масштабах столетних и тысячелетних хронологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было установлено, что во всех природно-климатических зонах в большей степени обнаруживается сопряженность площади хвойных видов с гидротермическими коэффициентами: в большинстве случаев положительная со среднемноголетними значениями  $TГК_n$  и отрицательная с  $TГК_r$ , а также отрицательные корреляции с межгодовой изменчивостью обоих коэффициентов для всех видов на севере (в лесотундре, северной тайге и горах субарктики), и разные для видов в других природно-климатических зонах. Следовательно, на юге ареалов лучше выражены экологические особенности хвойных видов по реакции популяций на временную изменчивость климата. В условиях высокой изменчивости двух гидротермических коэффициентов произрастает значительная часть популяций лиственницы ssp. и лишь немногие популяции остальных видов. Совсем не обнаружено таковых для пихты сибирской. Поэтому *временная изменчивость климатических показателей* (по  $\sigma$  и  $A_t$ ) *является существенной до-*

*полнительной экологической характеристикой хвойных видов.*

Были выявлены особенности пространственной и временной изменчивости метеорологических условий роста основных лесобразующих видов хвойных на территории Средней Сибири с 1960 по 2016 г. Полученные данные в целом подтверждают известные экологические характеристики видов и позволяют уточнить эти характеристики и пределы изменчивости метеорологических показателей не только для видов в целом, но и для отдельных популяций. Установлено, что интервалы климатических ареалов видов в Средней Сибири в 2.5–6.8 раз шире амплитуд межгодовых колебаний условий произрастания отдельных популяций внутри видов по  $T_{cp}$ ,  $CO_r$  и  $TГК_r$ . Поэтому существует небольшая вероятность того, что найдутся популяции, способные адаптироваться к любым резким изменениям климата и, следовательно, *для устойчивого рационального лесопользования необходимо сохранение популяционной структуры видов.* Это согласуется с результатами исследований и выводами ряда авторов (Мамаев и др., 1988; Путенихин, 2000; Видякин, 2014), использовавших морфологические признаки деревьев. Внутри хвойных видов популяции существенно различаются по уровням временной изменчивости метеорологических условий произрастания. Достоверность влияния этого фактора на их распространение подтверждает необходимость учитывать его в прогнозировании реакции видов на изменения климата. Например, равнинные и горные территории сильно различаются по структуре (соотношению величин временной – для каждой популяции, и пространственной – между популяциями) изменчивости климата (на равнинах преобладает временная изменчивость климата, в горах – пространственная). Это необходимо учитывать в лесосеменном районировании, не надеясь на то, что можно вырубать равнинные леса и потом их восстанавливать семенами горных популяций.

На основании полученных данных о межгодовой изменчивости климатических показателей можно предположить, что популяции хвойных видов способны адаптироваться к постепенному повышению или понижению температуры воздуха на 3.5–7.0°C. Это относится, прежде всего, ко взрослым деревьям. Подрост, а тем более всходы, появляющиеся уже в новых условиях, имеют большие возможности адаптироваться не только к понижению, но и к росту температуры, если оно будет компенсировано, согласно правилу Иверсена–Гричука (Кашкаров, Поморцев, 2007), пропорциональным увеличением количества осадков. Как показало проведенное исследование, большая часть популяций хвойных видов Средней Сибири существует в условиях невысокой

временной изменчивости ГТК<sub>r</sub> и поэтому может быть весьма чувствительна к росту его изменчивости и аридизации климата на южной границе ареала, особенно если эти отклонения в отдельные годы будут переходить минимальный для темнохвойных видов предел 1.0, для светлохвойных — 0.7, а длительностью в несколько лет — 1.2 и 0.85, соответственно. Из-за недостаточного количества осадков в конце осени — начале зимы может также снижаться показатель ТГК<sub>н</sub>, возрастать его изменчивость, что имеет большое значение для темнохвойных видов, в первую очередь, пихты сибирской. Особого внимания в этой связи заслуживают популяции, произрастающие в условиях семиаридного климата, а также популяции из природно-климатических зон, отличающихся относительной стабильностью условий произрастания (южной тайги и гор с суббореальным типом поясности). Следует также отметить, что немаловажное значение имеет способность не только древесного яруса, но и всего лесного фитоценоза приспособиться к новым условиям (Крылов, 1961; Назимова и др., 2004; Tchebakova et al., 2016), так как одним из существенных факторов продуктивности и устойчивости хвойных видов являются симбиотические отношения внутри биоценозов, а микробиоценоз и травяной покров более чувствительны к изменениям условий увлажнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Марков М.В.* Статистические данные о лесном фонде и изменение продуктивности лесов России во второй половине XX в. СПб.: Санкт-Петербургский лесной экологический центр, 2003. 272 с.
- Алтухов Ю.П.* Динамика генофондов при антропогенных воздействиях // Вестник ВОГиС. 2004. Т. 8. № 2. С. 40–59.
- База данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД). 2017. <http://meteo.ru>
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Берг Л.С.* Климатические пояса Земли // Известия географического института. 1925. Т. 5. С. 21–47.
- Берг Л.С.* Географические зоны Советского Союза. М.: Огиз — Географгиз, 1947. 397 с.
- Бузыкин А.И.* О географических и эдафо-ценологических факторах продуктивности лесов // Вопросы лесоведения. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 80–91.
- Видякин А.И.* Применение результатов феногеографических исследований в практике лесного хозяйства России // Сибирский лесной журн. 2014. № 4. С. 29–34.
- Воейков А.И.* Климаты Земного шара, в особенности России. СПб.: Изд-во Картографического заведения А. Ильина, 1884. 640 с.
- Демаков Ю.П., Смыков А.Е.* Динамика сосновых лесов республики Марий Эл за последние полвека // Хвойные бореальной зоны. 2009. Т. XXVI. № 2. С. 203–210.
- Замолотчиков Д. Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
- Заугольнова Л.Б.* Понятие оптимумов у растений // Журн. общей биологии. 1985. Т. 16. № 4. С. 444–452.
- Зацепина К.Г., Тараканов В.В., Кальченко Л.И., Эжарт А.К., Ларионова А.Я.* Дифференциация популяций сосны обыкновенной в ленточных борах Алтайского края, выявленная с применением маркеров различной природы // Сибирский лесной журн. 2016. № 5. С. 21–32.
- Игошин В.Н., Кузьмичев В.В.* Анализ динамики средних высот порослевых березняков лесостепи за период с 1897 по 2006 гг. // Лесная таксация и лесоустройство. 2008. Вып. 2. № 40. С. 37–41.
- Изменение климата и биоразнообразие российской части Алтае-Саянского экорегиона / Под ред. Михайлова Н.Н. Красноярск: Типография “Город”, 2013. 328 с.
- Леса СССР. Масштаб 1 : 2500000. М.: Федеральная служба лесного хозяйства, 1990. 16 л.
- Кашкаров Е.П., Поморцев О.А.* Глобальное потепление климата: ритмическая основа прогноза и ее практическое значение в охране лесов северного полушария // Хвойные бореальной зоны. 2007. № 2–3. С. 207–216.
- Крылов Г.В.* Леса Западной Сибири. История изучения, типы лесов, районирование, пути использования и улучшения. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 255 с.
- Кузьмичев В.В.* Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 192 с.
- Кулагин Ю.З.* Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М.: Наука, 1980. 113 с.
- Максимов Е.В.* Ритмы на Земле и в Космосе. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. университета, 1995. 324 с.
- Мамаев С.А., Семериков Л.Ф., Махнёв А.К.* О популяционном подходе в лесоводстве // Лесоведение. 1988. № 1. С. 3–9.
- Манько Ю.И., Гладкова Г.А.* О факторах усыхания пихтово-еловых лесов на Дальнем Востоке // Лесоведение. 1995. № 2. С. 3–12.
- Молчанов А.А.* Влияние леса на окружающую среду. М.: Наука, 1978. 358 с.
- Назимова Д.И., Поликарпов Н.П.* Возможен ли прогноз лесного покрова Сибири на XXI век? // Природа. 2001. № 4. С. 55–61.
- Назимова Д.И., Ермаков Н.Б., Андреева Н.М., Степанов Н.В.* Концептуальная модель структурного биоразнообразия зональных классов лесных экосистем Северной Евразии // Сибирский экологический журн. 2004. № 5. С. 745–755.

- Назимова Д.И., Пономарев Е.И., Степанов Н.В., Федотова Е.В. Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования // Лесоведение. 2005. № 1. С. 12–18.
- Неволин О.А., Третьяков С.В., Торхов С.В. К истории об усыхании хвойных лесов // Лесной вестник. 2007. № 5. С. 65–74.
- Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 2. 376 с.
- Плюта П.Г. Оптимумы растений и характер их распределения в пределах диапазона толерантности к условиям среды // Экология. 1994. № 4. С. 18–25.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 224 с.
- Протопопов В.В. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука, 1975. 327 с.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. М.: Наука, 1981. 276 с.
- Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.01. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2000. 48 с.
- Рахманов В.В. Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная пром-ть, 1984. 240 с.
- Сафронова Г.П. Место сосны обыкновенной в экосистеме сибирской тайги // Лесоведение. 1993. № 5. С. 48–54.
- Семенов В.А., Шелехова Е.А., Мохов И.И., Зуев В.В., Колтерманн К.П. Влияние Атлантического долгопериодного колебания на формирование аномальных климатических режимов в регионах северной Евразии по модельным расчетам // Доклады академии наук. 2014. Т. 459. № 6. С. 742–745.
- Семерилов Л.Ф. Популяционная структура древесных растений (на примере видов дуба европейской части СССР и Кавказа). М.: Наука, 1986. 140 с.
- Сочава В.Б. Географические аспекты сибирской тайги. Новосибирск: Наука, 1980. 256 с.
- Тихонова И.В., Мухортова Л.В., Данилова И.В., Михайлова И.А. Оценка лесорастительного потенциала почв республики Тыва для основных лесообразующих видов хвойных // Лесоведение. 2018. № 3. С. 194–209.
- Тихонова И.В., Тараканов В.В., Тихонова Н.А., Барченков А.П., Экарт А.К. Популяционная изменчивость шишек и семян сосны обыкновенной по фенам окраски и признакам-индексам на юге Сибири // Сибирский экологический журн. 2014. Т. 21. № 1. С. 79–86.
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. 384 с.
- Харук В.И., Им С.Т., Петров И.А., Ягунов М.Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сибирский экологический журн. 2016. Т. 23. № 5. С. 750–760.
- Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К.Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 46–55.
- Хромов С.П., Мамонтов Л.И. Метеорологический словарь. М.: Гидрометеиздат, 1974. 569 с.
- Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семенов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // Лесоведение. 2010. № 2. С. 36–45.
- Шиманюк А.П. Дендрология. М.: Лесная пром-ть, 1967. 334 с.
- Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В., Циммерманн Н.Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С. 243–248.
- Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957. 337 с.
- Шумилова Л.С. Ботаническая география Сибири. Томск: Изд-во Томского гос. университета, 1962. 428 с.
- Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 343 с.
- Allen C., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger Th., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., J. Castro, Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management. 2010. V. 259. P. 660–684.
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson Gull B. Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland // Silva Fennica. 2016. V. 50. № 3. P. 1–21.
- Davin E., De Noblet-Ducoudre N. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes // J. Climate. 2010. V. 23. P. 97–112.
- Harris I., Jones P.D., Osborna T.J., Listera D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // International J. Climatology. 2014. V. 34. P. 623–642.
- Martinez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M. Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions // Global Change Biology. 2008. V. 14. P. 2868–2881.
- Mitchell T.D., Jones P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // International J. Climatology. 2005. № 25. P. 693–712.
- Rehfeldt G.E., Wykoff W.R., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris* // Global Change Biology. 2002. V. 8. № 9. P. 912–929.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate // Environmental Research Letters. 2016. V. 11 (035016). P. 1–15.

## A Variability of Meteorological Conditions for the Growth of Coniferous Species in Central Siberia Since 1960

I. V. Tikhonova<sup>1,\*</sup> and M. A. Korets<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>West-Siberian Division, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Zhukovskogo st., 100/1, Novosibirsk, 630082 Russia

<sup>2</sup>Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FI SB RAS), Akademgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>3</sup>Siberian Federal University (SFU), Svobodny ave., 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia

\*E-mail: selection@ksc.krasn.ru

The results of the analysis of the spatial and temporal (annual) variability of the main forest-forming coniferous species (Siberian spruce *Picea obovata* Ledeb., Siberian larch *Larix sibirica* Ledeb., Dahurian larch *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., Siberian pine *Pinus sibirica* Du Tour, Scots pine *P. sylvestris* L., Siberian fir *Abies sibirica* Ledeb.) growing conditions are presented for the Central Siberia and the mountains of Southern Siberia, including the Krasnoyarsk Territory, Irkutsk Region, the Republics of Khakassia, Tuva, Buryatia, Yakutia. The variability limit of some climatic values in habitats of coniferous species populations has been determined using the amplitudes of yearly mean temperatures, amounts of precipitation and hydrothermal coefficients for the period from 1960 to 2016. Differences have been found between the species in correlations between the relative area occupied by them and the values of the temporal variability of meteorological indicators. The levels of meteorological conditions variability for the coniferous forests growth in the taiga zone are compared with the growth conditions of populations, situated in the coniferous forests areas' southern and northern boundaries, as well as the individual species' correlations with them. Climatic indices temporal and spatial variability features have been determined in coniferous species growing areas in different natural and climatic zones of Siberia. Significant differences in the levels of interannual variability of heat and moisture conditions in habitats of coniferous species, groups of populations and individual populations were revealed, that proves the necessity to take them into consideration when predicting the species reactions on climate changes. It was noted that the temperature changes dynamics in recent decades is specific for various climatic zones and populations habitats. For a long-term prediction, the use of the climate changes frequency characteristics was suggested, in the centennial and millennial chronologies.

*Keywords:* forest-forming species populations, climate changes, Middle Siberia.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of a budget programme of West-Siberian Division, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as with a financial support of RFBR, Krasnoyarsk Krai administration and Krasnoyarsk Scientific Foundation (18-44-240002-p\_a).

### REFERENCES

- Alekseev V.A., Markov M.V., *Statisticheskie dannye o lesnom fonde i izmenenie produktivnosti lesov Rossii vo vtoroi polovine XX veka* (Forest resources statistical data and changes in forest productivity in Russia in the second half of the 20th century), St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii lesnoi ekologicheskii tsentr, 2003, 272 p.
- Allen C., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, pp. 660–684.
- Altukhov Y.P., Dinamika genofondov pri antropogennykh vozdeistviyakh (Dynamics of gene pools under anthropogenic impact), *Vestnik VOGiS*, 2004, Vol. 8, No. 2, pp. 40–59.
- Bartalev S.A., Egorov, V.A., Ershov, D.V., Isaev, A.S., Lupjan, E.A., Plotnikov, D.E., Uvarov, I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS, *Sovremennye problemy distan-*
- cionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
- Berg L.S., *Geograficheskie zony Sovetskogo Soyuz* (Geographical zone of the Soviet Union), M.: Ogiz – Geografiz, 1947, 397 p.
- Berg L.S., Klimaticheskie poyasa Zemli (Climatic zones of the Earth), *Izvestiya geograficheskogo instituta*, 1925, Vol. 5, pp. 21–47.
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Bärning L., Andersson G.B., Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland, *Silva Fennica*, 2016, Vol. 50, No. 3, pp. 1–21.
- Buzykin A.I., O geograficheskikh i edafo-tsenoticheskikh faktorakh produktivnosti lesov (About geographical and edaphic-coenotic factors of forest productivity), In: *Voprosy lesovedeniya* (Issues of forest science), Krasnoyarsk: Izd-vo ILiD SO AN SSSR, 1970, Vol. 1, pp. 80–91.
- Davin E., De Noublet-Ducoudre N., Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes, *J. Climate*, 2010, Vol. 23, pp. 97–112.
- Demakov Y.P., Smykov A.E., Dinamika osnovnykh lesov respublikii Marii El za poslednie polveka (Dynamics of pine forests of the Mari Republic over the past half century),

- Khvoinye boreal'noi zony*, 2009, Vol. XXVI, No. 2, pp. 203–210.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H., Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *International J. Climatology*, 2014, Vol. 34, pp. 623–642.  
http://meteo.ru
- Igoshin V.N., Kuz'michev V.V., Analiz dinamiki srednikh vysot poroslevykh bereznyakov lesostepi za period s 1897 po 2006 gg. (Comparative estimation of the dependence of height on the diameter in the pine and birch standing timber of the wooded plain), *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*, 2008, Vol. 2, No. 40, pp. 37–41.
- Izmenenie klimata i bioraznoobrazie rossiiskoi chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona* (Climate change and biodiversity of the Russian part of the Altai-Sayan ecoregion), Krasnoyarsk: Tipografiya "Gorod", 2013, 328 p.
- Kashkarov E.P., Pomortsev O.A., Global'noe poteplenie klimata: ritmicheskaya osnova prognoza i ee prakticheskoe znachenie v okhrane lesov Severnogo polushariya (Global climate warming: practical application of cyclic basis of the forecast to protection of forests in the Northern hemisphere), *Khvoinye boreal'noi zony*, 2007, No. 2–3, pp. 207–216.
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N., Decline of dark coniferous stands in Baikal region, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 617–625.
- Kharuk V.I., Im S.T., Renson K.D., San G., Kosmosnimki vysokogo razresheniya v analize vremennoi dinamiki ekotona lesotundry (High resolution satellite images in the forest tundra ecotone dynamics analysis), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 6, pp. 46–55.
- Khromov S.P., Mamontov L.I., *Meteorologicheskii slovar'* (Meteorological Dictionary), Moscow: Gidrometeoizdat, 1974, 569 p.
- Krylov G.V., *Lesa Zapadnoi Sibiri. Istoriya izucheniya, tipy lesov, raionirovanie, puti ispol'zovaniya i uluchsheniya* (Forests of Western Siberia. History of study, types of forests, zoning, ways of use and improvement), M.: Izd-vo AN SSSR, 1961, 255 p.
- Kulagin Y.Z., *Lesoobrazuyushchie vidy, tekhnogenez i prognozirovanie* (Forest-forming species, technogenesis and prognosis), M.: Nauka, 1980, 113 p.
- Kuz'michev V.V., *Zakonomernosti dinamiki drevostoev: printsipy i modeli* (Patterns in dynamics of forest stands: principles and models), Novosibirsk: Nauka, 2013, 207 p.
- Lesy SSSR. Masshtab 1 : 2500000*, (Forests of the USSR. Scale 1 : 2500000), M.: GUGK, 1990.
- Maksimov E.V., *Ritmy na Zemle i v Kosmose* (Rhythms on Earth and in Space), St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo gos. universiteta, 1995, 324 p.
- Mamaev S.A., Semerikov L.F., Makhnev A.K., O populyatsionnom podkhode v lesovodstve (Population approach in silviculture), *Lesovedenie*, 1988, No. 1, pp. 3–9.
- Man'ko Y.I., Gladkova G.A., O faktorakh usykhaniya pikhtovo-elovykh lesov na Dal'nem Vostoke (On the factors of drying out of fir-spruce forests in the Far East), *Lesovedenie*, 1995, No. 2, pp. 3–12.
- Martinez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M., Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions, *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 2868–2881.
- Mitchell T.D., Jones P.D., An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International J. Climatology*, 2005, Vol. 25, No. 6, pp. 693–712.
- Molchanov A.A., *Vozdeistvie antropogennykh faktorov na les* (Human factors affecting forests), Moscow: Nauka, 1978, 136 p.
- Nazimova D.I., Ermakov N.B., Andreeva N.M., Stepanov N.V., Kontseptual'naya model' strukturnogo bioraznoobraziya zonal'nykh klassov lesnykh ekosistem Severnoi Evrazii (Framework of structural biodiversity of zonal classes of forest ecosystems of Northern Eurasia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2004, No. 5, pp. 745–755.
- Nazimova D.I., Polikarpov N.P., Vozmozhno li prognoz lesnogo pokrova Sibiri na XXI vek? (Is it possible to forecast the forest cover of Siberia for the XXI century?), *Priroda*, 2001, No. 4, pp. 55–61.
- Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Stepanov N.V., Fedotova E.V., Chernevye temnokhvoinye lesa na yuge Krasnoyarskogo kraia i problemy ikh obzornogo kartografirovaniya (Chern dark coniferous forests in Southern Krasnoyarsk Region and problems of their general mapping), *Lesovedenie*, 2005, No. 1, pp. 12–18.
- Nevolin O.A., Tret'yakov S.V., Torkhov S.V., K istorii ob usykhanii khvoinykh lesov (To the story of the drying up of coniferous forests), *Lesnoi vestnik*, 2007, No. 5, pp. 65–74.
- Odum E.P., *Ecology*, M.: Mir, 1986, Vol. 2, 376 p.
- Plyuta P.G., Optimumy rastenii i kharakter ikh raspredeleniya v predelakh diapazona tolerantnosti k usloviyam sredy (Plant optima and the nature of their distribution within the range of tolerance to environmental conditions), *Ekologiya*, 1994, No. 4, pp. 18–25.
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and montane forests of South Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1986, 224 p.
- Protopopov V.V., *Sredoobrazuyushchaya rol' temnokhvoynogo lesa* (Habitat forming by dark coniferous forest), Novosibirsk: Nauka, 1975, 328 p.
- Putenikhin V.P., *Populyatsionnaya struktura i sokhraneniye genofonda khvoinykh vidov na Urale. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk* (Population structure and conservation of genebank of coniferous species in Urals. Extended abstract of Doctor biol. sci. thesis), Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2000, 48 p.
- Puzachenko Y.G., Skulkin V.S., *Struktura rastitel'nosti lesnoi zony SSSR* (Structure of vegetation in the forest zone of USSR), M.: Nauka, 1981, 276 p.
- Rakhmanov V.V., *Gidroklimaticheskaya rol' lesov* (Hydroclimatic role of forests), Moscow: Lesnaya prom-t', 1984, 240 p.
- Rehfeldt G.E., Tchepakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I., Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*, *Global Change Biology*, 2002, Vol. 8, pp. 912–929.
- Safronova G.P., Mesto sosny obyknovЕННОI v ekosisteme sibirskoi taigi (The place of Scots pine in the ecosystem of the Siberian taiga), *Lesovedenie*, 1993, No. 5, pp. 48–54.
- Semenov V.A., Shelekhova E.A., Mokhov I.I., Koltermann K.P., Zuev V.V., Influence of the atlantic multidecadal oscillation on settling anomalous climate regimes in Northern Eurasia based on model simulation, *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 459, No. 2, pp. 1619–1622.
- Semerikov L.F., *Populyatsionnaya struktura drevesnykh rastenii (na primere vidov duba Evropeiskoi chasti SSSR i Ka-*

- vkaza) (Population structure of wooden plants (case study of oak species in European part of USSR and Caucasus)), M.: Nauka, 1986, 140 p.
- Shcherbakov I.P., *Lesnoi pokrov severo-vostoka SSSR* (Forest cover of North-East of USSR), Novosibirsk: Nauka, 1975, 343 p.
- Shimanyuk A.P., *Dendrologiya* (Dendrology), M.: Lesnaya prom-t', 1967, 334 p.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E., Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century, *Russian J. Ecology*, 2007, Vol. 38, No. 4, pp. 223–227.
- Shnitnikov A.V., *Izmenchivost' obshchei uvlazhnenosti materikov severnogo polushariya* (Variability of the general moisture content of the continents of the northern hemisphere), M., Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1957, 337 p.
- Shumilova L.S., *Botanicheskaya geografiya Sibiri* (Botanical geography of Siberia), Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1962, 428 p.
- Sochava V.B., *Geograficheskie aspekty sibirskoi taigi* (Geographic aspects of the Siberian taiga), Novosibirsk: Nauka, 1980, 256 p.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G., Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11 (035016), pp. 1–15.
- Tikhonova I.V., Mukhortova L.V., Danilova I.V., Mikhailova I.A., Otsenka lesorastitel'nogo potentsiala pochv respubliky Tyva dlya osnovnykh lesoobrazuyushchikh vidov khvoinykh (Assessment of soil suitability for growth of coniferous forests species in Tuva Republic), *Lesovedenie*, 2018, No. 3, pp. 194–209.
- Tikhonova I.V., Tarakanov V.V., Tikhonova N.A., Barchenkov A.P., Ekart A.K., Population variability of cones and seeds of Scots pine by phenes of color and traits-indices in the south of Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 1, pp. 60–66.
- Tsel'niker Y.L., Korzukhin M.D., Semenov S.M., Model'nyi analiz shirotnogo raspredeleniya produktivnosti lesnykh porod Rossii (Model analysis of latitudinal distribution of forest species in Russia), *Lesovedenie*, 2010, No. 2, pp. 36–45.
- Usol'tsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii (k menedzhmentu biosfernykh funktsii lesov)* (Biological productivity of forest-forming species in Eurasia's climatic gradients (as related to supporting decision-making processes in forest management)), Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2016, 384 p.
- Vidyakin A.I., Primenenie rezul'tatov fenogeograficheskikh issledovaniy v praktike lesnogo khozyaistva Rossii (Application of pheno-geographical research results in forestry of Russia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 4, pp. 29–34.
- Voeikov A.I., *Klimaty Zemnogo shara, v osobennosti Rossii* (Climates of the Globe, especially Russia), St. Petersburg: Izd-vo Kartograficheskogo zavedeniya A. Il'ina, 1884, 640 p.
- Zamolodchikov D.G., An estimate of climate related changes in tree species diversity based on the results of forest fund inventory, *Biology bulletin reviews*, 2011, Vol. 2, No. 2, pp. 154–163.
- Zatsepina K.G., Tarakanov V.V., Kalchenko L.I., Ekart A.K., Larionova A.Y., Differentsiatsiya populyatsii sosny obyknovnoy v lentochnykh borakh Altaiskogo kraya, vyyavlenaya s primeneniem markerov razlichnoi prirody (Differentiation of Scots pine populations in the belt pine forests of Altai Krai discovered with markers of various nature), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 5, pp. 21–32.
- Zaugol'nova L.B., Ponyatie optimumov u rastenii (The concept of optimums in plants), *Zhurnal obshchei biologii*, 1985, Vol. 46, No. 4, pp. 444–452.

УДК 579.64

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ БАЗИДИОМ ЕЖОВИКА ГРЕБЕНЧАТОГО И ИХ АНТИОКСИДАНТНЫЕ СВОЙСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРЕДОБРАБОТКИ ОПИЛОК СОСНЫ И БУКА<sup>1</sup>

© 2021 г. А. В. Гольшкин<sup>а</sup>, \*, Н. Р. Альмяшева<sup>а</sup>, Л. М. Краснопольская<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков им. Г.Ф. Гаузе,  
ул. Большая Пироговская, 11, стр. 1, Москва, 119021 Россия

\*E-mail: a.v.golyshkin@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2018 г.

После доработки 09.04.2019 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Исследовано влияние предобработки лигноцеллюлозных субстратов на плодоношение ксилотрофного базидиомицета *Hericium erinaceus* (Bull.) Persoon и антиоксидантные свойства экстрактов плодовых тел. Предобработка опилок бука и сосны минеральными кислотами способствовала увеличению биодоступности субстрата для *H. erinaceus* и приводила к значительному сокращению времени выхода на плодоношение с 63 до 35 сут по сравнению с неподобработанными опилками. Все варианты субстратов с сосновыми опилками обеспечивали получение плодовых тел с повышенным содержанием фенольных соединений по сравнению с субстратами, содержащими опилки бука. Предобработка серной кислотой приводила к увеличению антирадикальной активности и хелатирующей способности экстрактов плодовых тел.

*Ключевые слова:* опилки хвойных и лиственных пород деревьев, *Hericium erinaceus*, антиоксидантные свойства, субстрат для культивирования.

DOI: 10.31857/S0024114821010034

Лекарственно-съедобный ксилотрофный базидиальный гриб *Hericium erinaceus* (Bull.) Persoon представляет собой ценный продукт питания, содержащий полноценные белки, эссенциальные жирные кислоты, витамины группы В, провитамин D (Автономова и др., 2012). *H. erinaceus* известен своей способностью к образованию широкого спектра биологически активных соединений, прежде всего полисахаридов (Автономова и др., 2012, Альмяшева и др., 2017, Автономова, Краснопольская, 2013, Краснопольская и др., 2015, Краснопольская и др., 2016). Среди метаболитов *H. erinaceus* известны соединения с иммуномодулирующими, противоопухолевыми, антиоксидантными, нейроактивными и другими свойствами (Автономова и др., 2012, Альмяшева и др., 2017, Friedman, 2015). Биологически активные соединения *H. erinaceus* содержатся в плодовых телах и вегетативном мицелии.

Плодовые тела гриба *H. erinaceus*, вызывающего белую гниль древесины, т.е. способного утилизировать лигнин, получают с использованием твердофазного культивирования на лигноцеллю-

лозных субстратах, основой которых служат отходы лесопереработки и сельского хозяйства – опилки твердых лиственных пород деревьев, солома, лузга подсолнечника и кукурузные кочерыжки, содержащие целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин (Stamets., 2011).

В России ежегодно образуется не менее 4.2 млн м<sup>3</sup> учтенных древесных опилок. Более 70% из них остаются невостребованными, что повышает пожароопасность и ухудшает экологическую обстановку в местах расположения предприятий (Челышева и др., 2017). Разработка новых эффективных субстратов для культивирования съедобных ксилотрофных грибов актуальна как для получения высококачественной пищевой продукции и биологически активных соединений, так и для рационального использования природных ресурсов (Kretschmer et al., 2013). Ценное сырье, которое может быть включено в существующие производственные циклы, представляют собой опилки и кора хвойных пород деревьев, хвоя. Однако эти отходы помимо целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, содержат большое количество полифенольных и дубильных соединений, подавляющих рост грибов и ухудшающих качество получаемой продукции. Введение их в субстрат без предвари-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16–38–00902 мол\_а.

тельной обработки приводит к снижению скорости развития мицелия, увеличению срока культивирования, а также к ухудшению пищевых качеств получаемых плодовых тел.

Удаление нежелательных компонентов может быть осуществлено в процессе предобработки физическими, химическими или биологическим методами воздействия (Ewanick et al., 2007). В результате, происходит увеличение биологической доступности целлюлозы и лигнина за счет разрыва межмолекулярных связей, уменьшения степени кристалличности, увеличение размера пор и площади доступной поверхности сырья (Zheng et al., 2009).

Цель настоящей работы состояла в сравнительном изучении разных способов химической предобработки древесных отходов при получении субстратов для культивирования *H. erinaceus*, обеспечивающих высокие показатели урожайности без снижения качества грибной продукции. В качестве древесных отходов использовали опилки сосны и бука. В работе оценивали скорость освоения культурой *H. erinaceus* опилочных субстратов, урожайность гриба, содержание белков, полисахаридов, фенольных соединений в полученных плодовых телах, антиоксидантные свойства экстрактов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Экспериментальные исследования были структурированы следующим образом.

1. Химическая предобработка опилок сосны и бука растворами кислот, щелочей и пероксида водорода.

2. Оценка содержания легко- и трудногидролизуемых полисахаридов в химически модифицированных опилках сосны и бука.

3. Подготовка субстратов для культивирования *H. erinaceus*: добавление к опилкам источника азота, карбоната кальция и воды, стерилизация полученного субстрата.

4. Засев культурой *H. erinaceus* чашек Петри с субстратом и субстратных блоков.

5. Изучение скорости освоения субстрата и плотности выросшего мицелия гриба на чашках Петри.

6. Определение урожайности гриба и числа волн плодоношения при выращивании на субстратных блоках.

7. Биохимические исследования плодовых тел *H. erinaceus*: оценка содержания белков, полисахаридов, фенольных соединений.

8. Изучение антиоксидантных свойств экстрактов плодовых тел *H. erinaceus*.

В качестве реактивов использовали. Серная кислота (ООО “Химмед”, Россия), соляная кис-

лота (ООО “Химмед”, Россия), гидроксид натрия,  $\text{CaCO}_3$  (х. ч., ООО “Русхим”, Россия), пероксид водорода 37% (Марка А, ООО “Русхим”, Россия), 3,5-динитросалициловая кислота 98% (Acros, Бельгия), калий-натрий винокислый 4-водный (ООО “Русхим”, Россия), фенол (ЗАО “Вектон”, Россия), глюкоза (ООО “НТК ДИАЭМ”, Россия), агар-агар (ООО “НТК ДИАЭМ”, Россия), реактив Фолина—Чиокальто (AppliChem, Германия), натриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА- $\text{Na}_2$ ) (ООО “Русхим”, Россия), хлорид железа (II) (ООО “Русхим”, Россия), 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразил (ДФПГ) (Sigma-Aldrich, США), феррозин (Sigma-Aldrich, США).

**Предобработка лигноцеллюлозного сырья.** Опилки сосны *Pinus sylvestris* L. получены из Щелковского учебно-опытного лесхоза Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, опилки бука *Fagus orientalis* Lipsky – из Тебердинского государственного природного биосферного заповедника, Архызский участок. Опилки сосны и бука измельчали и высушивали при температуре 60°C в течение 48 ч. В работе использовали фракции опилок с размером частиц 0.24–0.315 мм. Для предобработки использовали 2 мас. % растворы соляной и серной кислот, гидроксида натрия и пероксида водорода. Предобработку субстратов проводили при 120°C в автоклаве. Образцы лигноцеллюлозного сырья взвешивали на аналитических весах с точностью до 0.01 г до и после обработки.

**Определение доли легкогидролизуемых полисахаридов в лигноцеллюложном сырье.** Образцы лигноцеллюлозного сырья взвешивали на аналитических весах с точностью 0.01 г, помещали в реакционные сосуды с раствором серной кислоты 1.5% (масс.) и выдерживали в автоклаве при температуре 120°C в течение 120 мин. Реакционную смесь воздушно охлаждали до комнатной температуры. Долю легкогидролизуемых полисахаридов в опилках сосны и бука оценивали спектрофотометрическим методом с использованием 3,5-динитросалициловой кислоты по количеству образуемых в результате кислотного гидролиза редуцирующих сахаров (РС) (Miller, 1959).

**Штаммы и условия культивирования.** В работе использовали штамм базидиомицета *H. erinaceus* из коллекции лаборатории биологически активных соединений ФГБНУ “Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков им. Г.Ф. Гаузе”. Рабочую культуру хранили на картофельно-глюкозном агаре при 4°C.

**Определение скорости роста и плотности мицелия *H. erinaceus* при твердофазном культивировании в чашках Петри.** В чашки Петри помещали твердый субстрат, содержащий 4.5 г опилок, 0.5 г пшеничных отрубей, 0.05 г  $\text{CaCO}_3$ , и стерилизовали при 120°C в течение 1 ч. Чашки Петри засеивали мицелиально-агаровыми блоками 10-дневной

культурой гриба (диаметр 3 мм) и инкубировали при 25°C в течение 9 сут, после чего проводили измерение диаметров колоний. Плотность мицелия оценивали общепринятым визуальным методом в баллах: 1 – редкая, 2 – средняя, 3 – плотная (Бисько и др., 1983).

*Получение плодовых тел *H. erinaceus*.* В конические плоскодонные колбы объемом 200 мл помещали твердый увлажнённый субстрат, содержащий 18 г опилок, 2 г пшеничных отрубей, 0,2 г CaCO<sub>3</sub>, и стерилизовали при 120°C в течение 1 ч. Колбы засевали мицелиально-агаровыми блоками 10-дневной культуры гриба *H. erinaceus* (диаметр 3 мм) и инкубировали при 25°C в течение 3 нед. до полного зарастания мицелием субстрата, после чего удаляли ватно-марлевые пробки и колбы инкубировали при 20°C и относительной влажности воздуха 80% в течение 2 мес. В инкубационной камере поддерживали воздухообмен 0,1 об. мин<sup>-1</sup> и 8-часовой световой день. Полученные плодовые тела лиофильно высушивали, взвешивали на аналитических весах с точностью 0,01 г и измельчали. Урожайность выражали в процентах массовых как отношение сухой массы полученных плодовых тел к сухой массе субстрата.

*Определение содержания белков и полисахаридов в плодовых телах *H. erinaceus*.* Общее содержание полисахаридов определяли фенол-сернокислотным методом с использованием глюкозы в качестве стандарта.

Белки экстрагировали фосфатным буферным раствором (рН 7,4, 0,1-молярный) в течение 3 ч при постоянном перемешивании. Общее содержание белков определяли методом Брэдфорд с использованием бычьего сывороточного альбумина в качестве стандарта.

*Получение экстрактов плодовых тел *H. erinaceus*.* Навеску порошка биомассы (1 г на 100 мл) дважды экстрагировали 80%-м этанолом на водяной бане, нагретой до 80°C, в течение 30 мин. Экстракты объединяли и центрифугировали в течение 10 мин при 5000 об. мин<sup>-1</sup>, супернатанты упаривали на роторном испарителе до постоянной массы. Сухой остаток растворяли в 80%-м этаноле в концентрации 5 мг мл<sup>-1</sup>. Содержание фенольных соединений в этанольных экстрактах определяли с использованием реагента Фолина–Чиокальто и галловой кислоты в качестве стандарта.

*Определение хелатирующей способности по отношению к Fe<sup>2+</sup>.* Подготавливали растворы этанольных экстрактов с концентрациями от 0,01 до 2,0 мг мл<sup>-1</sup>. В пробирке смешивали 1 мл образца, 3,7 мл метанола, 100 мкл водного раствора FeCl<sub>2</sub> (2-миллимолярный) и 200 мкл водного раствора феррозина (5-миллимолярный). Реакционную смесь выдерживали при 25°C в течение 10 мин,

после чего определяли оптическую плотность при 562 нм (Dinis et al., 1994). Хелатирующую способность оценивали по величине ЕС<sub>50</sub><sup>\*</sup>, соответствующей концентрации исследуемого образца, необходимой для снижения содержания ионов двухвалентного железа на 50% от исходного значения.

*Определение антирадикальной активности.* Подготавливали растворы этанольных экстрактов с концентрациями от 0,5 до 5,0 мг мл<sup>-1</sup>. Антирадикальную активность определяли спектрофотометрическим методом по отношению к ДФПГ. В кювете смешивали 100 мкл образца и 900 мкл раствора ДФПГ ( $6 \times 10^{-5}$  – молярный). Реакционную смесь выдерживали в темноте при 25°C в течение 60 мин, после чего определяли оптическую плотность при 527 нм. Антирадикальную активность оценивали по величине ЕС<sub>50</sub>, соответствующей концентрации исследуемого образца, необходимой для снижения содержания ДФПГ на 50% от исходного значения.

#### *Статистическая обработка результатов экспериментов*

Все эксперименты проводили в 3 биологических и 3 аналитических повторностях. Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ MS Excel 2013. На рисунках и в таблицах представлены средние (М) и стандартные ошибки средних ( $\pm$ SEM). Достоверность различий между средними значениями исследуемых показателей оценивали по *t*-критерию Стьюдента, статистически значимыми считали различия  $P \leq 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Доля легкогидролизуемых компонентов в необработанных опилках сосны составила 30%, бука – 37% (рис. 1), что соответствует количеству гемицеллюлозы в исходном сырье (Amidon et al., 2008). Предобработка раствором гидроксида натрия способствовала повышению доли легкогидролизуемых компонентов в сырье, выход РС увеличился на 7% для опилок сосны и на 4% – для опилок бука. Скорее всего, это явилось следствием удаления лигнина и части гемицеллюлозы, что согласуется с данными литературы (Jönsson, Martín, 2016). Перекисная предобработка опилок сосны приводила к снижению выхода РС на 5%, тогда как в случае опилок бука изменение компонентного состава отмечено не было. Возможно, на результат предобработки лигноцеллюлозного сырья пероксидом водорода влияло различие в химической структуре гемицеллюлоз и лигнина хвойных и лиственных пород деревьев (McMillan, James, 1994). Кислотная предобработка приводи-

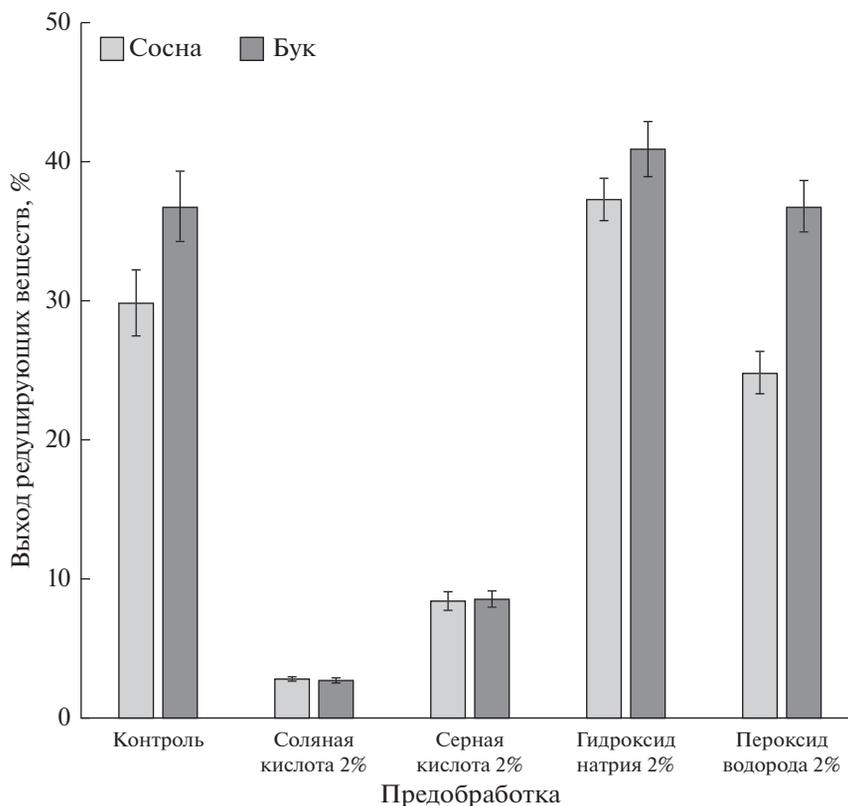


Рис. 1. Выход редуцирующих веществ к массе сырья.

ла к резкому увеличению доли трудногидролизуемых компонентов в сырье, содержание легкогидролизуемых сахаров в составе опилок сосны и бука снизилось более чем на 20%. В результате кислотной предобработки убыль массы субстрата превосходила долю удаленных легкогидролизуемых сахаров. Это свидетельствовало о гидролизе

не только гемицеллюлозы и аморфных участков целлюлозы, но также о частичном удалении лигнина. Аналогичный результат воздействия минеральных кислот был получен при изучении предобработки древесины тополя (Sun et al., 2014).

Таблица 1. Диаметр 8-суточных колоний ( $d$ ) и визуальная оценка плотности мицелия ( $q$ ) *H. erinaceus* при выращивании в чашках Петри

Субстрат	Предобработка	$d$ , мм	$q$ , балл
Сосна	Контроль	$19 \pm 2$	2
	HCl 2%-й раствор	$23 \pm 4$	2
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	$29 \pm 2$	2
	NaOH 2%-й раствор	—	—
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2%-й раствор	$24 \pm 2$	1
Бук	Контроль	$19 \pm 2$	2
	HCl 2%-й раствор	$32 \pm 3$	2
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	$32 \pm 3$	2
	NaOH 2%-й раствор	$24 \pm 1$	1
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2%-й раствор	$26 \pm 2$	1

Примечание.  $d$  — диаметр колонии,  $q$  — плотность мицелия, “—” — отсутствие роста.

На следующем этапе исследования оценивали влияние предобработки на биодоступность лигноцеллюлозных субстратов для ксилотрофного базидиомицета *H. erinaceus*. В опыте определяли скорость освоения субстрата и интенсивность развития мицелия (табл. 1).

Скорость освоения субстратов культурой *H. erinaceus* была выше после их кислотных предобработок. При этом обогащение субстратов лигнином и увеличение их биодоступности привело к повышению скорости роста базидиомицета как на предобработанных опилках сосны, так и бука по сравнению с соответствующим контролем. Перекисная и щелочная предобработка не способствовала повышению биодоступности субстратов, о чем свидетельствуют низкая скорость роста гриба и снижение плотности мицелия. Рост *H. erinaceus* на субстрате, содержащем сосновые опилки, после щелочной предобработки отсутствовал.

На заключительном этапе исследования были получены плодовые тела *H. erinaceus* на субстратах, содержащих предобработанные кислотами

**Таблица 2.** Время выхода на плодоношение и урожайность *H. erinaceus* в зависимости от предобработки опилок сосны и бука

Субстрат	Предобработка	Время выхода на плодоношение, сут.	Число волн плодоношения	Урожайность, масс. %
Сосна	Контроль	63	1	3.9
	HCl 2%-й раствор	35	2	7.9
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	35	2	3.8
Бук	Контроль	63	1	5.1
	HCl 2%-й раствор	35	2	6.5
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	35	1	3.6

**Таблица 3.** Содержание полисахаридов, белков и фенольных соединений в плодовых телах *H. erinaceus*

Субстрат	Предобработка	Полисахариды, %	Белки, %	Фенольные соединения, мг экв. галловой кислоты г <sup>-1</sup> плодового тела
Сосна	Контроль	4.6 ± 3.9	12.7 ± 0.4	7.0 ± 0.2
	HCl 2%-й раствор	34.5 ± 5.3	13.7 ± 2.2	7.1 ± 0.3
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	19.3 ± 3.4	12.9 ± 3.9	7.9 ± 0.4
Бук	Контроль	35.4 ± 0.9	13.5 ± 0.5	5.2 ± 0.3
	HCl 2%-й раствор	32.2 ± 2.3	7.9 ± 1.2	5.1 ± 0.4
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	29.4 ± 0.1	12.4 ± 0.6	6.3 ± 0.5

опилки бука или сосны, определено содержание в них белков, полисахаридов и фенольных соединений и изучены антиоксидантные свойства экстрактов плодовых тел.

На необработанных опилках сосны и бука за все время эксперимента была получена только одна волна плодовых тел на 63-е сут культивирования (табл. 2). Кислотная предобработка привела к значительному сокращению времени выхода на плодоношение. За два месяца эксперимента на субстратах, содержащих все варианты предобработанных опилок, за исключением опилок бука после сернокислотной предобработки, были получены две волны плодоношения. Повышение урожайности по сравнению с контролем было отмечено на опилках после предобработки соляной кислотой. При этом урожайность второй волны не уступала первой. Возможно, это связано с тем, что хлорид-анионы способны разрушать межмолекулярные водородные связи лигноцеллюлозного комплекса и увеличивать биодоступность лигнина (Foston, Ragauskas, 2012). Несмотря на то, что при сернокислотной предобработке сосновых опилок было получено две волны плодоношения, суммарная урожайность была сопоставима с урожайностью первой волны, полученной на субстрате без предобработки.

В базидиомах, выращенных на субстратах с непредобработанными опилками сосны и бука, было отмечено наибольшее содержание полисахари-

дов – 41.6 и 35.4 мас. % соответственно (табл. 3). На всех исследованных субстратах, за исключением опилок бука после солянокислотной предобработки, были получены базидиомы с достоверно одинаковым содержанием белков. Все варианты субстратов с сосновыми опилками обеспечивали получение базидиом с повышенным содержанием фенольных соединений по сравнению с субстратами, содержащими опилки бука.

Все этанольные экстракты плодовых тел, полученные в условиях эксперимента, проявляли высокую антирадикальную активность и хелатирующую способность (табл. 4). Анализ экспериментальных результатов показал, что использование основных опилок способствует более высокой антирадикальной активности экстрактов плодовых тел. Сравнительное изучение антиоксидантных свойств экстрактов плодовых тел *H. erinaceus* выявило зависимость между величиной антирадикальной активности экстрактов и содержанием в них фенольных соединений. Базидиомы, полученные на необработанных опилках сосны, содержали в 1 г 7.02 мг эквивалентов галловой кислоты и проявили на 19% более высокую антирадикальную активность по сравнению с базидиомами, выращенными на необработанных опилках бука и содержащими в 1 г 5.67 мг эквивалентов галловой кислоты. Такая зависимость была отмечена также при сравнении антирадикальной активности и содержания фенольных соединений в экстрактах погруженного мицелия

**Таблица 4.** Антиоксидантные свойства этанольных экстрактов плодовых тел *H. erinaceus*

Субстрат	Предобработка	Антиоксидантные свойства (EC <sub>50</sub> ), мг мл <sup>-1</sup>	
		антирадикальная активность по отношению к ДФПГ	хелатирующая способность по отношению к Fe <sup>2+</sup>
Сосна	Контроль	0.45 ± 0.03	0.86 ± 0.05
	HCl 2%-й раствор	0.55 ± 0.02	0.81 ± 0.06
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	0.40 ± 0.03	0.65 ± 0.03
Бук	Контроль	0.56 ± 0.04	0.66 ± 0.04
	HCl 2%-й раствор	0.90 ± 0.04	0.87 ± 0.05
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2%-й раствор	0.47 ± 0.02	0.71 ± 0.05

*Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer и *H. erinaceus* (Альмяшева и др., 2017). Наибольшую антирадикальную активность проявил экстракт базидиом, выращенных на опилках сосны после предобработки серной кислотой.

Проведение предобработки лигноцеллюлозного сырья по-разному влияло на хелатирующую способность экстрактов плодовых тел, полученных на опилках сосны и бука. Предобработка минеральными кислотами опилок сосны способствовала уменьшению хелатирующей способности, опилок бука – увеличению. Причиной этого может служить различие химического состава лигнина в составе древесины хвойных и лиственных пород деревьев (Amidon et al., 2008). Аналогично с результатами, полученными при изучении антирадикальной активности экстрактов плодовых тел, наибольшая хелатирующая способность была отмечена у экстракта базидиом, выращенных на сосновых опилках после сернокислотной предобработки, и составила 0.65 мг экстракта мл<sup>-1</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительное изучение разных способов химической предобработки древесных отходов при получении субстратов для культивирования *H. erinaceus* показало перспективность использования минеральных кислот для этой цели. Предобработка соляной кислотой увеличивает долю лигнина и целлюлозы в субстрате на основе опилок сосны и бука, что приводит к увеличению скорости роста древоразрушающего гриба *H. erinaceus*, интенсивности развития его мицелия и урожайности. Снижение содержания легкогидролизуемых углеводов в результате кислотной предобработки древесных отходов создает неблагоприятные условия для развития микроорганизмов-контаминантов, конкурирующих за субстрат. Кислотная предобработка опилок сосны и бука не приводит к снижению содержания белка в плодовых телах *H. erinaceus*, что свидетельствует о

сохранении качества получаемой продукции. Для получения плодовых тел *H. erinaceus*, экстракты которых отличаются высокой антиоксидантной активностью, следует рекомендовать использование субстратов, содержащих опилки сосны. По-видимому, антиоксидантная активность во многом обусловлена накоплением фенолов, содержание которых выше при культивировании *H. erinaceus* на субстратах на основе опилок сосны по сравнению с выращиванием гриба на субстратах, содержащих опилки бука.

Таким образом, предложенный способ кислотной предобработки позволяет более активно использовать опилки сосны и, возможно, других хвойных пород деревьев для разработки составов новых эффективных субстратов для твердофазного культивирования *H. erinaceus* и получения плодовых тел этого вида.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автономова А.В., Баканов А.В., Леонтьева М.И., Винокуров В.А., Усов А.И. Краснополяская Л.М. Погруженное культивирование и химический состав мицелия *Hericium erinaceus* // Антибиотики и химиотерапия. 2012. Т. 57. № 7–8. С. 7–11.
- Автономова А.В., Краснополяская Л.М. Противоопухолевые и иммуномодулирующие свойства трутовика лакированного (*Ganoderma lucidum*) // Микология и фитопатология. 2013. Т. 47. № 1. С. 3–11.
- Альмяшева Н.Р., Ярина М.С., Голышкин А.В., Джавахян Б.Р., Краснополяская Л.М. Антиоксидантные свойства водорастворимых полисахаридов и этанольных экстрактов мицелия ксилотрофных базидиальных грибов // Антибиотики и химиотерапия. 2017. Т. 62. № 7–8. С. 8–12.
- Бисько Н.А., Бухало А.С., Вассер С.П., Дудка И.А., Кулеш М.Д., Соломко Э.Ф., Шевченко С.В. Высшие съедобные базидиомицеты в поверхностной и глубинной культуре // Киев, Наукова думка. 1983. С. 312.
- Краснополяская Л.М., Шуктуева М.И., Автономова А.В., Ярина М.С., Джавахян Б.Р., Исакова Е.Б., Бухман В.М. Противоопухолевые и антиоксидантные свойства водорастворимых полисахаридов из мицелия базидиаль-

ного гриба *Flammulina velutipes* // Антибиотики и химиотерапия. 2016. Т. 61. № 11–12. С. 16–20.

Краснопольская Л.М., Ярина М.С., Автономова А.В., Усов А.И., Исакова Е.Б., Бухман В.М. Сравнительное изучение противоопухолевой активности полисахаридов из мицелия *Ganoderma lucidum* в опытах *in vivo* // Антибиотики и химиотерапия. 2015. Т.60. № 11–12. С. 29–34.

Чельшева И.Н., Плотников Н.П., Афанасьева Н.А. Совершенствование технологии получения древесных композиционных материалов // Лесной вестник. 2017. Т. 21. №. 5. С. 75–82.

Amidon T.E., Wood C.D., Shupe A.M., Wang Y., Graves M., Liu S. Biorefinery: Conversion of Woody Biomass to Chemicals, Energy and Materials // J. Biobased Materials & Bioenergy. 2008. V. 2. № 2. P. 100–120.

Dinis T.C.P., Madeira V.M.C., Almeida L.M. Action of phenolic derivatives (acetaminophen, salicylate, and 5-amino-salicylate) as inhibitors of membrane lipid peroxidation and as peroxy radical scavengers // Archives of Biochemistry & Biophysics. 1994. V. 315. № 1. P. 161–169.

Ewanick S.M., Bura R., Saddler J.N. Acid-catalyzed steam pretreatment of lodgepole pine and subsequent enzymatic hydrolysis and fermentation to ethanol. Biotechnology and bioengineering // Biotechnology & Bioengineering. 2007. V. 98. № 4. P. 737–746.

Foston M., Ragauskas A.J. Biomass characterization: recent progress in understanding biomass recalcitrance // Industrial Biotechnology. 2012. V. 8. № 4. P. 191–208.

Friedman M. Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds // J. Agricultural & Food Chemistry. 2015. V. 63. № 32. P. 7108–7123.

Jönsson L.J., Martín C. Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects // Bioresource Technology. 2016. V. 199. P. 103–112.

Kretschmer B., Buckwell A., Smith C., Watkins E., Allen B. Recycling agricultural, forestry & food wastes & residues for sustainable bioenergy & biomaterials. London, United Kingdom: Institute for European Environmental Policy, 2013. 151 p.

McMillan J.D. Pretreatment of lignocellulosic biomass // ACS Symposium Series. 1994. V. 556. № 15. P. 292–324.

Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar // Analytical Chemistry. 1959. V. 31. № 3. P. 426–42.

Stamets P. Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms / N.Y. Ten Speed Press, 2011. 614 p.

Sun Q., Foston M., Meng X., Sawada D., Pingali S.V., O'Neill H.M., Kumar R. Effect of lignin content on changes occurring in poplar cellulose ultrastructure during dilute acid pretreatment // Biotechnology for Biofuels. 2014. V. 7. № 1.

Zheng Y., Pan Z., Zhang R. Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production // International J. Agricultural & Biological Engineering. 2009. V. 2. № 3. P. 51–68.

## *Hericium erinaceus* Basidiomas Chemical Composition and Antioxidant Properties Depending on the Pretreatment of Pine and Beech Sawdust

A. V. Golyshkin<sup>1,\*</sup>, N. R. Al'myasheva<sup>1</sup>, and L. M. Krasnopol'skaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gause Institute of New Antibiotics, Bol'shaya Pirogovskaya st. 11, bldg. 1, Moscow, 119021 Russia

\*E-mail: a.v.golyshkin@gmail.com

The effect of pretreatment of lignocellulosic substrates on the fruit bodies forming of a xylotrophic basidiomycete *Hericium erinaceus* (Bull.) Persoon was studied, as well as the antioxidant properties of fruit body extracts. Pretreatment of beech and pine sawdust with mineral acids increased the bioavailability of the substrate for *H. erinaceus* and led to a significant reduction in the time required to form fruit bodies from 63 to 35 days as compared to untreated sawdust. All variants of substrates with pine sawdust ensured the production of fruit bodies with an increased content of phenolic compounds in comparison with substrates containing beech sawdust. Pretreatment with sulfuric acid led to an increase in the antiradical activity and chelating ability of fruit body extracts.

**Keywords:** coniferous and deciduous trees sawdust, *Hericium erinaceus*, antioxidant properties, cultivation substrate.

**Acknowledgements:** Work was carried out with financial support of RFBR, project 16-38-00902 mol\_a.

### REFERENCES

Al'myasheva N.R., Yarina M.S., Golyshkin A.V., Dzha-vakhyan B.R., Krasnopol'skaya L.M., Antioksidantnye svoystva vodorastvorimyykh polisakharidov i etanol'nykh ekstraktov mitseliya ksilotrofnyykh bazidial'nykh gribov (Antioxidant properties of water-soluble polysaccharides and ethanolic extracts of xylotrophic basidiomycetes myceli-

um), *Antibiotiki i khimioterapiya.*, 2017, Vol. 62, No. 7–8, pp. 8–12.

Amidon T.E., Wood C.D., Shupe A.M., Wang Y., Graves M., Liu S., Biorefinery: Conversion of Woody Biomass to Chemicals, Energy and Materials, *J. Biobased Materials & Bioenergy*, 2008, Vol. 2, No. 3, pp. 100–120.

Avtonomova A.V., Bakanov A.V., Leont'eva M.I., Vinokurov V.A., Usov A.I., Krasnopol'skaya L.M., Pogru-

- zhennoe kul'tivirovanie i khimicheskii sostav mitseliya *Herichium erinaceus* (Submerged cultivation and chemical composition of *Herichium erinaceus* mycelium), *Antibiotiki i khimioterapiya*, 2012, Vol. 57, No. 7–8, pp. 7–11.
- Avtonomova A.V., Krasnopol'skaya L.M., Protivoopukholevye i immunomoduliruyushchie svoystva trutovika lakirovannogo (*Ganoderma lucidum*) (Anti-tumor and immunomodulatory activities of *Ganoderma lucidum*), *Mikologiya i fitopatologiya*, 2013, Vol. 47, No. 1, pp. 3–11.
- Bis'ko N.A., Bukhalo A.S., Vasser S.P., Dudka I.A., Kulesh M.D., Solomko E.F., Shevchenko S.V., *Vysshie s'dobnye bazidiomitsety v poverkhnostnoi i glubinnoi kul'ture* (Higher edible basidiomycetes in surface and submerged culture), Kiev: Naukova dumka, 1983, 312 p.
- Chelysheva I.N., Plotnikov N.P., Afanas'eva N.A., Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya drevesnykh kompozitsionnykh materialov (Improvement of technology of wood composite materials), *Lesnoi vestnik*, 2017, Vol. 21, No. 5, pp. 75–82.
- Dinis T.C.P., Madeira V.M.C., Almeida L.M., Action of phenolic derivatives (acetaminophen, salicylate, and 5-aminosalicylate) as inhibitors of membrane lipid peroxidation and as peroxy radical scavengers, *Archives of Biochemistry & Biophysics*, 1994, Vol. 315, No. 1, pp. 161–169.
- Ewanick S.M., Bura R., Saddler J.N., Acid-catalyzed steam pretreatment of lodgepole pine and subsequent enzymatic hydrolysis and fermentation to ethanol. Biotechnology and bioengineering, *Biotechnology & Bioengineering*, 2007, Vol. 98, No. 4, pp. 737–746.
- Foston M., Ragauskas A.J., Biomass characterization: recent progress in understanding biomass recalcitrance, *Industrial Biotechnology*, 2012, Vol. 8, No. 4, pp. 191–208.
- Friedman M., Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Herichium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds, *J. Agricultural & Food Chemistry*, 2015, Vol. 63, No. 32, pp. 7108–7123.
- Jönsson L.J., Martín C., Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects, *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 199, pp. 103–112.
- Krasnopol'skaya L.M., Shuktueva M.I., Avtonomova A.V., Yarina M.S., Dzhavakhyan B.R., Isakova E.B., Bukhman V.M., Protivoopukholevye i antioksidantnye svoystva vodorastvorimykh polisakharidov iz mitseliya bazidial'nogo griba *Flammulina velutipes* (Antitumor and antioxidant properties of water-soluble polysaccharides from submerged mycelium of *Flammulina velutipes*), *Antibiotiki i khimioterapiya*, 2016, Vol. 61, No. 11–12, pp. 16–20.
- Krasnopol'skaya L.M., Yarina M.S., Avtonomova A.V., Usov A.I., Isakova E.B., Bukhman V.M., Sravnitel'noe izuchenie protivoopukholevoi aktivnosti polisakharidov iz mitseliya *Ganoderma lucidum* v opytakh in vivo (Antitumor activity of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* mycelium: in vivo comparative study), *Antibiotiki i khimioterapiya*, 2015, Vol. 60, No. 11–12, pp. 29–34.
- Kretschmer B., Buckwell A., Smith C., Watkins E., Allen B., *Recycling agricultural, forestry & food wastes & residues for sustainable bioenergy & biomaterials*, Institute for European Environmental Policy: 2013, 151 p.
- McMillan J.D., Pretreatment of lignocellulosic biomass, *ACS Symposium Series*, 1994, Vol. 556, No. 15, pp. 292–324.
- Miller R.S., Thomas J.L., The Effects of Larval Crowding and Body Size on the Longevity of Adult *Drosophila melanogaster*, *Ecology*, 1958, Vol. 39, No. 1, pp. 118–125.
- Stamets P., *Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms*, New York: Ten Speed Press, 2011, 614 p.
- Sun Q., Foston M., Meng X., Sawada D., Pingali S.V., O'neill H.M., Kumar R., Effect of lignin content on changes occurring in poplar cellulose ultrastructure during dilute acid pretreatment, *Biotechnology for Biofuels*, 2014, Vol. 7, No. 1.
- Zheng Y., Pan Z., Zhang R., Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production, *International J. Agricultural & Biological Engineering*, 2009, Vol. 2, No. 3, pp. 51–68.

УДК 574.472:582.29/.32+504.054(470.21)

## КРИПТОГАМНЫЕ ОРГАНИЗМЫ – ПИОНЕРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ПРИ СНИЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Г. П. Урбанавичюс<sup>а</sup>, \*, Е. А. Боровичев<sup>а</sup>, В. В. Ершов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН, Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., 184209 Россия

\*E-mail: g.urban@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.2019 г.

После доработки 11.11.2019 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Изучение процессов восстановления напочвенного покрова в зоне воздействия горно-металлургического комбината “Североникель” (г. Мончегорск, Мурманская область), позволило установить, что криптогамные организмы первыми поселяются на территории, на которой прежде весь напочвенный покров был уничтожен в результате сверхкритических уровней загрязнения. Впервые установлены виды лишайников и мохообразных, обладающие наибольшей токсикотолерантностью и способные произрастать в зоне техногенной пустыни. Ими являются печеночники *Isopaches bicrenatus*, *Nardia geoscyphus*, *Gymnocolea inflata*, *Solenostoma confertissimum* и мхи *Pohlia nutans*, *Dicranella cerviculata*. Установлено, что для поселения пионерных видов лишайников, даже наиболее приспособленных к высоким концентрациям тяжелых металлов (*Stereocaulon leucophaeopsis* и *St. pileatum*), необходимо формирование своеобразной основы – подстилки, представленной дернинами мохообразных. Всего в пределах прямого влияния медно-никелевого производства (1.7–10 км) выявлено 18 видов мохообразных и 13 видов лишайников: в зоне техногенной пустыни (1.7–2.7 км) – 6 и 1 вид, соответственно, в зоне техногенной пустоши (4–6.5 км) – 10 и 5 видов, в зоне техногенных редколесий (7–10 км) – 15 и 11 видов. Начальные этапы восстановления напочвенного покрова и заметное (в 2–3 раза) увеличение разнообразия наземной криптогамной биоты наблюдаются на удалении 6.5–10 км от источника загрязнения при снижении уровня выпадений сульфатов примерно в 2.5–3 раза, Ni – в 17 раз и Cu – в 20 раз.

**Ключевые слова:** Субарктика, северотаежные леса, загрязнение, биоразнообразие, восстановление, лишайники, мохообразные.

DOI: 10.31857/S0024114821020108

Восстановление ранее деградированных лесных ландшафтов и охрана биологического разнообразия – это два процесса, которые должны быть неразрывно связаны единой целью сохранения природной среды. Экономическая отдача в случае успешного восстановления ландшафтов может измеряться в миллиардах рублей, но главный потенциал кроется в возможности смягчения целого ряда последствий изменения климата вследствие деятельности человека (Beatty et al., 2018). При этом по своей сути восстановление лесных ландшафтов должно быть направлено на поддержание биологического разнообразия, а также видов и экосистем, которые его формируют. Конечная же цель восстановления проявится

в предоставлении непосредственных или опосредованных экосистемных услуг людям (Beatty et al., 2018).

Изучению и охране биоразнообразия посвящено большое число работ. В то же время исследований, посвященных изучению восстановления биоразнообразия в тех местах, где оно было практически полностью уничтожено в результате хозяйственной деятельности человека, почти нет. Существующие работы по данной тематике связаны в основном с интродукцией или реинтродукцией растений, искусственным восстановлением и поддержанием экосистем (Young, 2000; Лукина и др., 2005; Pressey et al., 2007; и др.).

Проблема восстановления территорий, нарушенных воздушным промышленным загрязнением, имеет особую актуальность в Мурманской области, которая является одним из наиболее индустриально развитых регионов России. Наме-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Госзадания ФИЦ КНЦ РАН на 2018–2022 гг. (№ АААА-А18-118021490070-5), а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00170 мол\_а).

тившееся в течение последних двух десятилетий снижение объемов производства и сокращение выбросов обусловило начальные признаки восстановления экосистем. Произошло замедление депрессионных процессов, и на расстоянии первых десятков километров уже наблюдаются признаки позитивной динамики восстановления растительного покрова (Черненко и др., 2011; и др.). Но, тем не менее, на участках, прилегающих непосредственно к источникам выбросов в радиусе первых километров, пока наблюдается практически полное отсутствие напочвенного покрова и каких-либо высших сосудистых растений, что нашло отражение в названии “техногенная пустыня” (Влияние ..., 1990; Проблемы ..., 2005). Было установлено, что лимитирующими возобновление растительного покрова в таких условиях являются не только высокий уровень загрязнения атмосферы, но также неблагоприятные эдафические условия и нарушение питательного режима почв, а в непосредственной близости к источнику выбросов — полное разрушение органического горизонта почвы (Лукина, Никонов, 1998).

В последние два десятилетия проводятся эксперименты по восстановлению растительного покрова при помощи разных методов ремедиации техногенных пустошей в окрестностях г. Мончегорска в зоне влияния комбината “Североникель” (Лукина, Никонов, 1999; Ганичева и др., 2004; Никонов и др., 2005; Исаева и др., 2010, 2011). Но в основе этих исследований лежит искусственное восстановление растительности и напочвенного покрова. Изучение восстановления биоразнообразия в напочвенном покрове техногенной пустыни на начальных стадиях путем естественного заселения аборигенными пионерными видами не проводится. Наши исследования являются одними из первых в данном направлении и посвящены изучению видового состава криптогамных организмов — лишайников, печеночников и мхов, участвующих в формировании естественного напочвенного покрова в условиях сверхвысоких уровней загрязнения в пределах техногенной пустыни, где, в отличие от техногенной пустоши, не произрастают какие-либо высшие сосудистые растения.

Лишайники известны как организмы, наиболее чувствительные к загрязнению воздуха. Они первыми исчезают при повышении до определенного уровня загрязнения, при котором древесные растения, являющиеся субстратом для поселения эпифитных лишайников, могут существовать еще продолжительное время (Nimis et al., 2002). Данные свойства лишайников нашли широкое применение в лихеноиндикации загрязнения окружающей среды (Бязров, 2002). В окрестностях крупных источников воздушных промышленных выбросов и центрах крупных мегаполисов могут формироваться так называемые “лишайни-

ковые пустыни” (Nimis et al., 2002). Но при снижении уровня загрязнения воздуха нередко наблюдаются обратные явления, когда лишайники начинают возвращаться в ранее покинутые районы (Stapper, Kricke, 2004). Известно немало случаев начала восстановления эпифитного лишайникового покрова в окрестностях закрытых металлургических комбинатов (Beckett, 1995; Gunn et al., 1995; Schram et al., 2015) или значительно сокративших объемы аэропромвыбросов (Михайлова, 2017). Тем не менее сведений о восстановлении напочвенных видов лишайников в местах, где они прежде были уничтожены сверхкритическим уровнем загрязнения, в литературе мы не обнаружили.

Широко известна способность мохообразных (мхи и печеночники) аккумулировать высокие концентрации тяжелых металлов (Tyler, 1990). На эту способность обратили внимание еще в XIX в., когда начал исчезать ряд видов с территории городов. Большинство напочвенных мхов крайне чувствительны и обычно не выдерживают повышенных уровней локального загрязнения. В результате лабораторных опытов были определены пределы чувствительности и оказалось, что мохообразные чувствительны уже к сравнительно низким концентрациям сернистого газа (Bell, 1973). Выявлено, что наиболее сильное воздействие на мхи оказывает сочетание окислов серы с солями тяжелых металлов, а их источниками являются предприятия цветной металлургии (Taoda, 1972). Но некоторые напочвенные верхплодные мхи и печеночники необычайно толерантны и способны выдерживать даже инкрустацию поверхности побегов осажденными солями тяжелых металлов (Tyler, 1990).

Работы по изучению изменения мохового покрова при промышленном загрязнении в районе действия комбината “Североникель” проводились Е.Н. Андреевой (1990, 2005). Ею были получены данные об изменении видового состава мохообразных сосновых и еловых лесов в зависимости от расстояния до источника загрязнения. Выявлены три этапа деградации мохового покрова, соответствующие трем зонам поражения лесных экосистем.

Комплексные результаты изучения изменения биоразнообразия лесных экосистем на расстоянии от 5 до 30 км от источника были представлены в работе Т.В. Черненко с соавт. (2009). Авторами показано наличие в импактной зоне на удалении 5 и 10 км от комбината “Североникель” всего двух видов мохообразных (*Pohlia nutans* и *Polytrichum hyperboreum*) и 5 видов напочвенных лишайников (*Cladonia chlorophaea*, *C. crispata*, *Flavocetraria nivalis*, *Stereocaulon condensatum* и *Trapeliopsis granulosa*). Прочие виды лишайников, указанные для импактной зоны, не относятся к напочвенным либо неверно идентифицированы.

Но эти данные относятся к техногенной пустоши (5 км от комбината) и техногенным редколесьям (10 км от комбината), согласно представлениям Н.В. Лукиной с соавт. (2005). Сведения о составе криптогамной биоты на более близких расстояниях к комбинату в зоне техногенной пустыни до наших исследований отсутствовали.

Проводившие многолетние исследования влияния аэропромвыбросов комбината “Североникель” на лесные экосистемы специалисты Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН В.Г. Ярмишко с соавт. полагают, что “... в импактной зоне при сохранении современного уровня аэротехногенной нагрузки мохово-лишайниковый ярус останется полностью разрушенным ... При прекращении деятельности комбината восстановление мохово-лишайникового яруса в импактной зоне начнется через ~100 лет, когда концентрации тяжелых металлов в органо-генном горизонте почвы достигнут значений, наблюдающихся в буферной зоне” (Ярмишко и др., 2011, стр. 29). Однако после подведения итогов полевого эксперимента этими же авторами получены свидетельства о незначительной миграции тяжелых металлов из загрязненной почвы в наземные части растительных организмов (Лянгузова и др., 2015). Накопление в живом талломе лишайника *Cladonia stellaris* тяжелых металлов – Cu 1.2–3.9 и Ni 1.9–4.8 мг кг<sup>-1</sup> сух. в-ва, по данным этих авторов, не коррелирует с уровнем накопления тяжелых металлов в подстилке (Ni – от 9.4 до 120 мг кг<sup>-1</sup>, Cu – от 21.6 до 624 мг кг<sup>-1</sup>). Мы полагаем, что это может свидетельствовать о меньшей зависимости восстановительной способности мохово-лишайникового покрова от уровня накопления загрязняющих веществ в почве.

Восстановление и устойчивое функционирование лесных экосистем невозможно без восстановления основных компонентов, характерных для данных природно-климатических условий и конкретных ландшафтов. В условиях Кольской Субарктики одним из основных компонентов растительного покрова является мохово-лишайниковый ярус. Криптогамные организмы, наиболее примитивные из формирующих напочвенный ярус растительности – лишайники и мохообразные, являются пионерными видами, т.е. первопоселенцами в самых суровых природных условиях высокогорных и полярных пустынь Арктики и Антарктики. Такая их природная особенность способствует и тому, что они первыми осваивают техногенные пустыни, лишенные напочвенного покрова из-за крайне высокого уровня концентрации загрязняющих веществ.

Целью данной работы является выявление разнообразия криптогамных организмов и установление особенностей его пространственного варьирования по градиенту аэротехногенного за-

грязнения в импактной зоне на расстоянии первых 1.7–10 км от горно-металлургического комбината “Североникель”, г. Мончегорск, Мурманская область.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследования являются представители наземной криптогамной биоты – лишайники и мохообразные (печеночники и мхи). Сборы образцов и детальные описания видового состава и группировок лишайников и мохообразных осуществлялись согласно принятым во флористических и геоботанических исследованиях методикам. Было выбрано семь участков в направлении преобладающего переноса загрязняющих веществ на удалении от 1.7 до 10 км в зоне воздействия выбросов комбината “Североникель” (табл. 1).

На каждом из участков было заложено и описано по 5 учетных площадок размером 2 × 2 м. Учетные площадки выбирались случайным образом, с охватом преобладающих элементов рельефа и степени развития (отсутствия) напочвенного покрова. На каждой учетной площадке выявлялся полный видовой состав произрастающих лишайников и мохообразных (сосудистые растения учитывались, если они там присутствовали), а также их проективное покрытие (ПП). Неопределяемые в полевых условиях образцы лишайников и мохообразных коллекционировались для последующего определения в лабораторных условиях.

Определение видового состава лишайников и мохообразных осуществлялось в лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии КНЦ РАН, с использованием микроскопов “Микмед-6”, “Zeiss” и бинокляра МСП-2, вариант 4, по общепринятым методикам. Названия таксонов приведены: лишайники – по чеклисту лихенофлоры России (Урбанавичюс, 2010), печеночников – согласно мировому списку печеночников (Söderström et al., 2016), мхов – по М.С. Ignatov et al. (2006), сосудистых растений – по С.К. Черепанову (1995), с некоторыми изменениями.

Отбор атмосферных осадков (дождевых – с мая по сентябрь, снеговых – с октября по март) осуществлялся в двух подзонах импактной зоны: 1) техногенная пустыня – осадкоприемники располагались на северном склоне горы Сопча на расстоянии 1.7–1.8 км от центра горно-металлургического комбината “Североникель”; 2) техногенные редколесья – осадкоприемники располагались на расстоянии 7 и 10 км от источника промвыбросов. На всех мониторинговых площадках осадкоприемники устанавливались не менее чем в трехкратной повторности. Осадкоприемники для дождевых вод представляют собой пластиковые трубы, внутрь которых помеща-

**Таблица 1.** Характеристика участков изучения криптогамной биоты в окрестностях комбината “Североникель” по градиенту загрязнения

Номер участка	Местоположение и характер растительного покрова	Географические координаты участка	Расстояние от источника загрязнения, км	Зоны трансформации и экосистем
1	Северный склон горы Сопча. Напочвенный покров полностью разрушен. Растительность на трех площадках отсутствует, на двух площадках отмечены мохообразные	67°54'02–05" с.ш., 32°51'03–08" в.д.	1.7	Техногенная пустыня
2	Северо-восточный отрог горы Сопча. Напочвенный покров разрушен. На всех площадках присутствуют мохообразные в сильно угнетенном состоянии; на одной площадке присутствует один вид лишайника	67°53'36–48" с.ш., 32°51'11–14" в.д.	2.7	
3	Средняя часть южного склона горы Сопча. Растительность на двух площадках отсутствует; на трех площадках отмечены мохообразные; на одной площадке присутствует один вид лишайника	67°52'37–46" с.ш., 32°49'10–20" в.д.	4.2	Техногенная пустошь
4	Нижняя часть южного склона горы Сопча. На одной площадке растительность отсутствует, на остальных развит моховой покров с заметным участием сосудистых растений; на одной площадке присутствует один вид лишайника	67°52'15–19" с.ш., 32°49'06–11" в.д.	5	
5	Южное подножие г. Сопча. Растительность на двух площадках представлена только мохообразными, на трех площадках – с участием сосудистых растений и лишайников	67°51'29–33" с.ш., 32°49'17–20" в.д.	6.5	
6	Елово-березовое редколесье. Напочвенный покров представлен на всех площадках с участием мохообразных, лишайников и сосудистых растений	67°51'12–15" с.ш., 32°47'39–52" в.д.	7	Техногенные редколесья
7	Сосновое редколесье. Напочвенный покров представлен на всех площадках с участием мохообразных, лишайников и сосудистых растений	67°49'47–51" с.ш., 32°45'31–41" в.д.	10	

ется полиэтиленовый пакет вместимостью до 3 л., закрепляемый специальным колпаком с воронкой диаметром 16 см. На участке 1.7 км дождевые осадки отбирались с мая по сентябрь 2018 г., снеговые – в конце периода снегонакопления в марте 2018–2019 гг. В 7 и 10 км от источника выбросов атмосферные осадки (дождь и снег) отбирались в 2013–2018 гг. На промежуточных участках в зоне техногенной пустоши и на вершине горы Сопча осадки по техническим причинам не отбирались. Образцы дождевых выпадений отбирали ежемесячно; для анализа использована аликвотная часть пробы (не менее 250–300 мл). Металлы медь и никель определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, сульфаты – методом ионообменной хроматографии.

Нами было изучено содержание основных загрязняющих веществ в подстиляющем горизонте почвы на всех участках. Тем не менее мы считаем нецелесообразным приводить эти результаты в данной работе по двум причинам. Во-первых, по-

лученные данные оказались очень вариабильны и не имели корреляции с обилием и разнообразием криптогамной биоты на изученных участках по градиенту загрязнения. Во-вторых, накопление тяжелых металлов в лишайниках слабо зависит от уровня накопления тяжелых металлов в подстиляющих почвах. Эти организмы не имеют корней и питательные вещества они получают не из почвы, а из атмосферы вместе с влажным воздухом или осадками.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения пространственного изменения выпадений основных загрязняющих веществ Cu, Ni и SO<sub>4</sub> с атмосферными осадками (табл. 2) и разнообразия выявленных криптогамных организмов (рис. 1, табл. 3) показывают естественную закономерность по градиенту загрязнения. Уровень выпадения Cu и Ni в пределах первых 2 км и на расстоянии 7–10 км от источника

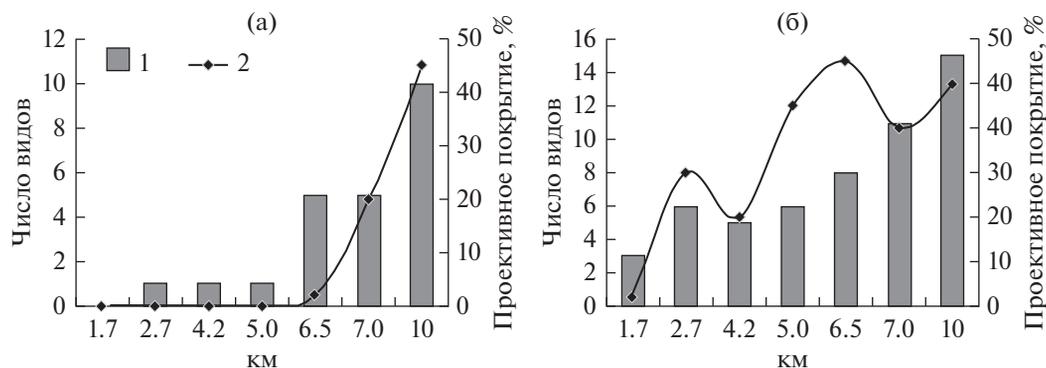


Рис. 1. Изменения разнообразия напочвенной биоты (а – лишайники, б – мохообразные) по градиенту загрязнения от комбината “Североникель”; 1 – число видов, 2 – проективное покрытие.

аэропромвыбросов различается примерно в 15–30 и 10–20 раз, соответственно, по выпадениям  $\text{SO}_4$  различие составляет более чем 2 раза (табл. 2). При этом на первых 5 км число выявленных видов лишайников остается неизменным – здесь отмечено по 1 виду с крайне низким ПП. И лишь с расстояния 6.5 км происходит заметное увеличение разнообразия напочвенных лишайников – здесь найдено 5 видов, как и на расстоянии 7 км. Но на удалении 6.5 км ПП остается еще очень низким – порядка 2%; заметно увеличивается оно лишь с 7 км – до 20%. На удалении 10 км в напочвенном покрове обнаружено уже 10 видов лишайников, и ПП их достигает в среднем 45%. Аналогичные изменения по градиенту загрязнения происходят и среди мохообразных. Единственная особенность, которую мы можем подчеркнуть, это то, что мохообразные быстрее, более активно и обильно начинают проявлять себя на близких к источнику загрязнения площадках, чем лишайники (рис. 1).

На подверженных максимальному воздействию загрязняющих веществ участках в пределах первых 3 км от источника выбросов (участки 1 и 2) в напочвенном покрове не отмечено сосудистых растений. Само понятие “напочвенный покров” для данных участков в прямом значении этих слов не применимо. Органогенный слой из отмерших растений здесь отсутствует. Даже на расстоянии 4–5 км от источника выбросов на части учетных площадок полностью отсутствует какая-либо растительность и лишайники. Первыми поселенцами, выдерживающими максимальные уровни загрязнения в зоне техногенной пустыни на расстоянии первых 3 км, являются мохообразные – печеночники и мхи (табл. 3). На расстоянии 1.7 км от источника загрязнения печеночник *Nardia geoscyphus* и листостебельные мхи *Pohlia nutans* и *Dicranella cerviculata* отмечены только на двух учетных площадках из пяти с минимальным ПП – от 2 до 4%; в среднем оно составляет около 2%. Это

виды с широкой экологической амплитудой. Моховой покров представлен отдельными, неконтактирующими между собой группировками. Причем сохраняется фотосинтезирующая часть побега текущего года, а побег прошлого года минерализуется. Виды мохообразных, обитающие в этой зоне, можно отнести к наиболее токситолерантным. При этом надо отметить, что мох *Pohlia nutans* был отмечен на всех учетных площадках (табл. 3). В отсутствии каких-либо видов лишайников данную территорию однозначно можно охарактеризовать как “лишайниковая пустыня”.

Не отмечены сосудистые растения и на втором участке в 2.7 км от источника выбросов, расположенном на вершине горы Сопча, на высотах 480–

Таблица 2. Среднегодовое выпадение с атмосферными осадками Ni, Cu и  $\text{SO}_4^{2-}$  на различном удалении от источника загрязнения,  $\text{mg m}^{-2}$

Расстояние до источника загрязнения, км	Ni	Cu	$\text{SO}_4^{2-}$
Жидкие осадки			
1.7	92.52*	82.33*	2335.64*
7	7.64	4.45	1053.27
	1.71	1.31	363.50
10	5.45	3.50	1008.88
	1.31	0.88	293.62
Твердые осадки			
1.7	222.05	70.91	1132.59
	53.27	14.62	180.53
7	16.18	5.06	303.76
	6.63	1.75	51.31
10	8.37	1.68	188.75
	4.43	0.78	29.40

\* Без расчета стандартной ошибки (данные только за 2018 г.). Примечание. В числителе – среднее, в знаменателе – стандартная ошибка.

**Таблица 3.** Изменение видового разнообразия и проективного покрытия лишайников и мохообразных по градиенту загрязнения

Вид	Расстояние от источника промвыбросов, км						
	1.7	2.7	4.2	5	6.5	7	10
Лишайники							
<i>Baeomyces placophyllus</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Baeomyces rufus</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Cetraria islandica</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Cladonia borealis</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Cladonia coccifera</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Cladonia deformis</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Placynthiella uliginosa</i>	–	–	–	–	+	+	+
<i>Protothelenella sphinctrinoides</i>	–	–	–	–	+	+	+
<i>Stereocaulon alpinum</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Stereocaulon leucophaeopsis</i>	–	+	–	–	+	–	–
<i>Stereocaulon pileatum</i>	–	–	+	+	+	–	–
<i>Stereocaulon paschale</i>	–	–	–	–	+	+	–
<i>Trapeliopsis granulosa</i>	–	–	–	–	–	+	+
Число видов	0	1	1	1	5	5	10
Среднее ПП, %	0	<0.01	<0.01	<0.01	2	20	45
Мохообразные							
<i>Barbilophozia hatcheri</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Blepharostoma trichophyllum</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Bucklandiella microcarpa</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Cephalozia bicuspidata</i>	–	–	–	–	+	+	+
<i>Dicranella cerviculata</i>	+	+	–	–	+	–	–
<i>Diplophyllum taxifolium</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Gymnocola inflata</i>	–	+	+	+	+	+	+
<i>Isopaches bicrenatus</i>	–	+	–	+	+	+	+
<i>Lophozia murmanica</i>	–	–	–	+	+	–	+
<i>Nardia geoscyphus</i>	+	+	–	+	+	+	+
<i>Oligotrichum hercynicum</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Pohlia andalusica</i>	–	–	+	–	–	–	–
<i>Pohlia nutans</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Polytrichum hyperboreum</i>	–	–	–	–	–	+	+
<i>Pseudolophozia sudetica</i>	–	–	+	–	–	–	–
<i>Solenostoma confertissimum</i>	–	+	+	+	+	+	+
<i>Sphenolobus minutus</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Trilophozia quinquedentata</i>	–	–	–	–	–	–	+
Число видов	3	6	5	6	8	11	15
Среднее ПП, %	2	30	20	45	55	40	50

Примечание. ПП – проективное покрытие, “+” – вид присутствует, “–” – вид отсутствует.

490 м над ур. моря. Внешний аспект данного участка выглядит как техногенная пустыня, на которую, вероятно, могут накладываться суровые условия высотной поясности. Хотя на аналогичных высотах на прилегающих горных массивах

Чуна-тундра и в Хибинах развиты типичные горные лишайниковые тундры. Мохообразные на этом участке отмечены на всех пяти учетных площадках и представлены уже 6 видами (табл. 3). Их ПП на отдельных учетных площадках колеблется

от 0.5 до 60%, составляя в среднем около 30%. Здесь встречаются виды, нехарактерные для коренных лесов, и они приурочены к намывам почвы или мелкозема. На этом участке (как и на первом, третьем, четвертом и пятом) были отмечены различные анатомо-морфологические отклонения от нормы – развитие вторичной пигментации (коричневатая, буроватая) у *Isopaches bicrenatus*, *Solenostoma confertissimum*, *Dicranella cerviculata*; некротические процессы в побегах *Nardia geoscyphus*, *Dicranella cerviculata* и плазмолиз краевых клеток у *Solenostoma confertissimum*. Подобные явления уже отмечались для мохообразных в 8 км юго-юго-западнее источника загрязнения в окрестностях Мончегорска (Андреева, 1990).

Только на удалении 2.7 км от источника воздушных промышленных выбросов начинают отмечаться первые лишайники. На одной из пяти учетных площадок обнаружен лишайник *Stereocaulon leucophaeopsis* – один из немногих видов, эволюционно приспособившихся к обитанию в местах высокой концентрации тяжелых металлов, в том числе Cu и Ni (Purvis, James, 1985; Purvis, Halls, 1996; Wirth et al., 2013). По этой причине естественно произрастание такого вида на участках, наиболее приближенных к источнику загрязнения. Здесь лишайник был представлен только небольшими фрагментами (ПП < 0.01%) в стерильном состоянии, но с вегетативными пропегулами – соредиями. Известно, что соредиозные формы лишайников всегда более успешно расселяются – вероятно, таким образом реализуется их жизненная стратегия приспособления к неблагоприятным условиям среды. При этом *St. leucophaeopsis* поселялся исключительно на живых или отмирающих дернинках мхов и печеночников и не произрастал на минеральном грунте.

На третьем участке, расположенном на южном склоне горы Сопча и удаленном от источника выбросов на 4.2 км, только на одной учетной площадке из пяти отмечен лишайник – *Stereocaulon pileatum* (ПП < 0.01%). Он так же, как и *St. leucophaeopsis*, является токситолерантным по отношению к тяжелым металлам. В естественных природных условиях он нередко первым поселяется на каменистом субстрате или мелкоземе, содержащем какие-либо тяжелые металлы, в том числе Cu и Ni (Purvis, Halls, 1996; Wirth et al., 2013). *St. pileatum* также является соредиозным, что способствует его расселению в импактной зоне. На южном склоне и у подножия горы Сопча он отмечен с высоким обилием, как на каменистом субстрате, так и на участках почвы, соприкасающихся с камнями.

На третьем участке на трех из пяти учетных площадках выявлено 5 видов мохообразных – *Gymnocolea inflata*, *Pohlia nutans*, *P. andalusica*, *Pseudolophozia sudetica*, *Solenostoma confertissimum*.

ПП их варьирует от 5 до 90%, составляя в среднем для пяти учетных площадок около 20%. На этих же трех учетных площадках были зафиксированы и первые сосудистые растения – *Betula czerepanovii*, *Calamagrostis lapponica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum arvense*, *Eriophorum polystachion*, *Poa pratensis*, *Salix borealis*, *Steris alpina*. При этом на одной учетной площадке, расположенной в ложбине стока, проективное покрытие мохообразных достигает 90%. Здесь, у подножия горы Сопча, где оголенные всхолмления чередуются с сырыми понижениями, занятыми приурочиваемыми ценозами, чаще слегка заболоченными ивняками, существуют небольшие островки сомкнутой растительности (покрытие 70–90%). В основном, на данном участке практически полностью отсутствует напочвенный покров, а учетная площадка в ложбине стока скорее является исключением.

На четвертом участке, расположенном в 5 км от комбината “Североникель”, растительный покров в целом формируется на большей площади, чем на предыдущих участках. Здесь в напочвенном покрове отсутствует травяно-кустарничковый ярус, но отмечаются три вида древесных растений – *Salix borealis*, *S. caprea* и *Betula czerepanovii*. Напочвенный покров на этом участке сформирован исключительно мохообразными – *Gymnocolea inflata*, *Isopaches bicrenatus*, *Lophozia murmanica*, *Nardia geoscyphus*, *Pohlia nutans*, *Solenostoma confertissimum*. ПП мохообразных на четырех учетных площадках составляет от 20 до 85%. На одной учетной площадке мохообразные отсутствовали. Лишайники в напочвенном покрове отмечены только на одной учетной площадке и представлены единственным токситолерантным видом *Stereocaulon pileatum*, находящимся здесь также в стерильном состоянии и представленном единичным талломом (ПП ~0.1%). Необходимо отметить, что за пределами учетных площадок на данном участке он встречался неоднократно на каменистом субстрате (но не на почве).

На удалении 6.5 км от комбината “Североникель” (пятый участок) происходит увеличение как разнообразия видов лишайников, участвующих в сложении напочвенного покрова, так и их общего ПП до 5% на отдельных учетных площадках. На двух из пяти учетных площадках лишайники отсутствовали; на остальных трех площадках ПП варьирует от 0.1 до 5%. А еще на двух площадках лишайники были представлены только двумя токситолерантными видами, отмеченными и на предыдущих участках – *Stereocaulon leucophaeopsis* и *St. pileatum*. Но здесь лишайник *St. leucophaeopsis* был обнаружен с развитыми плодовыми телами, что может свидетельствовать о более благоприятных условиях обитания по сравнению с предыдущими участками.

В пределах данного участка на учетной площадке, расположенной в небольшом понижении с обильно развитым напочвенным покровом, зафиксированы первые виды лишайников, которые (по литературным сведениям) не являются токситолерантными. Лесной вид *Stereocaulon paschale*, обычный как в ненарушенных, так и в умеренно нарушенных естественных лесных экосистемах, здесь представлен единичной подушечкой. Еще два лишайника — *Placynthiella uliginosa* и *Protothelenella sphinctrinoides* — характерные виды нарушенных мест обитания (по естественным или антропогенным причинам). Здесь их проективное покрытие составляет немногим менее 5%. Эти виды нередко являются первопоселенцами на умеренно нарушенных местообитаниях без полного уничтожения органического слоя. Для их обитания необходима основа, состоящая из торфянистых остатков (для *P. uliginosa*) и угнетенных моховых дернин (для *P. sphinctrinoides*). Первый вид — *P. uliginosa* — иногда относят к лишайникам, устойчивым к загрязнению тяжелыми металлами (например, Михайлова, 2017); по второму виду — *P. sphinctrinoides* — нам такие сведения не известны. Поскольку *Protothelenella sphinctrinoides* обнаружен нами неоднократно с высоким покрытием и на других участках в 7 и 10 км от источника выбросов комбината “Североникель” со значительным уровнем выпадения атмосферных загрязняющих веществ, мы вполне уверенно можем считать данный вид токситолерантным.

Мохообразные на пятом участке немного более разнообразны по сравнению с предыдущим и произрастают здесь с несколько большим покрытием (табл. 3). Пока они продолжают оставаться преобладающими в напочвенном растительном покрове по сравнению с сосудистыми растениями и лишайниками. Проективное покрытие мохообразных на пяти изученных учетных площадках варьирует от 40 до 85%. На одной учетной площадке зафиксировано и максимальное число видов — 5: *Cephalozia bicuspidata*, *Gymnocolea inflata*, *Nardia geoscyphus*, *Pohlia nutans*, *Solenostoma confertissimum*. Всего на этом участке выявлено 7 видов мохообразных, со средним проективным покрытием 55% (наибольшее на всем изученном градиенте). Достаточно высокое разнообразие мохообразных (как и сосудистых растений) с большим покрытием на данной учетной площадке обусловлено особенностями рельефа — некоторое понижение, где больше и дольше всего застывает влага, а также формируется более глубокий снежный покров.

На удалении 7 км от комбината “Североникель” в районе еловой техногенной пустоши растительный покров и остатки елового древостоя сильно варьируют в зависимости от положения в рельефе. На выпуклых склонах, где не задерживается влага, напочвенный покров очень разрежен

или отсутствует, тогда как в понижениях, в условиях застоя влаги, наблюдается полностью сомкнутый напочвенный покров из сосудистых растений и мохообразных. По сравнению с предыдущими участками (1–5) здесь на всех учетных площадках сосудистые растения участвуют в сложении растительного покрова наряду с мохообразными и лишайниками. Среди лишайников появляются представители естественных ненарушенных лесов из рода *Cladonia* — вид *C. deformis*, который отмечен на трех из пяти учетных площадках. Но наиболее массовыми и постоянно встречающимися на всех площадках являются два вида — *Placynthiella uliginosa* и *Trapeliopsis granulosa*. Они оба (особенно последний) наиболее активно заселяют в естественных незагрязненных местообитаниях любые нарушенные участки почв с сохранившимся органогенным горизонтом. Лишайник *T. granulosa* обычно отмечают и среди пионеров восстановления напочвенной биоты после лесных пожаров или иных воздействий, разрушительных для растительного напочвенного покрова (Горшков, Баккал, 2012; Adamska, Deptula, 2015; и др.). Проективное покрытие лишайников на изученных площадках варьирует от 1 до 50%.

Роль криптогамной биоты в сложении растительного покрова на данном участке, по нашим наблюдениям, сильно зависит от условия увлажнения. На более сухих участках преобладают сообщества лишайников (главным образом из *T. granulosa*). Но в пониженных или умеренно затененных местах с большей увлажненностью преобладают мохообразные, как по числу выявленных видов, так и по проективному покрытию, которое варьирует от 20 до 70% и составляет в среднем около 40% (табл. 3). В такой же зависимости от увлажненности находится разнообразие и обилие сосудистых растений — *Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Empetrum hermaphroditum*, *Picea obovata*, *Salix caprea*, *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*. Пример с шестым участком наилучшим образом демонстрирует, что при относительно равном уровне поступления из атмосферы загрязняющих веществ, распределение разнообразия напочвенной биоты и проективного покрытия определяется в значительной мере элементами ландшафта — с большим увлажнением в понижениях или сухих на положительных формах рельефа.

На седьмом участке, расположенном на удалении 10 км от комбината “Североникель” в сосновом редколесье, как и на предыдущем, в напочвенном покрове участвуют все группы биоты — сосудистые растения, мохообразные и лишайники. При этом происходит заметное увеличение видового разнообразия лишайников — здесь встречается уже 10 видов (табл. 3). Но еще более заметно, по сравнению с предыдущими участками, увеличивается проективное покрытие ли-

шайников в напочвенном покрове (хотя на одной из учетных площадок ПП лишайников составляет около 1% в виду обильного покрытия мохообразными). На некоторых учетных площадках доминирующая роль в формировании напочвенного покрова принадлежит почти исключительно лишайникам (на одной из учетных площадок они занимают до 90%). Здесь основу всего напочвенного покрова составляет, как и на шестом участке, пионерный вид *Trapeliopsis granulosa*. Половина лишайников представлена здесь достаточно обычными в фоновых районах видами из родов *Baeomyces*, *Cetraria*, *Cladonia*, *Stereocaulon*, которые характерны для напочвенного покрова с умеренным или слабым нарушением. Но в условиях умеренного затенения под пологом соснового леса преобладающая роль в напочвенном покрове принадлежит мохообразным, ПП которых варьирует от 5 до 90%, в среднем составляя около 50% (табл. 3), и сосудистым растениям – *Arctous alpina*, *Avenella flexuosa*, *Betula czerepanovii*, *Calluna vulgaris*, *Diphasiastrum complanatum*, *Empetrum hermaphroditum*, *Ledum palustre*, *Lycopodium annotinum*, *Pinus sylvestris*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*. Лишь мох *Bucklandiella microcarpa* произрастает на камнях, а не в напочвенном покрове.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить ряд закономерностей при естественном восстановлении растительного покрова и характере изменения разнообразия напочвенной биоты на градиенте загрязнения от комбината “Североникель”. В пределах зоны техногенной пустыни на расстоянии до 3 км от источника выбросов обнаружено 6 видов мохообразных и 1 вид лишайника. В зоне техногенной пустоши на удалении 4–6.5 км выявлено уже 15 видов – 10 мохообразных и 5 лишайников. В техногенных редколесьях на расстоянии 7–10 км от источника промышленных выбросов обитает 26 видов – 15 мохообразных и 11 лишайников. Так же существенно изменяется и проективное покрытие криптогамных организмов – от 0–5 до 90%.

Впервые выявлены самые первые из организмов, обладающих наибольшей токситолерантностью, которые обитают на ближайших к источнику загрязнения обследованных участках в пределах до 3 км. Ими оказались мохообразные: печеночники *Isopaches bicrenatus*, *Nardia geoscyphus*, *Gymnocolea inflata* и *Solenostoma confertissimum*, а также мхи *Pohlia nutans* и *Dicranella cerviculata*. Именно эти организмы формируют живой растительный покров на минеральном грунте, создавая тем самым основу для дальнейшего заселения другими организмами, в частности – лишайниками. Все эти виды являются пионерами зарастания при различного рода на-

рушениях, предпочитая поселяться по обочинам дорог и троп, на пятнах выдувания и т.п.

Лишайники, как и мохообразные, являются пионерными организмами, способными заселять местообитания, неблагоприятные для высших сосудистых растений, – свежие обнажения скальных пород, освободившихся из-под льда в горах и полярных областях, недавно остывшие лавовые потоки вокруг вулканов. И, как нами показано, они также одними из первых заселяют техногенные пустыни, возникшие под воздействием высоких уровней атмосферного загрязнения. Из лишайников первыми появляются виды, эволюционно приспособленные к обитанию на субстратах, богатых тяжелыми металлами и обладающие наибольшей токситолерантностью, – *Stereocaulon leucophaeopsis* и *St. pileatum*. Впервые установлено, что для поселения пионерных видов лишайников, даже наиболее токситолерантных и приспособленных к высоким концентрациям тяжелых металлов, необходимо формирование своеобразной основы – подстилки, представленной дернинами мохообразных. Учитывая характер и особенности произрастания в зоне техногенной пустоши, еще два вида лишайников – *Placynthiella uliginosa* и *Protothelenella sphinctrinoides* – можно считать умеренно токситолерантными.

Признаки восстановления напочвенного покрова и заметное увеличение разнообразия наземной криптогамной биоты зафиксированы на удалении 6.5–10 км от источника загрязнения комбината “Североникель”. На таком удалении в сложении напочвенного покрова на учетных площадках принимают участие в общей сложности уже 29 видов мохообразных и лишайников. Максимальное покрытие и обилие наблюдаются в пониженных формах рельефа, где в большем количестве и на долгое время задерживается влага. Тем не менее, полноценное восстановление напочвенного покрова в импактной зоне в пределах до 10 км от источника выбросов, т.е. формирование сообществ, близких к исходному состоянию по видовому составу и уровню разнообразия, еще не произошло. В тоже время мы приходим к заключению, что восстановление мохово-лишайникового яруса может начаться не через ~100 лет после прекращения действия источника аэропробы выбросов, как предполагают некоторые авторы (Ярмишко и др., 2011), а гораздо быстрее, вне зависимости от уровня накопления тяжелых металлов в почве. По нашим наблюдениям оно уже происходит в настоящее время.

Несомненно, выявленное разнообразие криптогамных организмов в зоне влияния сверхвысоких уровней воздушного загрязнения еще не свидетельствует об однонаправленных процессах восстановления напочвенного покрова. Полученные в 2017–2018 гг. данные – лишь первая

фиксация пула видов, который существует при действующем уровне загрязнения на изученных ландшафтах. Динамика изменений в числе видов, их обилии и проективном покрытии в связи с намеченным сокращением объемов воздушных промышленных выбросов может быть выявлена только после более продолжительного периода наблюдения.

\* \* \*

Благодарим Т.П. Другову (ПАБСИ КНЦ РАН) за определение ряда образцов мхов и Е.О. Киселеву (ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН) за химический анализ атмосферных осадков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.Н.* Влияние атмосферного загрязнения на моховой покров северо-таежных лесов // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 1990. С. 159–172.
- Андреева Е.Н.* Структура мохового покрова в условиях атмосферного загрязнения // Проблемы экологии растительных сообществ. СПб.: Изд-во ООО “ВВМ”, 2005. С. 105–129.
- Бязров Л.Г.* Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
- Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 1990. 195 с.
- Ганичева С.Н., Лукина Н.В., Костина В.А., Никонов В.В.* Техногенная дигрессия и восстановительная сукцессия в хвойных лесах Кольского полуострова // Лесоведение. 2004. № 3. С. 57–67.
- Горшков В.В., Баккал И.Ю.* Особенности послепожарной восстановительной динамики сообществ с доминированием лишайников // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1(5). С. 1223–1227.
- Исаева Л.Г., Лукина Н.В., Белова Н.В.* Опыт восстановления растительности на техногенных пустошах вокруг комбината “Североникель”: методы, сравнительный анализ // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Матер. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010. Ч. 2. С. 28–33.
- Исаева Л.Г., Лукина Н.В., Горбачева Т.Т., Белова Е.А.* Ремедиация нарушенных территорий в зоне влияния медно-никелевого производства // Цветные металлы. 2011. № 11. С. 66–70.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.* Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.* Оптимизация питательного режима почв как фактор восстановления нарушенных лесных экосистем Севера // Лесоведение. 1999. № 2. С. 57–67.
- Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г.* Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северо-таежных лесах. М.: Наука, 2005. 244 с.
- Лянгузова И.В., Горшков В.В., Баккал И.Ю., Бондаренко М.С.* Воздействие почвенного загрязнения тяжелыми металлами на напочвенный покров сосняка лишайниково-зеленомошного в условиях полевого эксперимента // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3(27). С. 74–86.
- Михайлова И.Н.* Начальные этапы восстановления сообществ эпифитных лишайников после снижения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2017. № 4. С. 277–281.
- Никонов В.В., Лукина Н.В., Исаева Л.Г., Горбачева Т.Т., Белова Е.А.* Восстановление территорий, нарушенных воздушным загрязнением медно-никелевого производства на Кольском полуострове // Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2005. С. 288–293.
- Проблемы экологии растительных сообществ Севера. СПб.: Изд-во ООО “ВВМ”, 2005. 450 с.
- Урбанавичюс Г.П.* Список лишенофлоры России. СПб.: Наука, 2010. 194 с.
- Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- Черненко Т.В., Басова Е.В., Бочарев Ю.Н., Пузаченко М.Ю.* Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината “Североникель” // Лесоведение. 2009. № 6. С. 32–45.
- Черненко Т.В., Кабиров Р.Р., Басова Е.В.* Восстановительные сукцессии северо-таежных ельников при снижении аэротехногенной нагрузки // Лесоведение. 2011. № 6. С. 49–66.
- Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Баккал И.Ю.* Экологический мониторинг лесных экосистем Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Региональная экология. 2011. № 1–2(31). С. 21–30.
- Adamska E., Deptula M.* Epigeic lichens of different development stages of forest growing on the heathland // Ecological Questions. 2015. V. 21. P. 39–44.
- Beatty C.R., Cox N.A., Kuzee M.E.* Biodiversity guidelines for forest landscape restoration opportunities assessments. Gland, Switzerland: Published by IUCN, 2018. 43 p.
- Beckett P.J.* Lichens: Sensitive Indicators of Improving Air Quality // Restoration and recovery of an industrial region / Ed. J.M. Gunn. New York: Springer, 1995. P. 81–91.
- Bell J.N.B.* The effect of prolonged low concentration of sulphur dioxide on the growth of two moss species // J. Bryology. 1973. V. 7. P. 444–445.
- Gunn J., Keller W., Negusanti J., Potvin R., Beckett P., Winterhalder K.* Ecosystem Recovery after Emission Reduction: Sudbury, Canada // Water, Air & Soil Pollution 1995. V. 85. P. 1783–1788.
- Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baishveva E.Z., Bardunov L.V., Baryakina E.A., Belkina O.A., Bezgodov A.G., Boychuk M.A., Cherdantseva V.Ya., Czernyadjeva I.V., Doroshina G.Ya., Dyachenko A.P., Fedosov V.E., Goldberg I.L., Ivanova E.I., Junkoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S.G., Kharzinov Z.Kh., Kurbatova L.E., Maksimov A.I., Mamatkulov U.K., Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Omyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N.,*

- Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I. Check-list of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. 2006. V. 15. P. 1–130.
- Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens* / Eds. Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 408 p.
- Nash III T.H., Nash E.H. Sensitivity of mosses to sulfur dioxide // *Oecologia*. 1974. Bd. 17. № 3. S. 257–263.
- Pressey R.L., Cabeza M., Watts M.E., Cowling R.M., Wilson K.A. Conservation planning in a changing world // *Trends in Ecology & Evolution*. 2007. V. 22. P. 583–592.
- Purvis O.W., Halls C. A review of lichens in metal-enriched environments // *Lichenologist*. 1996. V. 28. P. 571–601.
- Purvis O.W., James P.W. Lichens of the Coniston copper mines // *Lichenologist*. 1985. V. 17. P. 221–237.
- Schram L.J., Wagner C., McMullin R.T., Anand M. Lichen communities along a pollution gradient 40 years after de-commissioning of a Cu–Ni smelter // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. № 12. P. 9323–9331.
- Söderström L., Hagborg A., von Konrat M., Bartholomew-Began S., Bell D., Briscoe L., Brown E., Cargill D.C., Costa D.P., Crandall-Stotler B.J., Cooper E.D., Dauphin G., Engel J.J., Feldberg K., Glenn D., Gradstein S.R., He X., Heinrichs J., Hentschel J., Ilkiu-Borges A.L., Katagiri T., Konstantinova N.A., Larrain J., Long D.G., Nebel M., Pócs T., Felisa Puche F., Reiner-Drehwald E., Renner M.A.M., Sass-Gyarmati A., Schäfer-Verwimp A., Moragues J.G.S., Stotler R.E., Sukkharak P., Thiers B.M., Uribe J., Váňa J., Villarreal J.C., Wigginton M., Zhang L., Zhu R.-L. World checklist of hornworts and liverworts // *PhytoKeys*. 2016. V. 59. P. 1–828.
- Stapper N.J., Kricke R. Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorttrophierung und verkehrsbedingten Immissionen // *Limprichtia*. 2004. V. 24. P. 187–208.
- Taoda H. Mapping of atmospheric pollution in Tokyo based upon epiphytic bryophytes // *Japanese Journal of Ecology*. 1972. V. 22. P. 125–133.
- Tyler G. Bryophytes and heavy metals: a literature review // *Botanical Journal of the Linnean Society*. 1990. V. 104. P. 231–253.
- Wirth V., Hauck M., Schultz M. Die Flechten Deutschlands. 2 Bände. Stuttgart: Ulmer Eugen, 2013. 1244 s.
- Young T.P. Restoration Ecology and Conservation Biology // *Biological Conservation*. 2000. V. 92. P. 73–83.

## Cryptogamic Organisms as Pioneers of the Northern Taiga Recovery Affected under the Conditions of Lowered Industrial Air Pollution

G. P. Urbanavichus<sup>1, \*</sup>, E. A. Borovichev<sup>1</sup>, and V. V. Ershov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre RAS, Akademgorodok, 14a, Apatity, Murmansk Region, 184209 Russia*

\*E-mail: g.urban@mail.ru

The restoration process of the ground vegetation cover in the areas affected by the Severonikel Smelter in Monchegorsk, Murmansk Region is studied. Cryptogamic organisms are the first to colonize areas where the ground vegetation cover was destroyed as a result of industrial air pollution above the critical level. For the first time, lichen and bryophyte species with the highest tolerance to toxicity and capable of growing in the conditions of an anthropogenic desert have been determined. These are liverworts *Isopaches birenatus*, *Nardia geosecyphus*, *Gymnocolea inflata*, *Solenostoma confertissimum* and mosses *Pohlia nutans* and *Dicranella cer-viculata*. It was found that colonization by pioneer lichen species, even those highly adapted to extreme concentrations of heavy metals (*Stereocaulon leucophaeopsis* and *St. pileatum*), requires a bryophyte sod layer as a substrate. In total, within the area directly affected by the copper and nickel smelter (1.7–10 km), 18 bryophyte species and 13 lichen species were found: in the anthropogenic desert (1.7–2.7 km), six and one species; in the anthropogenic wasteland (4–6.5 km), ten and five species; in the anthropogenic sparse woodland (7–10 km), 15 and 11 species, respectively. Signs of ground cover recovery and a noticeable (by a factor of 2 to 3) increase in the diversity of the ground layer cryptogamic biota were observed at a distance of 6.5–10 km from the pollution source with a decrease in the deposition of sulfates by a factor of 2.5–3, of Ni by a factor of 17, and of Cu by a factor of 20.

**Keywords:** Subarctic, northern taiga forests, pollution, biodiversity, recovery, lichens, bryophytes.

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Kola Science Centre of RAS (No AAAA-A18-118021490070-5). The work of V. V. Ershov was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research No. 18-35-00170 мол\_a.

### REFERENCES

- Adamska E., Deptula M., Epigeic lichens of different development stages of forest growing on the heathland, *Ecological Questions*, 2015, Vol. 21, pp. 39–44.
- Andreeva E.N., Vliyaniye atmosfernogo zagryazneniya na mokhovoy pokrov severo-tayezhnykh lesov (Impact of atmospheric pollution on the bryophytes cover of north-taiga forests), In: *Lesnyye ekosistemy i atmosfernoye zagryazneniye* (Forest ecosystems and atmospheric pollution), Leningrad: Botanicheskii institut im. V.L. Komarova, 1990, pp. 159–172.
- Andreeva E.N., Struktura mokhovogo pokrova v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya (The structure of bryophytes cover under atmospheric pollution), In: *Problemy ekologii ras-*

- titel'nykh soobshchestv Severa* (Problems of vegetation ecology of the North), Saint-Petersburg: Izd-vo OOO "VVM", 2005. pp. 105–129.
- Beatty C.R., Cox N.A., Kuzee M.E., *Biodiversity guidelines for forest landscape restoration opportunities assessments*, Gland, Switzerland: Published by IUCN, 2018, 43 p.
- Beckett P.J., Lichens: Sensitive Indicators of Improving Air Quality, In: *Restoration and recovery of an industrial region*, New York: Springer, 1995, pp. 81–91.
- Bell J.N.B., The effect of prolonged low concentration of sulphur dioxide on the growth of two moss species, *J. Bryology*, 1973, Vol. 7, pp. 444–445.
- Byazrov L.G., *Lishainiki v ekologicheskom monitoringe* (Lichens in ecological monitoring), M.: Scientific world, 2002, 336 p.
- Cherepanov S.K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* (Vascular plants of Russia and adjacent states (within the former USSR), Saint-Petersburg: Mir i Semya, 1995. 992 p.
- Chernen'kova T.V., Basova E.V., Bocharov Yu.N., Puzachenko M.Yu., Otsenka bioraznoobraziya lesov v zone vliyaniya gorno-metallurgicheskogo kombinata "Severonikel'" (Assessment of forest biodiversity in the zone exposed to the influence of the mining integrated plant "Severonikel'"), *Lesovedenie*, 2009, No. 6, pp. 32–45.
- Chernen'kova T.V., Kabirov R.R., Basova E.V., Vosstanovitel'nye suksessii severotaezhnykh el'nikov pri snizhenii aerotekhnogennoi nagruzki (Regeneration successions of northern taiga spruce forests under reduction of aerotechnogenic impact), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 49–66.
- Ganicheva S.N., Lukina N.V., Kostina V.A., Nikonov V.V., Tekhnogennaya digressiya i vosstanovitel'naya suksessiya v khvoynykh lesakh Kol'skogo poluostrova (Technogenous digression and restorative succession in the coniferous forests of the Kola Peninsula), *Lesovedenie*, 2004, No. 3, pp. 57–67.
- Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu., Osobennosti poslepozharnoi vosstanovitel'noi dinamiki soobshchestv s dominirovaniem lishainikov (Features of postfire recovery dynamics of communities with domination of lichens), *Izvestiya Samarskogo NTs RAN*, 2012, Vol. 14, No. 1(5), pp. 1223–1227.
- Gunn J., Keller W., Negusanti J., Potvin R., Beckett P., Winterhalder K., *Ecosystem Recovery after Emission Reduction*: Sudbury, Canada, *Water, Air & Soil Pollution*, 1995, Vol. 85, pp. 1783–1788.
- Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baisheva E.Z., Bardunov L.V., Baryakina E.A., Belkina O.A., Bezgodov A.G., Boychuk M.A., Cherdantseva V.Ya., Czernyadjeva I.V., Doroshina G.Ya., Dyachenko A.P., Fedosov V.E., Goldberg I.L., Ivanova E.I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S.G., Kharzinov Z.Kh., Kurbatova L.E., Maksimov A.I., Mamatkulov U.K., Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Otnyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N., Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I., Check-list of mosses of East Europe and North Asia, *Arctoa*, 2006, Vol. 15, pp. 1–130.
- Isaeva L.G., Lukina N.V., Belova E.A., Opyt vosstanovleniya rastitel'nosti na tekhnogennykh pustoshakh vokrug kombinata "Severonikel'": metody, sravnitel'nyi analiz (Experience of vegetation rehabilitation in man-induced waste-land around "Severonikel'" smelter: methods, comparative analysis), *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya* (Ecological problems of northern regions and ways for their solutions), Proc. 3rd All-Russian scientific conf. with foreign participants, Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2010, Part 2, pp. 28–33.
- Isaeva L.G., Lukina N.V., Gorbacheva T.T., Belova E.A., Remediatsiya narushennykh territorii v zone vliyaniya medno-nikelevogo proizvodstva (Remediation of disturbed territories in the copper-nickel industry impact area), *Tsvetnye metally*, 2011, No. 11, pp. 66–70.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., *Pitatel'nyi rezhim lesov severnoi taigi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* (Nutrient status of north taiga forests: natural regularities and pollution-induced changes), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1998, 316 p.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., Optimizatsiya pitatel'nogo rezhima pochv kak faktor vosstanovleniya narushennykh lesnykh ekosistem Severa (Optimization of soil nutrient regime as a factor in the restoration of disturbed forest ecosystems of the North), *Lesovedenie*, 1999, No. 2, pp. 57–67.
- Lukina N.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G., *Tekhnogennye digressii i vosstanovitel'nye suksessii v severotaezhnykh lesakh* (Pollution-induced digressions and rehabilitation successions in northern taiga forests), M.: Nauka, 2005, 244 p.
- Lyanguzova I.V., Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu., Bondarenko M.S., Vozdeistvie pochvennogo zagryazneniya tyazhelymi metallami na napochvennyi pokrov sosnyaka lishainiko-vo-zelenomoshnogo v usloviyakh polevogo eksperimenta (Influence of soil pollution (heavy metals) on the lichen pine forest soil cover in conditions of field experiment), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2015, No. 3 (27), pp. 74–86.
- Mikhailova I.N., Nachal'nye etapy vosstanovleniya soobshchestv epifitnykh lishainikov posle snizheniya vybrosov medeplavil'nogo zavoda (Initial stages of recovery of epiphytic lichen communities after reduction of emissions from a copper smelter), *Russian J. Ecology*, 2017, No. 4, pp. 277–281.
- Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*, Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 2002, 408 p.
- Nash III T.H., Nash E.H., Sensitivity of mosses to sulfur dioxide, *Oecologia*, 1974, Bd. 17, No. 3, pp. 257–263.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Isaeva L.G., Gorbacheva T.T., Belova E.A., Vosstanovlenie territorii, narushennykh vozdushnym zagryazneniem medno-nikelevogo proizvodstva na Kol'skom poluostrove (Restoration of areas disturbed by air pollution of copper-nickel production on the Kola Peninsula), In: *Innovatsionnyi potentsial Kol'skoi nauki* (Innovative potential of Kola science), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2005, pp. 288–293 (327 p.).
- Pressey R.L., Cabeza M., Watts M.E., Cowling R.M., Wilson K.A., Conservation planning in a changing world, *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, Vol. 22, pp. 583–592. DOI 10.1016/j.tree.2007.10.001
- Problemy ekologii rastitel'nykh soobshchestv Severa* (Problems of vegetation ecology of the North), Saint-Petersburg: Izd-vo OOO "VVM", 2005, 450 p.
- Purvis O.W., Halls C., A review of lichens in metal-enriched environments, *Lichenologist*, 1996, Vol. 28, pp. 571–601.
- Purvis O.W., James P.W., Lichens of the Coniston copper mines, *Lichenologist*, 1985, Vol. 17, pp. 221–237.

- Schram L.J., Wagner C., McMullin R.T., Anand M., Lichen communities along a pollution gradient 40 years after decommissioning of a Cu–Ni smelter, *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, Vol. 22, No. 12, pp. 9323–9331.
- Söderström L., Hagborg A., von Konrat M., Bartholomew-Began S., Bell D., Briscoe L., Brown E., Cargill D.C., Costa D.P., Crandall-Stotler B.J., Cooper E.D., Dauphin G., Engel J.J., Feldberg K., Glenn D., Gradstein S.R., He X., Heinrichs J., Hentschel J., Ilkiu-Borges A.L., Katagiri T., Konstantinova N.A., Larraín J., Long D.G., Nebel M., Pócs T., Felisa Puche F., Reiner-Drehwald E., Renner M.A.M., Sass-Gyarmati A., Schäfer-Verwimp A., Moragues J.G.S., Stotler R.E., Sukkharak P., Thiers B.M., Uribe J., Váňa J., Villarreal J.C., Wigginton M., Zhang L., Zhu R.-L., World checklist of hornworts and liverworts, *PhytoKeys*, 2016, Vol. 59, pp. 1–828.
- Stapper N.J., Kricke R., Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorttrophierung und verkehrsbedingten Immissionen, *Limprichtia*, 2004, Vol. 24, pp. 187–208.
- Taoda H., Mapping of atmospheric pollution in Tokyo based upon epiphytic bryophytes, *Japanese J. Ecology*, 1972, Vol. 22, pp. 125–133.
- Tyler G., Bryophytes and heavy metals: a literature review, *Botanical J. Linnean Society*, 1990, Vol. 104, pp. 231–253.
- Urbanavichus G.P., *A checklist of the lichen flora of Russia*, Saint-Petersburg: Nauka, 2010, 194 p.
- Vliyanie promyshlennogo atmosfernogo zagryazneniya na sosnovye lesa Kol'skogo poluostrova* (Influence of industrial atmospheric pollution on pine forests of the Kola Peninsula), Leningrad: Botanicheskii institut im. V.L. Komarova, 1990, 195 p.
- Wirth V., Hauck M., Schultz M., *Die Flechten Deutschlands*, Stuttgart: Ulmer Eugen, 2013, 1244 s.
- Yarmishko V.T., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Bakkal I.Yu., Ekologicheskij monitoring lesnyh jekosistem Kol'skogo poluostrova v uslovijah ajerotehnogenogo zagrjaznenija (Ecological monitoring of forest ecosystems of the Kola Peninsula under conditions of aerotechnogenic pollution), *Regional'naya ekologiya*, 2011, No. 1–2 (31), pp. 21–30.
- Young T.P., Restoration Ecology and Conservation Biology, *Biological Conservation*, 2000, Vol. 92, pp. 73–83.

УДК 630\*851:630\*812

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В ЛЕСНЫХ КУЛЬТУРАХ РАЗНЫХ УСЛОВИЙ МЕСТОПРОИЗРАСТАНИЯ

© 2021 г. В. И. Мелехов<sup>а, \*</sup>, Н. А. Бабич<sup>а</sup>, С. А. Корчагов<sup>б, \*\*</sup>, Р. В. Шекалев<sup>с, \*\*\*</sup>

<sup>а</sup>САФУ им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 Россия

<sup>б</sup>ВГМХА им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, 2, с. Молочное, Вологда, 160555 Россия

<sup>с</sup>ФБУ ВНИИЛМ, Институтская ул., 15, Пушкино, Московская обл., 141202 Россия

\*E-mail: forest@narfu.ru

\*\*E-mail: kors45@ayndex.ru

\*\*\*E-mail: schekalevrv@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.10.2018 г.

После доработки 15.06.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Учитывая современные требования, предъявляемые потребителями к древесному сырью для лесопильного и целлюлозно-бумажного производства, обоснована актуальная номенклатура показателей качества древесины пиловочных бревен и балансов, дана их классификация с учетом степени весомости. Предложены методика комплексной оценки качества древесины в процессе лесовыращивания и критерии оценки качественной продуктивности насаждений на основе комплексного показателя, рассчитаны комплексные показатели качества древесины и определена качественная продуктивность насаждений с учетом типов леса. Классификация показателей качества древесины в рамках обоснованной номенклатуры позволяет объективно судить о степени их значимости (весомости) при качественной оценке хвойных пиловочных бревен и балансов. Расчет комплексного показателя на основе предложенного методического подхода дает возможность оценивать качественную продуктивность насаждений и своевременно принимать управленческие решения по ее повышению. Рассчитаны комплексные показатели качества древесины и определена качественная продуктивность сосны обыкновенной в лесных культурах с учетом типов леса. В посадках сосны кисличного и черничного типов леса южной подзоны тайги формируются насаждения высокой качественной продуктивности по хвойному пиловочному сырью и балансам. В соответствии с этим, в указанных лесорастительных условиях рекомендовано ориентировать процесс целевого выращивания высококачественной древесины на эти виды сортиментов. В условиях брусничного типа леса насаждения соответствуют высокому уровню качества по балансам и среднему уровню по пиловочным бревнам, в лишайниковом типе леса – среднему и низкому уровню качества соответственно. Условия брусничного и лишайникового типов рекомендованы для целевого выращивания балансовой древесины сосны высокого качества (Корчагов, 2010). В посевах черничного и брусничного типов леса северной подзоны тайги насаждения сосны соответствуют высокому уровню качества по балансам, среднему уровню – по пиловочным бревнам. В таких лесорастительных условиях процесс лесовыращивания целесообразно ориентировать на получение высококачественных балансов, не исключая целевое выращивание пиловочника. В силу предельно низкого значения комплексного показателя по пиловочнику в лишайниковом типе леса рекомендуется использовать такие лесорастительные условия для целевого выращивания балансов.

*Ключевые слова:* качество, древесина, комплексная оценка, качественная продуктивность, лесовыращивание, пиловочное сырье, балансы, лесные культуры.

DOI: 10.31857/S0024114821020054

В структуре экономики северо-запада России производство лесоматериалов занимает ведущее место по объемам внутреннего валового продукта и экспорта. Основной составляющей их конкурентоспособности является высокое качество. Отсутствие стабильного качества лесоматериалов, отвечающего требованиям потребителей, не позволяет рационально интегрировать национальную экономику в мировое пространство и за-

нять в нем достойное место. В связи с этим внедрение современной концепции управления качеством древесного сырья носит приоритетный характер.

В настоящее время в России отсутствует научно-обоснованная система управления качеством и контроля качества древесного сырья в процессе его воспроизводства. Качество древесины оценивается преимущественно на этапе лесосечных ра-

бот и первичной переработки, где лесоматериалы классифицируются по внешним признакам в соответствии с нормами, регламентированными стандартами. Определение качества выращиваемой древесины ассоциируется с изучением товарной структуры древостоев. Такой подход основан на разделении запаса по назначению, категориям крупности и сортам, преимущественно с использованием товарно-сортиментных таблиц, что не позволяет в полной мере оценивать качественное состояние формирующейся древесины. Возникла необходимость разработки системы формирования и оценки качества древесного сырья в процессе лесовыращивания. Без этого в строгом смысле нельзя говорить о целевом лесовыращивании (Корчагов, 2010). В этом случае правомерно применение понятия “качественной продуктивности” деревьев и древостоев в целом (Чиби-сов, 1992).

Цель работы заключалась в разработке и апробации методики комплексной оценки качества древесины сосны в процессе ее выращивания. Сложившаяся мировая тенденция в лесной промышленности в 80-х годах была ориентирована на производство пиловочных бревен (пиловочник) и балансов. В настоящее время эти виды сортиментов продолжают занимать ведущее место на рынке лесоматериалов, что предопределило их приоритетное рассмотрение при планировании эксперимента и выполнении исследований.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Проведенный нами анализ современных требований, основанный на изучении специальной справочно-нормативной литературы, а также материалах анкетного опроса 45 экспертов соответствующей квалификации из числа представителей лесоперерабатывающих предприятий и научного сообщества, позволил определить актуальную номенклатуру и степень весомости (значимости) показателей качества хвойного пиловочника и балансов (табл. 1).

Определение степени весомости базировалось на использовании метода рангов. На основании результатов ранжирования  $k$ -м экспертом рассчитывались коэффициенты весомости  $a$  каждого  $i$ -го показателя качества по формуле:

$$a_i = \frac{M_{ik}}{\sum_{i=1}^n M_{ik}},$$

где:

$M_{ik}$  – номер  $i$ -й весомости показателя качества, определенный  $k$ -экспертом;

$n$  – число учитываемых показателей качества.

**Таблица 1.** Номенклатура и коэффициенты весомости показателей качества хвойного пиловочника и балансов

Показатель качества	Коэффициенты весомости, $a_i$ ,	
	пиловочник	баланси
Размеры древесного сырья	0.083	0.051
Толщина сучков	0.055	0.069
Число сучков на 1 пог. м. ствола	0.044	0.070
Протяженность бессучковой зоны	0.038	0.085
Плотность древесины	0.047	0.125
Обугленность	–	0.165
Гнили	0.097	0.180
Кривизна	0.087	0.107
Рак	0.086	0.148
Трещины	0.075	–
Сбежистость	0.052	–
Закомелистость	0.052	–
Прорость	0.065	–
Червоточина	0.085	–
Сухобокость	0.074	–
Механические повреждения	0.060	–

Примечание: “–” – не актуальны для балансов.

Расчет параметров весомости показателей качества по данным всех участвующих в работе экспертов ( $N$ , чел.) производился как:

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^N a_{ik}}{N}.$$

Оценка согласованности мнений экспертов по степени весомости показателей произведена на основании расчета коэффициента конкордации (согласия):

$$\omega = \frac{12C}{K^2(H^3 - H)},$$

где:

$C$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов по каждому объекту от средней суммы рангов по всем объектам и экспертам;

$K$  – количество привлеченных экспертов;

$H$  – количество ранжируемых показателей.

Расчитанные коэффициенты конкордации составили 0.795 – по балансам и 0.623 – по пиловочнику, что позволяет считать данные согласованными ( $\omega \geq 0.5$ ) по существующей классифика-

**Таблица 2.** Критерии оценки качественной продуктивности насаждений на основе комплексного показателя качества древесины

Качественная продуктивность насаждения	Комплексный показатель качества, $K_q$
Высокая	0.951–1.000
Средняя	0.851–0.950
Низкая	0.750–0.850

ции (Мишин, 2007). Критерий Пирсона ( $\chi^2_{расч}$ ), оценивающий надежность коэффициента конкордации, составил соответственно 57.2 и 63.4, что превышает табличные значения ( $\chi^2_{табл}$  составляют 17.0 и 30.5) и позволяет окончательно признать мнения экспертов согласованными с вероятностью 0.995.

Результаты экспертного ранжирования указывают на различия в степени весомости показателей качества древесины, что послужило основанием для их классификации (рис. 1). К числу основных (критических) отнесены показатели, наличие которых или их отклонение от стандартизированных норм исключает возможность использования древесного сырья в качестве пиловочника и балансов. В группу дополнительных показателей включены характеристики древесины, роль которых при оценке качества менее значительна.

Полученные результаты показывают, что наиболее весомым показателем качества пиловочника и балансов следует считать наличие гнили. Важную составляющую качества пиловочника также будет иметь кривизна стволов, для балансов – обугленность.

Необходимо отметить существенную значимость плотности древесины для балансов, что подчеркивает необходимость ее учета при качественной оценке и позволяет отнести к числу основных показателей. Этот факт убедительно характеризуют выполненные расчеты. Так, например, при прочих равных условиях для производства 1 тонны сульфатной целлюлозы из древесины сосны с базисной плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> требуется 5.2 м<sup>3</sup> сырья, в то время как при плотности древесины 350 кг/м<sup>3</sup> потребность достигает 6.0 м<sup>3</sup>.

Как показывает наш опыт (Мелехов и др., 2003, 2005), определение отдельно взятых показателей качества не всегда позволяет объективно судить о качественном состоянии древесины в целом. Наиболее эффективным является метод комплексной оценки, применение которого дает возможность оценить качество древесины одним показателем с учетом представленных номенклатурных характеристик и их весомости.

Квалиметрия рассматривает комплексную оценку как метод определения уровня качества продукции или услуг, раскрывает методологические подходы к ее проведению. Применительно к древесному сырью метод комплексной оценки качества ранее был использован О.И. Полубояриновым (1976). Автором предложено производить комплексную оценку качества пиловочника и балансов по пяти показателям: средний диаметр древостоя, средняя протяженность бессучковой зоны, процент выхода здоровой (без гнили) древесины, процент прямоствольных деревьев, плотность древесины. Такой подход, несомненно, заслуживает внимания, полученные автором выводы учтены нами при планировании и проведении эксперимента.

Комплексный показатель качества рассчитывался как средневзвешенный геометрический:

$$K_q = \prod_{i=1}^n \left( \frac{K_i}{K_{баз}} \right)^{\text{sign} \Delta K_i a_i},$$

где  $K_q$  – комплексный показатель качества;

$K_i$  – величина  $i$ -того показателя;

$K_{баз}$  – величина базового показателя качества (в качестве базовых приняты оптимальные значения показателей из полученных в опытах);

$a_i$  – коэффициент  $i$ -го показателя качества.

Отношение величины  $i$ -того ( $K_i$ ) и базового показателя ( $K_{баз}$ ) представляет собой относительный показатель качества ( $K_{отн}$ ):

$$K_{отн.} = \left( \frac{K_i}{K_{баз}} \right)^{\text{sign} \Delta K_i}.$$

Сигнум-функция от  $\Delta K_i$  принималась:

$\text{sign} \Delta K_i = +1$  при  $\Delta K_i = K_{i \text{ лучшее}} - K_{i \text{ худшее}} > 0$  (для позитивных показателей);

$\text{sign} \Delta K_i = -1$  при  $\Delta K_i = K_{i \text{ лучшее}} - K_{i \text{ худшее}} < 0$  (для негативных показателей).

На основании анализа полученных в ходе исследований значений комплексных показателей качества нами предложены следующие критерии оценки качественной продуктивности насаждений (табл. 2).

Апробация предложенной методики выполнена нами на примере древесины сосны, выращиваемой в лесных культурах в различных подзонах тайги (Шенников, 1933) и типах леса (Сукачев, 1934). Исследования проведены в средневозрастных посадках (южная подзона тайги, Вологодская область) и посевах (северная подзона тайги, Архангельская область) сосны обыкновенной.

Процедура комплексной оценки выращиваемого древесного сырья включала определение основных и дополнительных показателей качества и предусматривала последовательно выполняе-

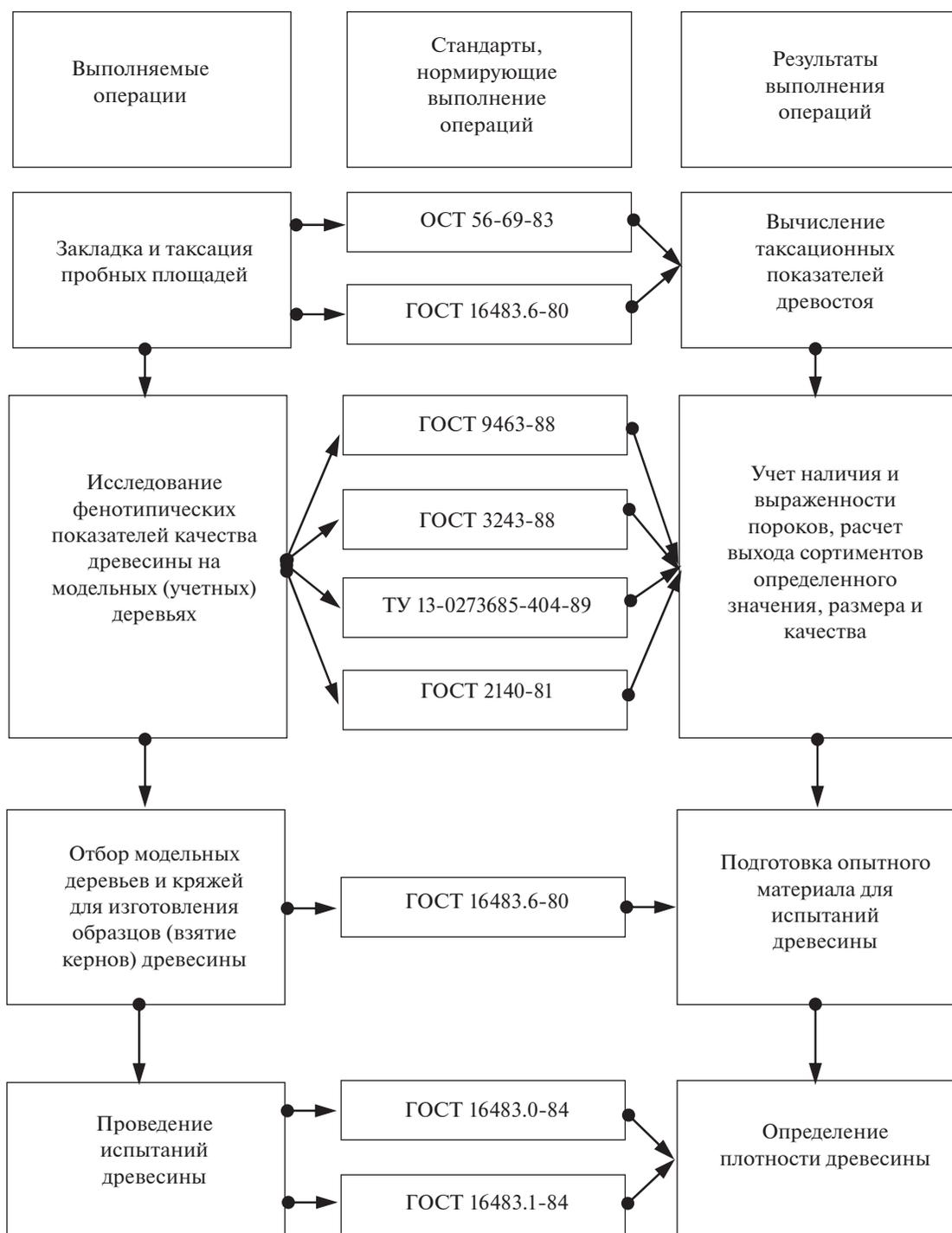
Качество пиловочника		Качество балансов	
Основные (критические показатели)	Дополнительные показатели	Основные (критические показатели)	Дополнительные показатели
Гниль	Сбежистость	Гниль	Протяженность бессучковой зоны свола
Кривизна			
Рак			
Червоточина	Закомелистость	Обугленность	Число сучков на 1 пог. м.
Размеры древесного сырья			
Трещины	Плотность древесины	Рак	Толщина сучьев
Сухобокость			
Прирост	Число сучков на 1 пог. м.	Плотность древесины	Размеры древесного сырья
Механические повреждения			
Толщина сучков	Протяженность бессучковой зоны свола	Кривизна	

Рис. 1. Классификация показателей качества хвойного пиловочника и балансов на основе степени их весомости.

мые операции по закладке и таксации пробных площадей, исследованию фенотипических показателей качества древесных стволов, отбору опытного материала и проведению лабораторных испытаний древесины. Выполнение этих операций неразрыв-

но связано с соблюдением положений стандартов (рис. 2).

При закладке, таксации пробных площадей и расчетах таксационных показателей древостоев,



**Рис. 2.** Методологическая структура проведения комплексной оценки качества древесины на стандартизированной основе.

наряду с требованиями стандартов, руководствовались методическими положениями, изложенными Н.П. Анучиным (1982) и др. авторами, нормативно-справочными материалами (Полевой справочник ..., 1971; Лесотаксационный справочник ..., 1986) и др.

Методологической основой при отборе модельных деревьев, кряжей, изготовлении образцов (отборе кернов) и проведении испытаний древесины служили труды О.И. Полубояринова (1976), Б.Н. Уголева (2007), В.Н. Волынского (2000) и др. Образцы отбирались с привязкой к

Таблица 3. Средний выход деловых сортиментов в культурах сосны по типам леса, %\*

Тип леса	Деловая древесина						Класс товарности древостоя
	крупная	средняя	мелкая	пиловочник	балансы	итого	
Сосняк кисличный	— 1	— 65	— 23	— 67	— 22	— 89	I
Сосняк черничный	— 4	47 65	40 17	45 68	42 18	87 86	I
Сосняк брусничный	— —	20 20	65 61	19 18	66 63	85 81	I
Сосняк лишайниковый	— —	5 16	74 58	1 12	78 62	79 74	II

Примечание: в числителе — для посевов, в знаменателе — для посадок сосны, “—” — нет данных.

высоте ствола 1.3 м, с обязательным учетом стонрон света и этапов формирования древесины.

В основу обработки экспериментальных данных положены статистические методы, изложенные в трудах М.Л. Дворецкого (1971), И.И. Гусева (2002) и др.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании определения качественно-размерных характеристик древесных стволов для культур сосны составлены товарно-сортиментные таблицы на лесотипологической основе. Результаты исследований свидетельствуют об увеличении выхода деловой древесины при улучшении условий местопроизрастаний (табл. 3).

Сосняки зеленомошной группы типов леса (сосняк кисличный, черничный, брусничный) характеризуются I, сосняки лишайниковые — II классом товарности. Зависимость между выходом деловой древесины и диаметром ствола на высоте 1.3 м аппроксимируется уравнением показательной кривой при высокой степени корреляции ( $\eta = 0.910-0.990$ ).

Доля пиловочника в посадках кисличного и черничного типов леса достигает 67–68%, снижаясь в сосняках брусничных и лишайниковых до 18 и 12%, соответственно. Уменьшение выхода пиловочника при ухудшении условий местопроизрастания также отмечено в посевах сосны. Этот факт свидетельствует о целесообразности ориентации целевого выращивания в кислично-черничных типах леса на пиловочное сырье.

Основным сортообразующим пороком древесины на данной стадии онтоценогенеза древостоя являются здоровые сучки. Для культур всех типов леса отмечается положительная связь среднего диаметра сучков с таксационным диаметром ствола ( $r = 0.572-0.690$ ) и его высотой ( $\eta = 0.930-0.990$ ). Наличием относительно крупных стволов с толстыми сучками объясняется преимущество

по среднему диаметру у основания сучков в высокопродуктивных типах леса (табл. 4).

С учетом допусков по максимальным значениям диаметров здоровых сучков для лесоматериалов различной крупности (по ГОСТ 9463-88) в культурах сосны сформировались сортименты I и II сорта. Для культур сосны всех типов леса выявлена тесная прямая связь между максимальным диаметром сучков и таксационным диаметром ствола ( $r = 0.811-0.965$ ).

Отмечается формирование большего числа сучков на 1 пог. м. ствола в сосняках лишайниковых в сравнении с сосняками зеленомошной группы, как в посевах, так и в посадках. Связь таксационного диаметра ствола и средней численности сучков на 1 пог. м. в рассмотренных типах леса слабая ( $\eta < 0.5$ ), но, тем не менее, отражает обратную зависимость между показателями. Зависимость между численностью сучков и высотой ствола аппроксимируется уравнением параболы третьего порядка при высокой корреляции ( $\eta = 0.900-0.990$ ).

Выявлено достоверное преимущество по средней протяженности бессучковой зоны стволов сосны всех типов леса зеленомошной группы над сосняками лишайниковыми в посадках ( $t_{\text{факт}} \geq 2.1$  при  $t_{0.05} = 2.0$ ) и посевах ( $t_{\text{факт}} \geq 3.4$  при  $t_{0.01} = 2.7$ ). Таксационный диаметр ствола не оказывает существенного влияния на протяженность бессучковой зоны, для культивируемой сосны характерна слабая связь между показателями ( $\eta = 0.10-0.40$ ).

Закомелстость стволов сосны в рассмотренных типах леса составляет в среднем 1.2–1.3. Различия между средними значениями показателя по типам леса не являются достоверными ( $t_{\text{факт}} \leq 1.1$  при  $t_{0.05} = 2.0$ ), однако наметилось некоторое его увеличение при ухудшении условий местопроизрастания. Связь между таксационным диаметром ствола и величиной закомелстости в культурах слабая ( $\eta$  составляет от 0.013 до 0.08).

**Таблица 4.** Параметры сучковатости стволов и плотность древесины сосны в культурах по типам леса\*

Тип леса	Диаметр у основания сучков, см		Число сучков на 1 п./м, шт.	Протяженность бессучковой зоны, м	Плотность при влажности 12%, г/см <sup>3</sup>
	средний	максимальный			
Сосняк кисличный	— 2.1 ± 0.03	— 5.3	— 0.80 ± 0.15	— 0.80 ± 0.15	— 0.445 ± 0.069
Сосняк черничный	1.2 ± 0.03 2.2 ± 0.04	3.8 4.4	0.77 ± 0.06 0.87 ± 0.10	0.77 ± 0.06 0.87 ± 0.10	0.510 ± 0.010 0.483 ± 0.008
Сосняк брусничный	0.8 ± 0.02 2.0 ± 0.03	3.6 4.4	1.06 ± 0.12 0.66 ± 0.06	1.06 ± 0.12 0.66 ± 0.06	0.491 ± 0.020 0.445 ± 0.007
Сосняк лишайниковый	0.7 ± 0.02 1.8 ± 0.03	3.8 4.4	0.53 ± 0.03 0.50 ± 0.02	0.53 ± 0.03 0.50 ± 0.02	0.498 ± 0.020 0.444 ± 0.050

Примечание: В числителе – для посевов, в знаменателе – для посадок сосны, “—” – нет данных.

**Таблица 5.** Комплексные показатели качества древесины сосны в культурах по типам леса

Тип леса	Комплексный показатель качества древесины, $K_q$			
	посевы (северная подзона тайги)		посадки (южная подзона тайги)	
	пиловочник	балансы	пиловочник	балансы
Сосняк кисличный	—	—	0.980	0.970
Сосняк черничный	0.941	0.969	0.988	0.991
Сосняк брусничный	0.924	0.987	0.873	0.956
Сосняк лишайниковый	0.693	0.904	0.809	0.907

Примечание: “—” – нет данных.

Для стволов сосны в посадках зеленомошной группы типов леса характерен меньший средний сбеж деловой части (0.70–0.76 см/м), чем в сосняках лишайниковых (1.03 см/м), что подтверждается статистически ( $t_{\text{факт}} \geq 2.3$  при  $t_{0.05} = 2.0$ ). В посевах сосны различия между выборочными средними доказаны для брусничного и черничного типов леса ( $t_{\text{факт}} = 2.3$  при  $t_{0.05} = 2.0$ ) при абсолютном преимуществе в последнем случае (0.74 против 0.65 см/м).

Других пороков, снижающих качество пиловочника и балансов (гниль, кривизна, рак, червоточина, трещины, сухобокость, прорость, механические повреждения) на данной стадии развития древостоев, не обнаружено.

Значения плотности древесины сосны (табл. 4) указывают на некоторое преимущество показателя в черничном типе леса. Однако, достоверность различий между выборочными средними по типам леса не подтверждается статистически ( $t_{\text{факт}} = 0.01–0.9$  при  $t_{0.05} = 2.0$ ), за исключением сосны в посадках черничного и брусничного типов леса ( $t_{\text{факт}} = 3.5$  при  $t_{0.01} = 2.7$ ).

Расчет комплексных показателей качества пиловочника и балансов, произведенный по мето-

дике, изложенной выше, позволяет заключить об их преимуществе в посадках сосны кисличного и черничного типов леса ( $K_q = 0.970–0.991$ ), произрастающих в условиях южной подзоны тайги. В соответствии с предложенной классификацией насаждения характеризуются высокой качественной продуктивностью (табл. 5).

Высокие значения и относительное равенство комплексных показателей по пиловочнику и балансам позволяют ориентировать процесс целевого выращивания высококачественной древесины в указанных лесорастительных условиях на эти виды сортиментов. В брусничном типе леса насаждения соответствуют высокому уровню качества по балансам и среднему уровню по пиловочнику, в лишайниковом типе леса – среднему и низкому уровню качества соответственно. В связи с этим условия брусничного и лишайникового типов следует рекомендовать для целевого выращивания балансовой древесины сосны высокого качества.

В посевах черничного и брусничного типов леса северной подзоны тайги насаждения соответствуют высокому уровню качества по балансам, среднему уровню – по пиловочнику. Целесообразно ориентировать процесс выращивания в та-

ких лесорастительных условиях на получение высококачественных балансов, не исключая целевое выращивание пиловочника. В силу предельно низкого значения комплексного показателя по пиловочнику в лишайниковом типе леса ( $K_q = 0.693$ ) рекомендуется использовать такие лесорастительные условия для целевого выращивания балансов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение качества древесины является приоритетной задачей процесса воспроизводства древесных ресурсов. Ее научно-обоснованное и своевременное решение обеспечит конкурентоспособность отечественных лесоматериалов и позволит рационально интегрировать лесной сектор национальной экономики в мировое экономическое пространство.

Полученные в ходе исследования результаты, выводы и рекомендации, могут быть положены в основу разработки программ целевого выращивания насаждений высокой качественной продуктивности в условиях таежной зоны Европейской части России.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анучин Н.П. Лесная таксация: Учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.

Вольнский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех университета, 2000. 196 с.

ГОСТ 9463-88 Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1988. 13 с.

Гусев И.И. Моделирование экосистем: Учебное пособие. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех университета, 2002. 112 с.

Дворецкий М.Л. Практическое пособие по вариационной статистике. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 102 с.

Корчагов С.А. Повышение качественной продуктивности насаждений на лесоводственной основе. Автореф. дис. д-ра. с.-х. наук. (спец. 06.03.01, 06.03.02). Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех университета, 2010. 42 с.

Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР: нормативные материалы для Архангельской, Вологодской областей и Коми АССР. Архангельск: Правда Севера, 1986. 358 с.

Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех университета, 2003. 110 с.

Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качественные характеристики древесины сосны в культурах. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех университета, 2005. 142 с.

Мишин В.М. Управление качеством. М.: Изд-во: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 463 с.

Полевой справочник таксатора. Сев-Зап. кн. изд-во (Вологодское отд.), 1971. 196 с.

Полубояринов О.И. Квалиметрия древесного сырья в процессе лесовыращивания. Автореф. дис. д-ра. с.-х. наук. (спец. 06.03.03). Л.: Изд-во. Ленинградской лесотех. академии, 1976. 40 с.

Чибисов Г.А. Рубки ухода за лесом на Европейском Севере, лесоводственно-биологические свойства и зонально-типологические программы. Автореф. дис. д-ра. с.-х. наук. (спец. 06.03.03). СПб.: РИО СевНИИ лесного хозяйства, 1992. 41 с.

Сукачев В.Н. Что такое фитоценоз? Советская ботаника. 1934. № 5. С. 4–18.

Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Московский гос. университет леса, 2007. 351 с.

Шенников А.П. Геоботанические районы Северного края и их значение в развитии производительных сил // Мат. II конф. по изучению производительных сил Северного края. Архангельск: Северное краев. изд-во, 1933. Т. 2. С. 10–96.

## A Complex Assessment of the Pine Wood Quality in Forest Cultures under Different Growing Conditions

V. I. Melekhov<sup>1, \*</sup>, N. A. Babich<sup>1</sup>, S. A. Korchagov<sup>2, \*\*</sup>, and R. V. Shchekaley<sup>3, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Northern Arctic Federal University, Northern Dvina quay, 17, Arkhangelsk, 163002 Russia

<sup>2</sup>Vologda State Dairy Farming Academy, Shmidta st., 2, Molochnoe, Vologda, 160555 Russia

<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, Institutskaya st., 15, Pushkino, Moscow Oblast, 141202 Russia

\*E-mail: forest@narfu.ru

\*\*E-mail: kors45@ayndex.ru

\*\*\*E-mail: schekaleyrv@yandex.ru

Taking into account the modern requirements imposed by consumers on raw materials for sawmills and pulp and paper production, the current nomenclature of indicators of wood quality for sawlogs and pulpwood has been substantiated, and their classification is given taking into account the weight of each indicator. A methodology for a comprehensive assessment of the wood quality during the forest growing and criteria for assessing the qualitative productivity of plantations based on a complex indicator were proposed, complex indicators of wood quality were calculated and the qualitative productivity of plantations was determined, taking into account forest

types. The classification of wood quality indicators within the framework of a created nomenclature makes it possible to objectively judge the degree of their significance (weight) in the qualitative assessment of coniferous sawlogs and pulpwood. The calculation of a complex indicator based on the proposed methodological approach makes it possible to assess the qualitative productivity of plantations and make timely management decisions to improve it. Comprehensive indicators of wood quality were calculated and the qualitative productivity of Scots pine in forest cultures was determined, taking into account forest types. In the plantings of oxalis and blueberry pine forest types in the southern taiga subzone, stands were formed, possessing a high qualitative productivity of coniferous sawn timber and pulpwood. In accordance with this, in the specified forest conditions, it is recommended to orient the process of targeted cultivation of high-quality wood to these types of assortments. In the conditions of the lingonberry forest, the plantations correspond to a high quality level in terms of balance and an average level in terms of sawlogs, in a lichen forest type - to an average and low quality level, respectively. Lingonberry and lichen conditions are recommended for the targeted cultivation of high quality pine pulpwood (Korchagov, 2010). In the blueberry and lingonberry forest plantations in the northern subzone of the taiga, pine plantations possess a high level of quality in terms of pulpwood, and an average level in terms of sawlogs. In such forest growing conditions, it is advisable to focus the forest growing process on obtaining high-quality pulpwood, although not totally excluding the targeted cultivation of sawlogs. Due to the extremely low value of the integrated indicator for sawlogs in the lichen type of forest, it is recommended to use such forest growing conditions for the targeted cultivation of pulpwood.

*Keywords: quality, wood, complex assessment, qualitative productivity, forests growing, sawlogs, pulpwood, forest cultures.*

## REFERENCES

- Anuchin N.P., *Lesnaya taksatsiya* (Forest taxation), M.: Lesnaya promyshlennost', 1982, 552 p.
- Chibisov G.A., *Rubki ukhoda za lesom na Evropeiskom Severe, lesovodstvenno-biologicheskie svoistva i zonal'no-tipologicheskie programmy. Avtoref. diss. d-ra. s.-kh. nauk.* (Forest thinning in the European North, silvicultural and biological properties and zonal typological programs. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), St. Petersburg: RIO SevNII lesnogo khozyaistva, 1992, 41 p.
- Dvoretiskii M.L., *Posobie po variatsionnoi statistike (dlya lesokhozyaistvennikov)* (Manual on analysis of variance for foresters), M.: Lesnaya promyshlennost', 1971, 104 p. GOST 9463-88.
- Gusev I.I., *Modelirovanie ekosistem* (Ecosystem modeling), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2002, 112 p.
- Korchagov S.A., *Povyshenie kachestvennoi produktivnosti nasazhdenii na lesovodstvennoi osnove. Avtoref. diss. d-ra. s.-kh. nauk.* (Improving the quality productivity of forest plantations. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2010, 42 p.
- Lesotaksatsionnyi spravochnik dlya Severo-Vostoka evropeiskoi chasti SSSR (normativnye materialy dlya Arkhangel'skoi, Vologodskoi oblastei i Komi ASSR)* (Reference book on forest taxation for the northeast of the European part of the USSR (standard manual for Arkhangelsk, Vologda Oblasts and Komi ASSR)), Arkhangelsk: Izd-vo AILILKh, 1986, 358 p.
- Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A., *Kachestvennye kharakteristiki drevesiny sosny v kul'turakh* (Qualitative characteristics of pine wood in crops), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2005, 142 p.
- Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A., *Kachestvo drevesiny sosny v kul'turakh* (The quality of pine wood in crops), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2003, 110 p.
- Mishin V.M., *Upravlenie kachestvom* (Quality control), M.: Izd-vo YuNITI-DANA, 2007, 463 p.
- Polevoi spravochnik taksatora*, (Taxator Field Guide), Sev-Zap. kn. izd-vo (Vologodskoe otd.), 1971, 196 p.
- Poluboyarinov O.I., *Kvalimetriya drevesnogo syr'ya v protsesse lesovyrashchivaniya. Avtoref. diss. d-ra. s.-kh. nauk* (Qualimetry of wood raw materials in the process of forest growing. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Leningrad: Izd-vo. Leningradskoi lesotekh. akademii, 1976, 40 p.
- Shennikov A.P., *Geobotanicheskie raiony Severnogo kraia i ikh znachenie v razvitii proizvoditel'nykh sil* (Geobotanical regions of the Northern Territory and their importance in the development of productive forces), Proc. of II Conf. on the study of the productive forces of the Northern Territory, Arkhangelsk: Severnoe kraev. izd-vo, Vol. 2, pp. 10-96.
- Sukachev V.N., *Chto takoe fitotsenoz? (What is phytocenosis?)*, *Sovetskaya botanika*, 1934, No. 5, pp. 4-18.
- Ugolev B.N., *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie* (Wood science and forest commodity science), M.: GOU VPO MGUL, 2007, 351 p.
- Volynskii V.N., *Vzaimosvyaz' i izmenchivost' fiziko-mekhanicheskikh svoistv drevesiny* (Interrelation and variability of physical and mechanical properties of wood), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2000, 196 p.

УДК 630\*582.475:581.45:57.087(470.13)

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ХВОИ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ<sup>1</sup>

© 2021 г. С. И. Тарасов<sup>а</sup>, \*, Н. В. Герлинг<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, г. Сыктывкар, 167982 Россия

\*E-mail: tarasov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 26.11.2018 г.

После доработки 17.04.2019 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В настоящей работе представлены результаты исследования морфометрических особенностей хвои пихты сибирской, проведенного с целью разработки методики оценки площади поверхности листовой пластинки пихты. Актуальность данной темы связана с отсутствием исследований, посвященных именно методам определения площади поверхности хвои пихты сибирской. В ходе исследования получена соответствующая математическая модель. Показано, что в результате ряда геометрических преобразований площадь поверхности хвоинки может рассматриваться и оцениваться как площадь трапеции. Параметры для оценки площади трапеции являются производными от длины и ширины хвоинки. Образцы побегов и хвои пихты сибирской, которые были использованы для определения морфометрических параметров хвои, необходимых для верификации модели, отбирали со здоровых деревьев пихты сибирской первого яруса ельника чернично-сфагнового, произрастающего в среднетаежной зоне (Княжпогостский район, Республика Коми) в 2016–2017 гг. Относительная погрешность оценки площади поверхности отдельной хвоинки с использованием полученной модели не превышает 3%. Приведенный подход моделирования площади поверхности отдельной хвоинки пихты может применяться и для других хвойных пород. Дается алгоритм, позволяющий использовать полученную модель для оценки средней суммарной площади поверхности любого количества хвоинок, например, одного или нескольких побегов. При определении суммарной площади поверхности в качестве параметров модели используются выборочные характеристики морфометрических показателей хвои. Получена корреляционная зависимость, связывающая абсолютно сухую массу и среднюю суммарную площадь поверхности хвоинок побега пихты сибирской. Это дает возможность оценивать площадь поверхности хвои побегов пихты.

*Ключевые слова:* пихта сибирская, площадь поверхности хвои, моделирование.

DOI: 10.31857/S0024114821020078

Поверхности раздела (или граничные поверхности) — естественный барьер, участвующий в регуляции потоков вещества и энергии между любой биологической системой и окружающей ее средой. Для высших растений связь со средой обитания реализуется в основном через поверхности листьев, стеблей и корней. В эколого-физиологических исследованиях растительного покрова преобладающее участие листьев в процессах фотосинтеза, транспирации и дыхания определяет ключевую роль такого морфометрического параметра как площадь поверхности листа.

При ботаническом описании листьев важным признаком является соотношение длины и ши-

рины листовой пластинки и расположение наиболее широкой части листовой пластинки относительно ее середины. Для хвои, как правило, длина листовой пластинки намного превышает ее ширину, наиболее широкая часть расположена ниже середины листовой пластинки. Если описывать листья по сходству с очертаниями каких-либо предметов, то, учитывая, соотношение длины и ширины, а также расположение широкой части листовой пластинки, чаще всего, листья хвойных описывают как игольчатые (Лотова, 2001).

Несмотря на огромное разнообразие строения листьев покрытосеменных растений, для них характерна плоская листовая пластинка. Определенная площадь такой поверхности, как правило, не вызывает серьезных затруднений. Разработано большое количество методов оценки площади поверхности плоских листовых пластинок (Daughtry, 1990; Уткин и др., 2008). Поскольку листовая пла-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России», номер гос. регистрации АААА-А17-117122090014-8.

стинка с точки зрения определения площади поверхности может рассматриваться как объект двумерного пространства, все эти методы являются той или иной разновидностью планиметрических методов. Выбор конкретного метода определяется морфологическими особенностями листа, требуемой точностью измерения, оборудованием и временем, которыми располагает исследователь.

Листовые органы голосеменных имеют вид игл и в рамках рассматриваемой проблемы классифицируются как объекты трехмерного пространства. Их поверхность значительно отличается от плоской поверхности листа покрытосеменных растений. Форма поперечного сечения хвоинок голосеменных варьирует от почти овальной до треугольной (Эзау, 1980), в результате поверхность хвоинки представляет собой комбинацию нескольких поверхностей, которые не всегда являются плоскими. Кроме того, поперечное сечение может меняться как по длине хвоинки, так и в зависимости от расположения хвои в кроне.

С математической точки зрения иглы голосеменных видов растений можно рассматривать как замкнутые правильные многогранники произвольной формы, ограниченные гладкими гранями, имеющими две вершины, или полиэдры. Максимальное число граней в общем случае не превышает 5, у пихты равно 3. Форма граней разнообразна и не отличается правильной геометрией; наиболее распространена игольчатая форма — близкая к треугольной, у пихты напоминающая трапецию (рис. 1а). Расстояние между вершинами иглы значительно превышает расстояние между ее ребрами. Если линию, соединяющую вершины иглы, принять за главную ось, то поперечное сечение такого многогранника, также как и продольное, будет значительно отличаться от правильных геометрических фигур.

Существует ряд апробированных методик определения площади поверхности игл голосеменных (Swank, Schreuder, 1974; Brand, 1987; Bencke, 1979; Lin et al., 2002; Bond-Lamberty et al., 2003; Jonckheere et al., 2004). Однако в основе всех методов оценки площади поверхности отдельной хвоинки лежит общий принцип — это определение площади как произведения длины хвоинки на периметр ее поперечного сечения. Периметр может быть измерен непосредственно, однако чаще поперечное сечение аппроксимируется простой геометрической фигурой, периметр которой рассчитывается по известным формулам, включая легко измеряемые параметры хвоинки — ширину и толщину. Как правило, поперечное сечение хвоинки непостоянно вдоль ее длины, поэтому она разделяется на несколько частей, площади поверхностей которых затем суммируются (Цельникер, 1982; Katsuno, 1987; Цельникер, Ельчина, 1996).

Описанные методики трудоемки и не предназначены для оперативного использования в полевых условиях. Поэтому для практического применения находят корреляцию площади поверхности хвоинки с каким-либо ее легко определяемым параметром: абсолютно сухой массой или длиной хвоинки. Подобные корреляции найдены для многих видов хвойных растений, однако надежных оценок площади поверхности хвои именно пихты сибирской не существует.

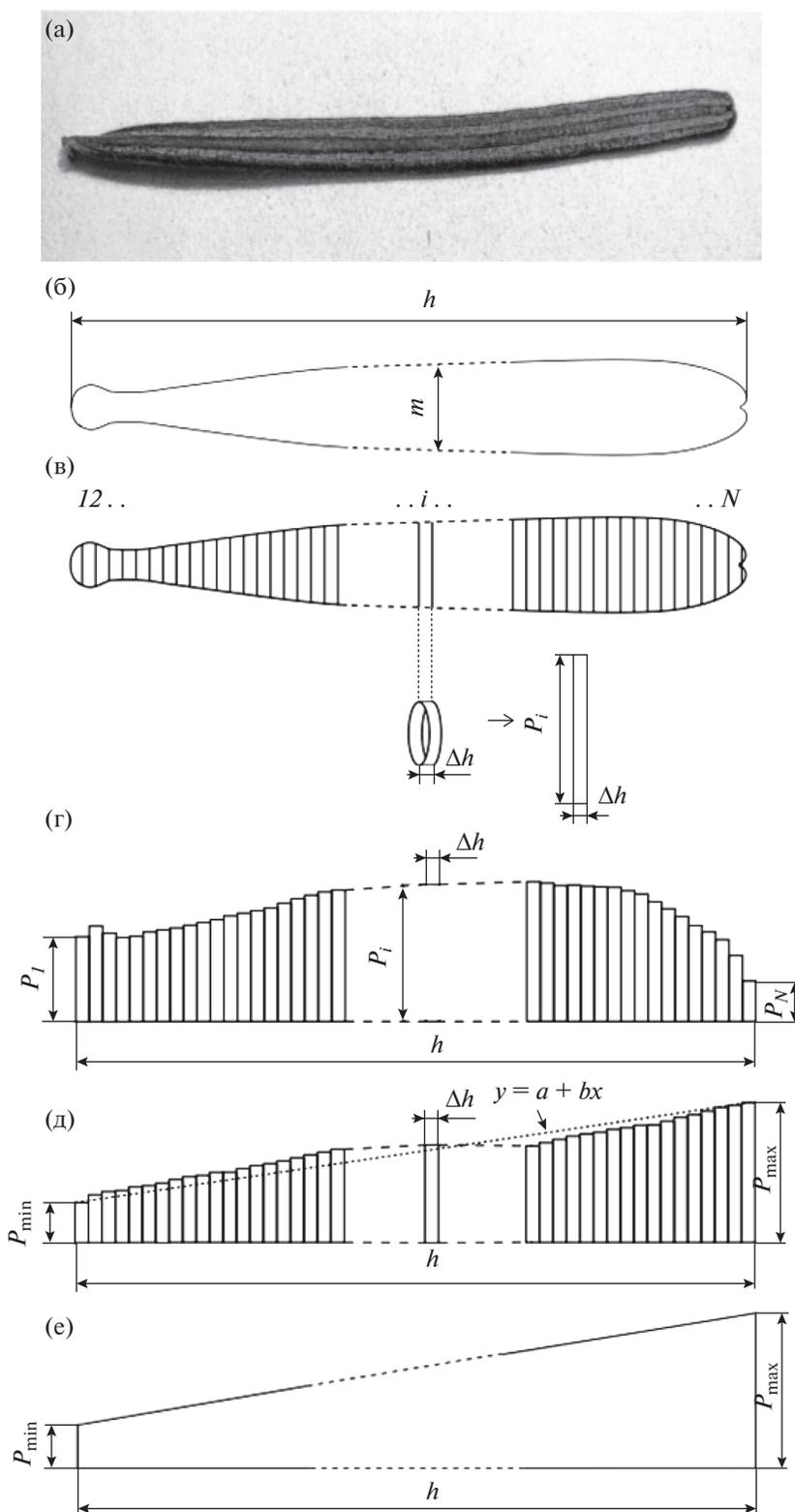
Целью данной работы является оценка площади поверхности отдельной листовой пластинки пихты сибирской, оценка суммарной площади поверхности нескольких хвоинок и нахождение корреляционной зависимости между абсолютно сухой массой нескольких хвоинок и площадью их поверхности.

## ОБЪЕКТЫ и МЕТОДИКА

Изучение хвои пихты сибирской с целью оценки площади поверхности листовой пластинки проводили в 2016–2017 гг. в ельнике чернично-сфагновом в подзоне средней тайги (Княжпогостский район, Республика Коми; 62°16'03" с.ш., 50°41'07" в.д.).

Образцы хвои (30 экз.) отбирались из побегов 1–3-х годов развития средней части кроны у 10 здоровых деревьев пихты сибирской, входящих в первый ярус древостоя. Смешанную выборку хвоинок получали по следующей схеме: побеги отбирали в течение года, хвою для препарирования с этих побегов выбирали случайным образом. За хвою первого года принимали сформированную хвою текущего года. В рамках разработанной методики для оценки площади поверхности единичной хвоинки измеряли среднюю ширину ( $m$ ) и длину ( $h$ ) хвоинок. Ширина измерялась окуляром-микрометром ЛИ-3-10 (ГОСТ 25706-83), погрешность измерения  $\pm 0.05$  мм, длина — линейкой измерительной (ГОСТ 427-75), погрешность измерения  $\pm 0.5$  мм. Далее каждую хвоинку разрезали на сегменты, поперечные срезы хвои готовили на микротоме МЗП-01 (Техном, Россия). Длина сегмента равнялась толщине гистологического среза (50 мкм). Каждый двадцатый сегмент отдельной хвоинки использовали для дальнейших измерений: всего было отобрано 686 гистологических срезов. Готовые препараты просматривали в световом микроскопе "Axiovert 200 M" (Carl Zeiss, Германия). Фотосъемку производили цифровой камерой AxioCam ERc 5s (Carl Zeiss, Германия). Измерение морфометрических параметров (ширины ( $m$ ) и периметра ( $P$ ) сегмента) проводили с использованием программы Carl Zeiss Vision (Carl Zeiss, Германия), погрешность измерения  $\pm 0.05$  мкм.

Для нахождения взаимосвязи между суммарной площадью поверхности хвоинок отдельного



**Рис. 1.** Аппроксимации поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской геометрической фигурой. а – фотография хвоинки; б – схематическое изображение хвоинки; в – схема деления хвоинки на сегменты и трансформации поверхности *i*-го сегмента в прямоугольник; г – вид общей площади поверхности хвоинки после трансформации всех сегментов; д – вид общей площади поверхности хвоинки после ранжирования сегментов; е – итоговая модель площади поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской. *h* – длина хвоинки;  $\Delta h$  – длина отдельного сегмента хвоинки; *N* – число сегментов; *m* – ширина хвоинки в среднем сечении;  $P_i$  – периметр *i*-го сегмента;  $P_{\min}$  – минимальный периметр сегмента,  $P_{\max}$  – максимальный периметр сегмента.

побега и их абсолютно сухой массой были отображены 32 побега 1–3-го года жизни. Определяли среднее значение длины и ширины хвоинок каждого побега (объем выборки хвоинок для каждого побега  $n = 30$ ), измеряли абсолютно сухую массу всех хвоинок каждого побега (весы лабораторные электронные Adventurer, Швейцария, погрешность измерения  $\pm 0.02$  г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непосредственное измерение периметра поперечного сечения хвоинки дает более точную его оценку, чем аппроксимация подходящей геометрической фигурой. Однако непостоянство формы сечения по длине хвоинки ограничивает возможность использования этой оценки. Для преодоления указанного ограничения была разработана и использовалась методика, описанная ниже.

Рассмотрим схематичную модель отдельной хвоинки (рис. 1б). Разделим хвоинку сечениями, ортогональными главной оси хвоинки, на  $N$  частей длиной  $\Delta h$  (рис. 1в). При большом числе сечений ( $N \rightarrow \infty$ ) длина отдельного сегмента минимальна ( $\Delta h \rightarrow 0$ ). Тогда полученные  $N$  сегментов могут рассматриваться как тела, ограниченные цилиндрической боковой поверхностью. Другими словами, при  $N \rightarrow \infty$  и  $\Delta h \rightarrow 0$  периметры оснований отдельного сегмента можно считать равными. Обозначим периметр плоскости основания  $i$ -го сегмента как  $P_i$ . Тогда площадь боковой поверхности  $i$ -го сегмента равна:

$$S_i = P_i \Delta h. \quad (1)$$

Геометрические построения и теоретические обоснования в двумерном пространстве упрощаются. Для того, чтобы совершить переход в двумерное пространство, жестко трансформируем поверхность сегмента в плоскость. Жесткая трансформация означает, что между площадью поверхности сегмента и площадью поверхности получившегося в результате преобразования прямоугольника существует взаимно-однозначное соответствие, т.е. они эквивалентны (Муньос, 2014). Следовательно, площадь поверхности  $i$ -го сегмента эквивалентна площади прямоугольника со сторонами, равными  $P_i$  и  $\Delta h$  (рис. 1в). Соответственно, общая площадь поверхности хвоинки  $S$  может быть рассчитана как предел суммы площадей поверхностей  $N$  сегментов или  $N$  прямоугольников при  $\Delta h \rightarrow 0$ :

$$S = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N S_i = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N P_i \Delta h = \int_0^h P_i(h) dh. \quad (2)$$

Однако, в силу непостоянства сечения хвоинки, периметр  $P_i$ , изменяется по длине хвоинки т.е. периметр является функцией длины хвоинки  $P = f(h)$ , явный вид которой неизвестен. Это приводит к

тому, что геометрическая фигура, полученная в результате трансформации поверхности хвоинки, не является правильным геометрическим телом, площадь поверхности которого рассчитывается просто (рис. 1г). Чтобы придать геометрической фигуре необходимую правильную форму, нужно осуществить еще одно преобразование.

Для этого ранжируем прямоугольники по возрасту (или убыванию) большей стороны ( $P_i$ ). В результате получим геометрическую фигуру, которая для хвои пихты хорошо аппроксимируется трапецией, основания которой равны  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  ( $P_{\min}$  – минимальное  $P_i$ ,  $P_{\max}$  – максимальное  $P_i$ ), одна боковая сторона перпендикулярна основаниям трапеции и равна  $h$ , а координаты множества точек другой боковой стороны удовлетворяют линейному уравнению (рис. 1д).

Таким образом, для хвои пихты проведенные преобразования позволяют сопоставить площади поверхности хвоинки площади трапеции (рис. 1е). Следовательно, площадь поверхности хвоинки может быть рассчитана как площадь трапеции:

$$S = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} h, \quad (3)$$

где  $P_{\min}$  – минимальный периметр,  $P_{\max}$  – максимальный периметр,  $h$  – длина хвоинки.

Выражение  $\bar{P} = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2}$  представляет собой средний периметр, и, следовательно, площадь поверхности может быть найдена как:

$$S = \bar{P} h. \quad (4)$$

Верификацию гипотезы о линейности боковой стороны геометрической фигуры, полученной при трансформации хвоинки, осуществляли следующим образом. Для каждой из 30 сегментированных хвоинок был построен вариационный ряд: проведено ранжирование сегментов по возрастанию величины периметра (сегменты апикальной части, имеющей вогнутость, не учитывались). По результатам ранжирования для каждой хвоинки были найдены регрессионные уравнения зависимости периметра сегмента от его расположения на оси хвоинки. Во всех случаях лучшей моделью оказалось линейное уравнение  $y = a + bx$ , коэффициент детерминации не менее 0.73. Анализ моделей подтвердил их качество. В качестве примера на рис. 2 представлена аппроксимация зависимости ранжированных по величине значений периметров сегментов от номера варианты для одной из хвоинок, входящих в выборку. Таким образом, боковая сторона геометрической фигуры, полученной в результате преобразования исходной поверхности хвоинки, хорошо аппроксимируется прямой, соответственно в качестве модели площади поверхности хвоинки может быть принята площадь трапеции.

Практическое применение модели площади отдельной хвоинки (4) предполагает знание двух ее параметров: длины и среднего периметра. Измерение длины хвоинки является стандартной процедурой, оценка величины среднего периметра является результатом ряда сложных косвенных измерений. Упростить оценку периметра можно, используя его корреляцию с каким-либо параметром хвоинки, измеряемым простым прямым способом. Логично предположить наличие корреляции между величиной среднего периметра и значением средней ширины хвоинки. Количественную оценку предполагаемой взаимосвязи исследовали методами регрессионного анализа. В качестве переменных величин рассматривались периметр и ширина 686 поперечных срезов 30 хвоинок, измеренных в микрометрах. Взаимосвязь между шириной ( $m_i$ ) и периметром сегмента ( $P_i$ ), аппроксимировалась линейной функцией:

$$P_i = a_0 + b_0 m_i. \quad (5)$$

Анализ качества модели показал, что ее параметры статистически значимы, модель описывает имеющиеся данные адекватно. Основные показатели, характеризующие модель и ее параметры, представлены в табл. 1, график подбора регрессионного уравнения приведен на рис. 3.

Оценкой границ доверительного интервала значения периметра  $\hat{P}_i$ , рассчитанного по уравнению (5), является величина  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i}$ , где  $t_{\alpha/2, N-2}$  – коэффициент Стьюдента при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы,  $S_{\hat{P}_i}$  – оценка стандартного отклонения  $\hat{P}_i$  (Дрейпер, 1986). В диапазоне наиболее вероятных значений, которые может принимать ширина сформировавшейся хвоинки пихты (1.1–1.5 мм), максимальное значение оценки стандартного отклонения  $S_{\hat{P}_i} = \pm 0.045$  мм. При  $\alpha = 0.05$  и  $N = 686$  величина  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i} = 0.088$  мм. Приняв это значение за оценку верхней и нижней границ 95% доверительного интервала, результат оценки периметра хвоинки по уравнению (5) можно записать как  $\hat{P}_i \pm \pm 0.088$  мм.

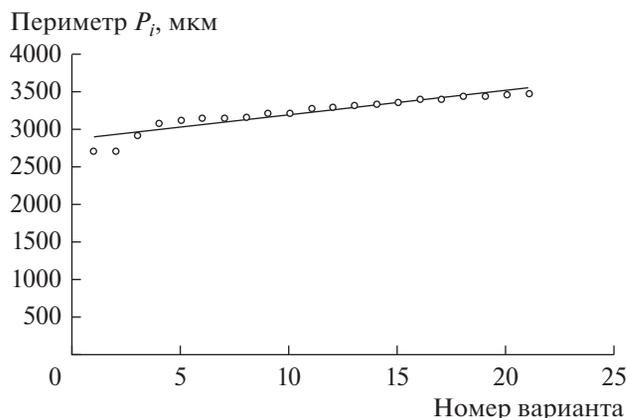


Рис. 2. График уравнения регрессии: модель зависимости величины периметров сегментов хвоинки от номера в вариационном ряду. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии,  $R^2 = 0.87$ .

Как правило, при проведении эколого-физиологических исследований требуется знание площади поверхности всех хвоинок на побеге. Методика расчета суммарной площади поверхности хвоинок основана на выборочных оценках длины и ширины хвоинки. Выборочное среднее значение ширины хвоинки использовали для оценки среднего периметра.

Выражение для вычисления суммарной площади поверхности хвоинок побега имеет вид:

$$S_{\Sigma} = \bar{P} \bar{h} N, \quad (6)$$

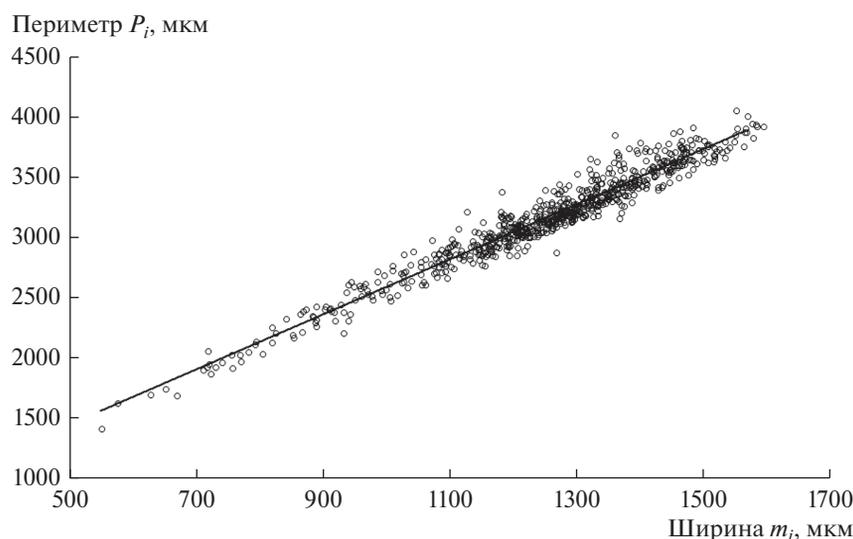
где  $\bar{P} = a_0 + b_0 \bar{m}$  – средний периметр хвоинки ( $\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$ ), мм,  $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$  – средняя длина хвоинки, мм,  $N$  – число хвоинок на побеге. Погрешность оценки суммарной площади поверхности хвоинок побега рассчитывается стандартным образом как погрешность результата косвенного измерения (Тейлор, 1985).

В исследовательской практике находит применение еще одна корреляционная зависимость, которая связывает суммарную площадь поверхности хвоинок побега и их абсолютно сухую мас-

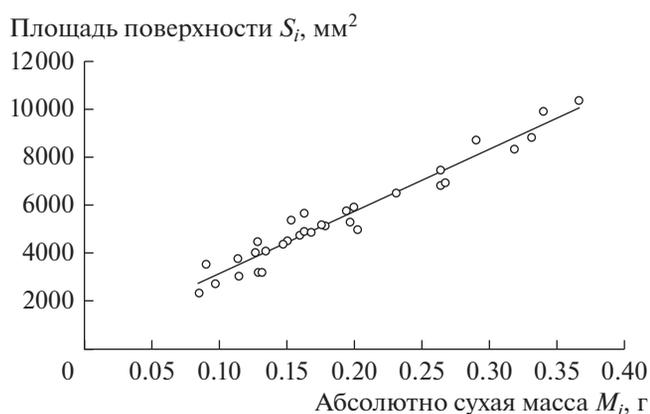
Таблица 1. Показатели качества и параметры регрессионного уравнения связи периметра и ширины хвоинки пихты

Число наблюдений	Коэффициент детерминации $R^2$	Расчетное значение $F$ -критерия	$p$ -уровень	Коэффициент уравнения	Значение коэффициента	Стандартная ошибка коэффициента $SE$	Расчетное значение $t$ -критерия	$p$ -уровень
686	0.974	12358.11	0.00	$a_0$	304.02	0.337	11.71	0.00
				$b_0$	2.29	0.009	111.17	0.00

Примечание. Уровень значимости  $\alpha = 0.05$ .



**Рис. 3.** График уравнения регрессии: модель зависимости периметра от ширины хвоинки. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии  $y = 304.02 + 2.29 \cdot x$ ,  $R^2 = 0.97$ .



**Рис. 4.** График уравнения регрессии: модель зависимости площади поверхности хвоинки от ее абсолютно сухой массы. Маркер в виде круга – экспериментальные данные, сплошная линия – уравнение регрессии,  $R^2 = 0.95$ .

су. Иногда более удобным является измерение массы всех хвоинок побега, предлагаемая корреляция позволяет оценивать площадь поверхности хвои побега по суммарной массе его хвоинок. Для

построения регрессионного уравнения, связывающего площадь поверхности хвоинок побега и их абсолютно сухую массу, использовали значения суммарной площади поверхности хвои побега, рассчитанные по вышеприведенной методике. Предпочтение было отдано линейной модели

$$S_{\Sigma i} = a_1 + b_1 M_i, \quad (7)$$

где  $S_{\Sigma i}$  – средняя суммарная площадь поверхности хвои побега,  $\text{мм}^2$ ,  $M_i$  – абсолютно сухая масса хвои побега, г.

Анализ модели подтвердил статистическую значимость параметров уравнения регрессии и его адекватность натурным данным. Основные показатели, характеризующие качество и значимость модели и ее параметров, представлены в табл. 2, график подбора регрессионного уравнения приведен на рис. 4.

В диапазоне наблюдаемого в эксперименте изменения абсолютно сухой массы от 0.1 до 0.35 г максимальное значение стандартного отклонения оценки площади поверхности хвои побега  $S_{S_{\Sigma i}} = \pm 160 \text{ мм}^2$ , соответственно  $t_{\alpha/2, N-2} S_{\hat{P}_i} = 2.04 \times 160 \approx 326 \text{ мм}^2$  ( $\alpha = 0.05$ ;  $N = 32$ ). Приняв

**Таблица 2.** Показатели качества и параметры регрессионного уравнения связи суммарной площади поверхности и абсолютно сухой массы хвоинок побега пихты и их оценки

Число наблюдений	Коэффициент детерминации $R^2$	Расчетное значение $F$ -критерия	$p$ -уровень	Коэффициент уравнения	Значение коэффициента	Стандартная ошибка коэффициента $SE$	Расчетное значение $t$ -критерия	$p$ -уровень
32	0.949	136.17	0.00	$a_1$	553.51	224.62	2.46	0.02
				$b_1$	25970.12	1099.50	23.62	0.00

Примечание. Уровень значимости  $\alpha = 0.05$ .

это значение за оценку верхней и нижней границ 95% доверительного интервала, результат оценки площади поверхности хвои побега по уравнению (6) можно записать как  $\hat{S}_{\Sigma_i} \pm 326 \text{ мм}^2$ .

Таким образом, оценка площади поверхности отдельной хвоинки пихты сибирской находится по формуле (4), оценка суммарной площади поверхности хвоинок побега пихты сибирской – по формуле (6) или по уравнению (7). Точность оценки суммарной площади по формуле (6) выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате наших исследований была разработана методика оценки площади поверхности листовой пластинки пихты сибирской. Отличительная особенность методики состоит в аппроксимации поверхности хвоинки простой геометрической фигурой (для пихты – это трапеция), при этом для оценки площади поверхности используются легко измеряемые параметры листовой пластинки: ее длина и ширина. Методика адаптирована для оценки суммарной площади поверхности любого количества хвоинок, например, хвоинок отдельного побега. Возможна оценка суммарной площади поверхности хвои побега пихты на основе другого параметра: найдена корреляционная зависимость, связывающая абсолютно сухую массу и среднюю суммарную площадь поверхности нескольких хвоинок. Полученная корреляция позволяет оценивать площадь поверхности хвои побега по массе его хвоинок. Представленная методика может применяться для оценки площади поверхности листовых пластинок хвойных, имеющих другую форму.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.  
 Лотова Л.И. Морфология и анатомия высших растений. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 528 с.

Муньос В. Мир математики. М.: Де Агостини, 2014. Т. 36. Деформируемые формы. Топология. 176 с.  
 Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с.

Цельникер Ю.Л., Ельчина Л.М. Упрощенный метод определения площади поверхности хвои лиственницы // Лесоведение. 1996. №3. С. 86–91.

Цельникер Ю.Л. Упрощенный метод определения поверхности хвои сосны и ели // Лесоведение. 1982. № 4. С. 85–88.

Эзю К. Анатомия семенных растений. М.: Мир. 1980. Т. 2. 400 с.

Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. The use of multiple measurement techniques to refine estimates of conifer needle geometry // Canadian J. Forest Research. 2003. V. 33. P. 101–105.

Benecke U. Surface area of needles in pinus radiata – variation with respect to age and crown position // New Zealand J. Forestry Science. 1979. V. 9. № 3. P. 267–71.

Brand D.G. Estimating the surface area of spruce and pine foliage from displaced volume and length // Canadian J. Forest Research. 1987. V. 17. P. 1305–1308.

Daughtry C.S.T. 1990. Direct measurements of canopy structure // Remote Sensing Reviews. V. 5. № 1. P. 45–60.

Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. V. 121. P. 19–35.

Katsuno M. Needle Area Measurement by the Cut Method and Estimation of Specific Leaf Area in Cryptomeria japonica // Ecology Research. 1987. V. 2. P. 203–213.

Lin J., Sampson D.A., Deckmyn G., Ceulemans R. Significant overestimation of needle surface area estimates based on needle dimensions in Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Canadian J. Botany. 2002. V. 80. P. 927932.

Swank W.T., Schreuder H.T. Comparison of Three Methods of Estimating Surface Area and Biomass for a Forest of Young Eastern White Pine // Forest Science. 1974. V. 20. № 1. P. 91–100.

## A New Approach to the Assessment of the Surface Area of the Siberian Fir Needles

S. I. Tarasov<sup>1</sup>, \* and N. V. Gerling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982 Russia

\*E-mail: tarasov@ib.komisc.ru

This paper presents the results of a study of the Siberian fir needles morphometric features, carried out with the aim of developing a method for assessing the surface area of a fir needle. The relevance of this topic is associated with the lack of research dedicated specifically to methods for determining the surface area of Siberian fir needles. In the course of the research, a corresponding mathematical model was obtained. It is shown that as a result of a number of geometric transformations, the surface area of the needles can be considered and estimated as the area of a trapezoid. The parameters for estimating the area of the trapezoid are derived from the length and width of the needles. Samples of shoots and needles of Siberian fir, which were used to determine the morphometric parameters of needles required for model verification, were taken from healthy Siberian fir trees of the first level of the bilberry-sphagnum spruce forest of the middle taiga zone

(Knyazhpogostsky district, Komi Republic) in 2016–2017. The relative error in assessing the surface area of an individual needle using the resulting model does not exceed 3%. The above-mentioned approach to modeling the surface area of individual fir needles can be applied to other conifers. An algorithm is given that allows using the resulting model to estimate the average total surface area of any number of needles, for example, one or several shoots. When determining the total surface area, the sample characteristics of the morphometric indicators of needles are used as model parameters. A correlation dependence was obtained linking the dry weight and the average total surface area of the Siberian fir shoot needles. This makes it possible to assess the surface area of the fir shoots needles.

*Keywords:* Siberian fir, needles surface area, modeling.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of the budget program “Structure and productivity spatial-temporal dynamics in the forest and bog ecosystems’ phytocenoses of the North-East of the European Russia”, No. AAAA-A17-117122090014-8.

## REFERENCES

- Benecke U., Surface area of needles in *Pinus radiata* – variation with respect to age and crown position, *New Zealand J. Forestry Science*, 1979, Vol. 9, No. 3, pp. 267–271.
- Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T., The use of multiple measurement techniques to refine estimates of conifer needle geometry, *Canadian J. Forest Research*, 2003, Vol. 33, pp. 101–105.
- Brand D.G., Estimating the surface area of spruce and pine foliage from displaced volume and length, *Canadian J. Forest Research*, 1987, Vol. 17, No. 10, pp. 1305–1308.
- Daughtry C.S.T., Direct measurements of canopy structure, *Remote Sensing Reviews*, 1990, Vol. 5, No. 1, pp. 45–60.
- Dreiper N., Smit G., *Prikladnoi regressiionnyi analiz* (Applied regression analysis), M.: Finansy i statistika, 1986, 366 p.
- Ezau K., *Anatomiya semennykh rastenii* (Anatomy of seed plants), M.: Mir, 1980, Vol. 2, 400 p.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F., Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, Vol. 121, No. 19–35.
- Katsuno M., Needle Area Measurement by the Cut Method and Estimation of Specific Leaf Area in *Cryptomeria japonica*, *Ecology Research*, 1987, Vol. 2, pp. 203–213.
- Lin J., Sampson D.A., Deckmyn G., Ceulemans R., Significant overestimation of needle surface area estimates based on needle dimensions in Scots pine (*Pinus sylvestris*), *Canadian J. Botany*, 2002, Vol. 80, pp. 927–932.
- Lotova L.I., *Morfologiya i anatomiya vysshikh rastenii* (Morphology and anatomy of higher plants), M.: Editorial URSS, 2001, 528 p.
- Mun’os V., *Mir matematiki* (World of mathematics), M.: De Agostini, 2014, Vol. 36. Deformiruemye formy. Topologiya (Deformable forms. Topology), 176 p.
- Swank W.T., Schreuder H.T., Comparison of Three Methods of Estimating Surface Area and Biomass for a Forest of Young Eastern White Pine, *Forest Science*, 1974, Vol. 20, No. 1, pp. 91–100.
- Teilor D., *Vvedenie v teoriyu oshibok* (An introduction to error analysis), M.: Mir, 1985, 272 p.
- Tsel’niker Y.L., Uproshchennyi metod opredeleniya ploshchadi poverkhnosti khvoi listvennitsy (A short-cut technique of the needles surface area estimation for larch), *Lesovedenie*, 1996, No. 3, pp. 86–91.
- Tsel’niker Y.L., Uproshchennyi metod opredeleniya poverkhnosti khvoi sosny i eli (The short-cut technique of needles surface area estimation for a pine and a spruce), *Lesovedenie*, 1982, No. 4, pp. 85–88.
- Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A., *Ploshchad’ poverkhnosti lesnykh rastenii: sushchnost’, parametry, ispol’zovanie* (The surface area of forest plants: essence, parameters, use), M.: Nauka, 2008, 292 p.