

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»  
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

ISSN 2311-1410

# Сибирский лесной журнал

Номер 4  
Июль–Август 2022



ФГБУ «Сибирское отделение  
Российской академии наук»  
Новосибирск

FEDERAL RESEARCH CENTER KRASNOYARSK SCIENTIFIC CENTER  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH  
V. N. SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH

**SIBERIAN JOURNAL OF FOREST SCIENCE**

Number 4 July–August 2022

Peer-reviewed Scientific Journal. Established January 2014

**Founder:** Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

**Published bimonthly**, 6 times per year  
ISSN 2311-1410 (Print), ISSN 2312-2099 (Online)

**Editor-in-Chief**

Alexander A. Onuchin  
onuchin@ksc.krasn.ru

**Associate Editors-in-Chief**

Igor M. Danilin, Tamara S. Sedel'nikova  
danilin@ksc.krasn.ru, tss@ksc.krasn.ru

**Managing Editor**

Larisa N. Skripal'schikova  
lara@ksc.krasn.ru

**Associate Editors**

Galina F. Antonova (RF), Natalia E. Antonova (RF), Stanislav P. Arefyev (RF), Sezgin Ayan (Turkey), Vladimir F. Baginskiy (Belarus), Eugene V. Banaev (RF), Yuri N. Baranchikov (RF), Kirsten Barrett (UK), Sergei A. Bartalev (RF), Sergei M. Bebiya (Abkhazia), Vera E. Benkova (RF), Kapitolina S. Bobkova (RF), Jiquan Chen (USA), Tumen N. Chimitdorziev (RF), Chimidnyam Dorjsuren (Mongolia), Chultem Dugarjav (Mongolia), Alexey A. Dymov (RF), Steve Eubanks (USA), Svetlana Yu. Evgrafova (RF), Sergey N. Goroshkevich (RF), Irina D. Grodnitskaya (RF), Andrei N. Gromtsev (RF), Georg Guggenberger (Germany), Alexander P. Isaev (RF), Galina A. Ivanova (RF), Vladislav N. Kalaev (RF), Olga V. Kalugina (RF), Vyacheslav I. Kharuk (RF), Alexander V. Kirdeyanov (RF), Natal'ya I. Kirichenko (RF), Grigoriy B. Kofman (RF), Alexander P. Kovalev (RF), Yuri N. Krasnoshchekov (RF), Konstantin V. Krutovsky (RF, Germany), Alexander M. Kryshen (RF), Konstantin N. Kulik (RF), Andrei N. Kupriyanov (RF), Qinglin Li (Canada), Sune Linder (Sweden), Sergei R. Loskutov (RF), Tatyana A. Moskalyuk (RF), Elena N. Muratova (RF), Sergei V. Osipov (RF), Igor N. Pavlov (RF), Heli Peltola (Finland), Viliam Pichler (Slovakia), Alexander V. Pimenov (RF), Anatoly S. Prokushkin (RF), Valery P. Putenikhin (RF), Olga A. Shapchenkova (RF), Dmitriy G. Schepaschenko (RF, Austria), Christiane Schmullius (Germany), Olga V. Shergina (RF), Alexander S. Shishikin (RF), Svetlana D. Shlotgauer (RF), Anatoly Z. Shvidenko (RF, Austria), Vladimir A. Sokolov (RF), Vladislav G. Soukhovolsky (RF), Ge Sun (USA), Vyacheslav V. Tarakanov (RF), Alexander N. Tashev (Bulgaria), Elena E. Timoshok (RF), Josef Urban (Czechia), Vladimir V. Usenya (Belarus), Vladimir A. Usoltsev (RF), Eugene A. Vaganov (RF), Viktor I. Voronin (RF), Chuankuan Wang (China), Adam X. Wei (Canada), Vasily T. Yarmishko (RF)

**Leading Editor**

Tatyana A. Nikitina

**Scientific Editor**

Kseniya A. Kryukova

**Technical Editor**

Tatyana R. Pantyukhina

*Address for journal office:*

Russian Federation, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Editorial office for the Siberian Journal of Forest Science  
Phones: +7 (391) 249-4639; +7 (391) 290-5516; E-mail: lara@ksc.krasn.ru  
Web: sibjforsci.com; сибирскийлеснойжурнал.рф

Novosibirsk

Siberian Branch of the Russian Academy of Science

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ИНСТИТУТ ЛЕСА ИМ. В. Н. СУКАЧЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –  
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

## СИБИРСКИЙ ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ

№ 4 2022 Июль – Август

Научный журнал. Издается с января 2014 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

**Периодичность** – 6 номеров в год  
ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)

*Главный редактор*  
А. А. Онучин

### Редакционная коллегия:

Г. Ф. Антонова (РФ), Н. Е. Антонова (РФ), С. П. Арефьев (РФ), С. Аян (Турция), В. Ф. Багинский (Беларусь),  
Е. В. Банаев (РФ), Ю. Н. Баранчиков (РФ), К. Баррет (Великобритания), С. А. Барталев (РФ), С. М. Бебия (Абхазия),  
В. Е. Бенкова (РФ), К. С. Бобкова (РФ), Е. А. Ваганов (РФ), Ч. Ван (Китай), А. Х. Вей (Канада), В. И. Воронин (РФ),  
С. Н. Горошкевич (РФ), И. Д. Гродницкая (РФ), А. Н. Громцев (РФ), Г. Гуггенбергер (Германия),  
И. М. Данилин (*зам. главного редактора*, РФ), Ч. Доржсүрэн (Монголия), Ч. Дугаржав (Монголия), А. А. Дымов (РФ),  
С. Ю. Евграфова (РФ), Г. А. Иванова (РФ), А. П. Исаев (РФ), В. Н. Калаев (РФ), О. В. Калугина (РФ), А. В. Кирдянов (РФ),  
Н. И. Кириченко (РФ), А. П. Ковалев (РФ), Г. Б. Кофман (РФ), Ю. Н. Краснощеков (РФ), К. В. Крутовский (РФ, Германия),  
А. М. Крышень (РФ), К. А. Крюкова (*научный редактор*, РФ), К. Н. Кулик (РФ), А. Н. Куприянов (РФ), Ж. Ли (Канада),  
С. Линдер (Швеция), С. Р. Лоскутов (РФ), Т. А. Москалюк (РФ), Е. Н. Муратова (РФ), Т. А. Никитина (*ведущий редактор*, РФ),  
С. В. Осипов (РФ), И. Н. Павлов (РФ), Х. Пелтола (Финляндия), А. В. Пименов (РФ), В. Пихлер (Словакия),  
А. С. Прокушкин (РФ), В. П. Путенихин (РФ), Т. С. Седельникова (*зам. главного редактора*, РФ),  
Л. Н. Скрипальщикова (*отв. секретарь*, РФ), В. А. Соколов (РФ), Г. Сун (США), В. Г. Суховольский (РФ),  
В. В. Тараканов (РФ), А. Н. Ташев (Болгария), Е. Е. Тимошок (РФ), Й. Урбан (Чехия), В. В. Усень (Беларусь),  
В. А. Усольцев (РФ), В. И. Харук (РФ), Д. Чен (США), Т. Н. Чимитдоржиев (РФ), О. А. Шапченкова (РФ),  
А. З. Швиденко (РФ, Австрия), О. В. Шергина (РФ), А. С. Шишкин (РФ), С. Д. Шлоттауэр (РФ), К. Шмуллиус (Германия),  
Д. Г. Щепаченко (РФ, Австрия), С. Юбанкс (США), В. Т. Ярмишко (РФ)

*Адрес редакции:* 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, ИЛ СО РАН  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН)

Редакция «Сибирского лесного журнала»  
Телефоны: (391) 249-4639; (391) 290-5516  
E-mail: lara@ksc.krasn.ru  
Интернет-сайт: [sibirskiiylesnoyjournal.pf](http://sibirskiiylesnoyjournal.pf), [sibjforsci.com](http://sibjforsci.com)

Новосибирск  
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 2022  
© Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), 2022



### Основная тематика журнала:

лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация  
структура, динамика и функционирование лесных экосистем  
биосферные функции леса, их изменения под влиянием глобальных и региональных  
климатических процессов и антропогенных воздействий  
география, экология и типология лесов  
лесная генетика, селекция и интродукция, дендрология  
лесное ресурсоведение, ботаника, этноботаника  
лесные культуры  
физиология и биохимия лесных растений  
биотехнология, древесиноведение, химическая переработка древесины и недревесных продуктов леса  
дендрохронологические исследования  
лесная гидрология  
лесная пирология  
лесные зоокомплексы  
лесная фитоценология  
лесное почвоведение  
лесная микробиология  
лесная фитопатология и защита леса  
лесомелиорация и лесная рекультивация  
лесная политика, экономика, управление лесами, лесное законодательство  
дистанционные и геоинформационные методы в оценке биосферных функций леса

Журнал представляет собой мультидисциплинарное рецензируемое научное издание, освещающее широкий спектр вопросов лесоведения, лесоводства, лесоустройства, лесной таксации, генетики и селекции, лесной экологии и экономики – наук о сложнейших закономерностях структуры, формирования и развития лесных экосистем и использования лесных ресурсов человеком.

«Сибирский лесной журнал. Siberian Journal of Forest Science» (ISSN 2311-1410 (печатное издание), ISSN 2312-2099 (сетевое издание)) публикуется Федеральным государственным бюджетным учреждением «Сибирское отделение Российской академии наук» на русском и английском языках.

«Сибирский лесной журнал» включен в российскую систему научного цитирования eLibrary.ru (РИНЦ), международные реферативные базы данных: Ulrichsweb: Global Serials Directory, Directory of Open Access Journals (DOAJ), AGRIS, CABI Forest Science Database, перечень периодических научных изданий ВАК при Минобрнауки РФ, готовится к включению в международные реферативные базы данных научной периодики и цитирования: Springer, Scopus, Web of Science. Полнотекстовые статьи размещаются на сайте журнала в сети: [sibirskii-lesnoy-jurnal.rf](http://sibirskii-lesnoy-jurnal.rf), [sibjforsci.com](http://sibjforsci.com).

«Сибирский лесной журнал» предполагает следующие разделы: «Обзорные статьи», «Исследовательские статьи», «Краткие сообщения», «Рецензии», «Хроника», «Международное сотрудничество». В нем освещаются самые разные вопросы, касающиеся проблем биологического разнообразия лесов на всех уровнях его организации (генетическом, видовом, экосистемном). Публикуются статьи по антропогенной и техногенной трансформации лесных экосистем. Журнал не ограничивается лесными проблемами Сибири, принимает и публикует материалы из различных регионов мира, представляющие общенаучный интерес.

Подготовлено к печати Федеральным государственным бюджетным учреждением  
«Сибирское отделение Российской академии наук»

Ведущий редактор Т. А. Никитина

Научный редактор К. А. Крюкова

Дизайн обложки С. Р. Лоскутов

Техническое редактирование и верстка Т. Р. Пантюхина

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации:

Периодическое печатное издание, журнал – ПИ № ФС 77-68699 от 09 февраля 2017 г.

Сетевое издание – ЭЛ № ФС 77-70737 от 15 августа 2017 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

Федеральный исследовательский центр

«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

---

Сдано в набор 01.08.2022. Выход в свет 31.08.2022. Бумага типографская. Формат 60 × 84 1/8

Усл. печ. л. 7.44. Уч.-изд. л. 7.2. Тираж 100 экз. Заказ № 266. Цена свободная.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17

Отпечатано в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Сибирское отделение Российской академии наук»

630090, г. Новосибирск, Морской просп., 2

Тел.: 8 (383) 330-8466; электронная почта: [e.lyannaya@sb-ras.ru](mailto:e.lyannaya@sb-ras.ru); <http://www.sibran.ru>

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 571.51: 630.43:551.312.22:551.795

### РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЖАРОВ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ СОДЕРЖАНИЯ МАКРОЧАСТИЦ УГЛЯ В ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ В ДОЛИНЕ РЕКИ ДУБЧЕС

Л. В. Карпенко<sup>1</sup>, А. В. Гренадерова<sup>2</sup>, А. Б. Михайлова<sup>2</sup>, О. В. Подобуева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: karp@ksc.krasn.ru, agrenadyorova@sfu-kras.ru, arodionova@sfu-kras.ru, olga.podobueva@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.

Приведены результаты реконструкции локальных пожаров в правобережной части долины р. Дубчес (средняя тайга Приенисейской Сибири) в голоцене на основе стратиграфического анализа торфяной залежи. Объектом исследований стало верховое сосново-кустарничково-сфагновое болото с хорошо развитым древесным ярусом из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Мощность залежи – 4.15 м, ее возраст проинтерпретирован 11 радиоуглеродными датами, возраст придонного слоя торфа –  $11802 \pm 52$  <sup>14</sup>C лет назад (л. н.). В торфяной колонке на глубинах 3.25, 3.15, 2.90, 2.65 м обнаружены следы пожаров в виде пироженных прослоек. Динамику пожаров реконструировали по методике подсчета макроскопических частиц угля Charcoal. Установлены время, периодичность и интенсивность пожаров на суходолах, окружающих болото. В динамике локальных пожаров выделены четыре периода: около 12000–10000, 8250–7250, 6300–4000, 2400 календарных лет назад (кал. л. н.) – по настоящее время. Локальные пожарные эпизоды древесного угля пришлись на следующие даты: 11600, 11150, 10500, 7800, 5900, 5450, 4600, 1900, 1200 и 250 кал. л. н. Отмечено, что наиболее высокая пожарная активность наблюдалась в раннеголоценовое время, о чем свидетельствует повышенное содержание макроугольков в торфе. Основной причиной пожаров, вероятно, были аномально засушливые весенне-летние сезоны, обусловленные сухим и теплым климатом. Болото было пройдено пожаром 7790, 7030, 5610 и 4890 кал. л. н. Пироженная деструкция торфа минимальна, что свидетельствует о слабой или средней интенсивности торфяного пожара. Пожары на болоте способствовали активизации лесообразовательного процесса. В позднем голоцене воздействие пожаров на болотный массив прекратилось, произошла смена лесных фитоценозов сильно обводненными грядово-мочажинными комплексами.

**Ключевые слова:** болото, макроугольковый анализ, пироженные прослойки, пики притока древесного угля, динамика пожаров.

DOI: 10.15372/SJFS20220401

#### ВВЕДЕНИЕ

Пожары в исторически обозримый период времени были важным экологическим фактором воздействия на бореальные леса Сибири. Как отмечал В. В. Фуряев (Лесные экосистемы..., 2002), «выявление масштабов и особенностей этого воздействия в связи с зонально-географи-

ческими изменениями климата в историческом прошлом, настоящем и, особенно, в будущем является актуальной проблемой» (с. 107). В мире ежегодно случается не менее 200 тыс. лесных пожаров, уничтожающих около 0.5 % всей площади лесов. В России в среднем регистрируются от 16 до 30 тыс. пожаров в год на площади около 900 тыс. га (Залесов, 1998; Давыденко,

1999; Швиденко, Щепашенко, 2013). В лесах Сибири ежегодно возникает от 4.5 до 27 тыс. пожаров, которые охватывают площади от 3.5 до 18 млн га. Основной причиной лесных пожаров являются сухие грозы (Фуряев, 1996; Иванова и др., 2014).

На Земле лесные пожары возникали задолго до появления человека вследствие катастрофических засух и молний (Loope, Gruell, 1973; Курбатский, 1976; и др.). На территории Средней и Приенисейской Сибири максимум пожаров отмечен 8300–8000, 6000–5000 и около 3200 л. н. (Кошкарова, 1986; Карпенко, Прокушкин, 2019). При сопоставлении археологических и палеоэкологических данных для южной тайги Енисейского правобережья (Гренадерова и др., 2021) установлено, что хозяйственная деятельность древнего человека значительных преобразований в растительный покров не внесла, а причиной усиления пожарной активности стала атмосферная засуха.

О палеопожарах свидетельствуют пирогенные признаки в виде прослоек золы и углей, сохраняющихся в торфяниках. Залежь болот является уникальным объектом для реконструкции климатических и экологических изменений в голоцене, в том числе и долговременной динамики пожаров (Clark, 1982; Ефремова, Ефремов, 1994; Громцев, 2008).

Объект исследования расположен в бассейне нижнего течения р. Дубчес, в его правобережной части (Нижне-Енисейское лесничество, 25 км к западу от с. Зотино). Географические координаты – 60°49' с. ш., 89°23' в. д. По схеме лесопожарного районирования (Софронов, Волokitина, 1986), территория относится к Сымскому лесопирологическому округу. Горимость лесов этого округа умеренная, однако «беглые пожары в сосняках лишайниковых возможны в течение всего сезона» (с. 146). Особенностью района исследований является значительная заболоченность и заторфованность.

Анализ динамики торфонакопления в Западной и Приенисейской Сибири свидетельствует о том, что заболачивание этой территории началось преимущественно 10000–8000 л. н. (Нейштадт, 1957; Волкова, Левина, 1982; Глебов, 1988; Ямских и др., 2004; Инишева, 2006; Mikhailova et al., 2021; и др.). Исследованная нами торфяная залежь имеет древний возраст –  $11802 \pm 52$  кал. л. н., что позволило охватить палеоэкологическими реконструкциями значительный период времени – от аллереда до настоящего времени.

Цель работы – на основе содержания макроскопических частиц угля и пирогенных прослоек в торфяной залежи верхового болота, расположенного в долине нижнего течения р. Дубчес, реконструировать активность локальных пожаров и оценить влияние климатических флуктуаций в голоцене на их динамику.

В ходе исследования были выполнены ботанический и радиоуглеродный анализы торфа. На основе подсчета макроугольков по всей глубине торфяной колонки установлены время, интенсивность и периодичность локальных пожаров; по почвенно-морфологическим признакам пирогенных прослоек выявлены вид и интенсивность торфяных пожаров на болотном массиве.

Реконструкция локальных пожаров методом макроуголькового анализа Charcoal для территории исследований приводится впервые, что представляет несомненный научный интерес.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные ландшафтные единицы в районе исследования представлены сосновыми лесами, преимущественно лишайниковыми борами, расположенными на высоких незаболоченных песчаных гривах и труднопроходимых болотах, среди которых доминируют рямы, грядово-мочажинные и озерково-мочажинные комплексы (Елизарьева, 1964). Лесопокрываемая площадь Нижне-Енисейского лесничества составляет 4 599 800 га, на долю гарей приходится 5719 га.

Объект исследования – верховое болото, расположенное в районе Международной обсерватории высотной мачты ZOTTO (с. Зотино, Красноярский край). Болотный массив площадью около 3 км<sup>2</sup> залегает в долине нижнего течения р. Дубчес, левого притока р. Енисей (рис. 1).

На участках, граничащих с болотом, распространены заболоченные и болотные олиготрофные кустарничково-сфагновые и лишайниковосфагновые сосняки. Узкие окраины болотного массива заняты березовыми болотно-травяными лесами. На суходолах, окружающих болотный массив, развиты в основном лишайниковые, зеленомошно-брусничные и зеленомошно-черничные боры.

Точка отбора торфяной колонки располагается на расстоянии 500 м от опушки леса на сосново-кустарничково-сфагновой гряде высотой 0.5 м. При помощи ручного бура системы Гиллера сплошной колонкой с интервалом 5 см отобрано 82 образца для определения ботани-



Рис. 1. Общий вид болотного массива.

ческого состава торфа. Одновременно фиксировали наличие пирогенных прослоек по глубине торфяной залежи. Позже в лабораторных условиях отобраны пробы для метода Charcoal. Для определения абсолютного возраста торфяных отложений по  $^{14}\text{C}$  с различным интервалом отобрано 11 образцов. Возраст торфа определен методом ускорительной масс-спектропии (3-MV Tandetron ion accelerator) в Институте биогеохимии им. Макса Планка (Йена, Германия) (Steinhof et al., 2017). На основе полученных радиоуглеродных дат была выполнена

их калибровка с использованием пакета Clam (Blaauw, 2010) и построен график глубинно-возрастной зависимости (рис. 2). Данные по датированию торфа приведены в табл. 1.

Основными методами исследований стали ботанический, радиоуглеродный и макроугольковый анализы торфа. Ботанический анализ торфа проведен по ГОСТ 28245-89 (2006) с использованием микроскопа Leitz Wetzlar.

Анализ макроугольков методом Charcoal выполнен с предварительной обработкой образцов объемом  $1\text{ см}^3$  из каждого 5-сантиметрового

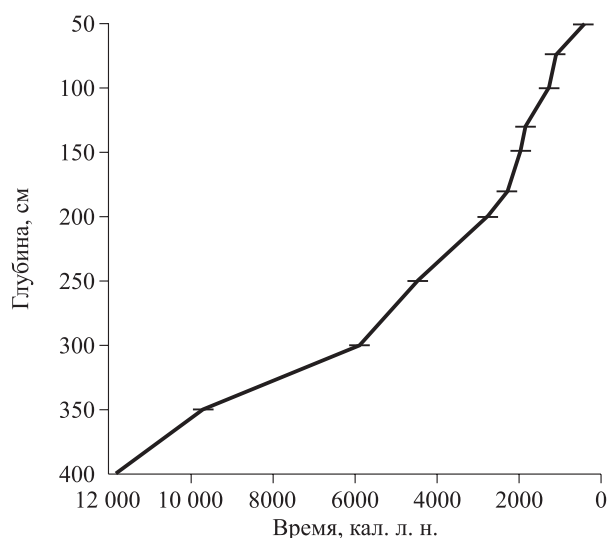


Рис. 2. Глубинно-возрастная зависимость для торфяной колонки «Зотино, ВБ7-3».

Таблица 1. Данные AMS  $^{14}\text{C}$ -датирования торфяных отложений болота Зотино, ВБ7-3 и даты, калиброванные с использованием пакета Clam

| Глубина, см | Возраст                 |                          |
|-------------|-------------------------|--------------------------|
|             | $^{14}\text{C}$ , л. н. | кал. л. н. (2 $\sigma$ ) |
| 45–50       | 388 ± 42                | 387 (305–469)            |
| 70–75       | 1066 ± 32               | 1067 (1006–1129)         |
| 95–100      | 1257 ± 29               | 1258 (1202–1312)         |
| 125–130     | 1827 ± 31               | 1827 (1771–1884)         |
| 145–150     | 1954 ± 29               | 1955 (1902–2014)         |
| 175–180     | 2248 ± 30               | 2248 (2189–2304)         |
| 195–200     | 2769 ± 31               | 2768 (2712–2825)         |
| 245–250     | 4457 ± 32               | 4457 (4399–4521)         |
| 295–300     | 5894 ± 33               | 5894 (5831–5958)         |
| 345–350     | 9680 ± 46               | 9681 (9590–9773)         |
| 395–400     | 11 802 ± 52             | 11 802 (11 699–11 903)   |

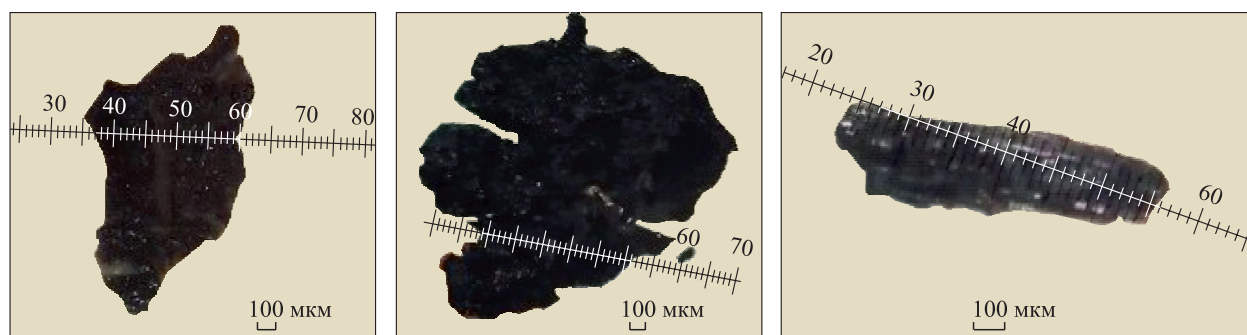


Рис. 3. Фото макроугольков из отложений торфа болота Зотино, ВБ7-3.

интервала (исключая пирогенные прослойки) 10 %  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  и нагреванием в течение 48 ч в присутствии 6 %-й  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Clark, 1988). Подсчет угольков проведен при  $\times 20$ , учитывались все угольки крупнее 125 мкм. Основные идентификационные признаки макроугольков – это угловатая форма, металлический блеск, черный цвет частиц и способность разламываться при физическом воздействии на них (рис. 3).

Выявленное количество угольков в каждом интервале и полученный с помощью калибровочной кривой возраст были введены в качестве исходных параметров в программу CharAnalysis. Полученные графики отражают достоверные пики притока древесного угля в соответствии с временными рамками. Освоение методики Charcoal проходило в рамках научных мероприятий, организованных группой DIMA – Developing Innovative Multiproxy Approaches for Siberia and the Russian Far East (Edwards et al., 2021).

Реконструкция гидрологического режима болотного массива в голоцене выполнена по Л. Г. Раменскому и соавт. (1956), степень разложения торфа – по Н. И. Пьявченко (1963). Общая характеристика торфяной колонки представлена на рис. 4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общее описание растительного покрова болотного массива в долине р. Дубчес, его стратиграфия и радиоуглеродный возраст опубликованы ранее (Карпенко, Прокушкин, 2018).

Отметим только, что в центре болота, где проводились исследования, господствует сосново-кустарничково-сфагновая (рямовая) группировка с хорошо развитым древесным ярусом из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Мощность торфяной залежи в точке бурения составила 4.15 м, ниже залежь подстилается белесым песком. На глубинах 3.25, 3.15, 2.90, 2.65 м об-

наружены пирогенные прослойки разной мощности (от 2 до 3 см) (табл. 2).

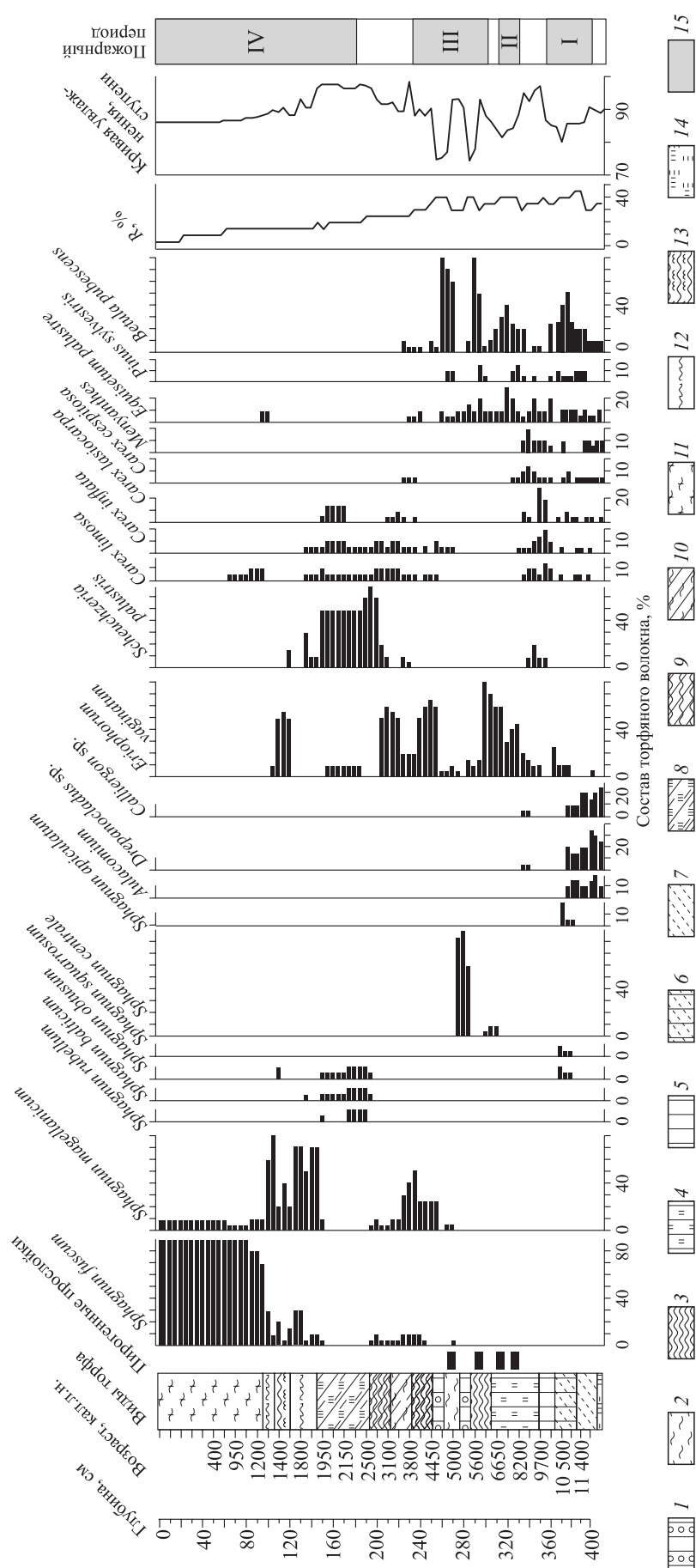
С помощью программы CharAnalysis получены наглядные схемы, демонстрирующие приток макрочастиц древесного угля и интервалы повторения пожаров в заданном временном отрезке (рис. 5, 6).

Макроскопические частицы угля могут рассеиваться от локализации пожара на десятки – сотни метров, в некоторых случаях до 10–20 км, это зависит от интенсивности пожара, площади, охваченной пожаром, от условий, способствующих переотложению (Higuera et al., 2007; Peters, Higuera, 2007). Фоновое и пиковое значения древесного угля отличаются пространственным масштабом поступления. Под фоновым значением имеется в виду сумма частиц, поступивших с большей территории (до 20 км), в том числе и путем вторичного переноса частиц древесного угля, на который влияют экологические условия территории – рельеф, характер растительности (Long et al., 1998). Пиковое значение макрочастиц угля отражает первичное отложение древесного угля от «местных» пожаров, т. е. находящихся в пределах от нескольких десятков до сотен метров от пожара (Clark et al., 1998).

Согласно рис. 6, достоверные пики притока древесного угля пришлись на следующие даты: 11600, 11150, 10500, 7800, 5900, 5450, 4600, 1900, 1200 и 250 кал. л. н., т. е. в это время распространение пожаров было максимально близко к точке исследований.

На основании кривой, отображающей временной ряд частоты пожаров (рис. 6, 4), выделены четыре этапа усиления пожарной активности близ болота: I – около 12 000–10 000, II – 8250–7250, III – 6300–4000, IV – 2400 кал. л. н. – по настоящее время (см. рис. 4).

Первый период, характеризующийся высокой частотой пожаров, начался около 12 000 кал. л. н. и длился примерно до 10 000 кал. л. н. (рис. 6).



**Рис. 4.** Стратиграфия торфяной залежи Зотино, ВБ7-3, состав растений-торфообразователей, степень разложения торфа, экологическая кривая увлажнения и сигналы пожарной активности в голоцене.

Низинные виды торфа: 1 – березовый, 2 – сфагновый, 3 – пушицевый, 4 – древесно-гипновый, 5 – древесно-сфагновый, 6 – древесно-гипновый, 7 – гипновый; переходные виды торфа: 8 – шейхериевый, 9 – сфагновый; верховые виды торфа: 11 – фускум-торф, 12 – мелидум-торф, 13 – пушицевый, 14 – органоминальный остаток, 15 – пожарные периоды.

Таблица 2. Характеристика пирологических прослоек и время пожаров

| Глубина, м | Растения-торфообразователи, %                                                                                                                                                                                | Вид торфа         | Степень увлажнения (Раменский и др., 1956) | Возраст, кал. л. н. (2 s) |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| 2.65       | Кора и древесина березы ( <i>Betula</i> L.) – 60, кора сосны ( <i>Pinus</i> L.) – 10, хвощ ( <i>Equisetum</i> L.) – 5, пушица ( <i>Eriophorum</i> L.) – 10, сфагновые мхи ( <i>Sphagnopsida</i> Ochyra) – 10 | Березовый         | 76.8                                       | 4890 ± 45                 |
| 2.90       | Кора и древесина березы – 50, кора сосны – 15, хвощ – 20, пушица – 15.                                                                                                                                       | »                 | 77.7                                       | 5610 ± 52                 |
| 3.15       | Кора и древесина березы – 40, пушица – 30, хвощ – 30                                                                                                                                                         | Древесно-травяной | 81.7                                       | 7030 ± 50                 |
| 3.25       | Пушица – 45, кора и древесина сосны и березы – 35, осоки ( <i>Carex</i> L.) – 10, хвощ – 10.                                                                                                                 | То же             | 84.3                                       | 7790 ± 53                 |

Фоновая скорость аккумуляции макроскопических частиц угля в этот период не достигала 5 частиц/(см<sup>2</sup> · год) (см. рис. 5, а), наибольший фоновый приток пришелся на время 10 500–9700 кал. л. н. В этот период отмечено три достоверных пика (три пожарных эпизода): 11 600, 11 150 и 10 500 кал. л. н. (рис. 6). Под пожарным эпизодом понимается пожар и/или серия пожаров в радиусе до 3 км от объекта исследования (Higuera, 2009).

Как показал ботанический анализ торфа (см. рис. 4), растительный покров на начальной стадии развития болота претерпел ряд эндогенных

смен, направленных в сторону усиления лесообразовательного процесса. Древесно-гипновый, березовый, древесно-травяной и древесно-сфагновый виды торфа (интервал глубин 3.95–3.55 м, время – 11 590–9890 кал. л. н.) и невысокое значение степени увлажнения (85–90-е ступени, согласно шкале Л. Г. Раменского и соавт. (1956), сыролуговое и болотно-луговое увлажнение) свидетельствуют о том, что в доголоценовое и раннеголоценовое время здесь были развиты древесно-травяные, древесно-моховые и лесные фитоценозы. Климат этого отрезка времени был континентальным, относительно сухим

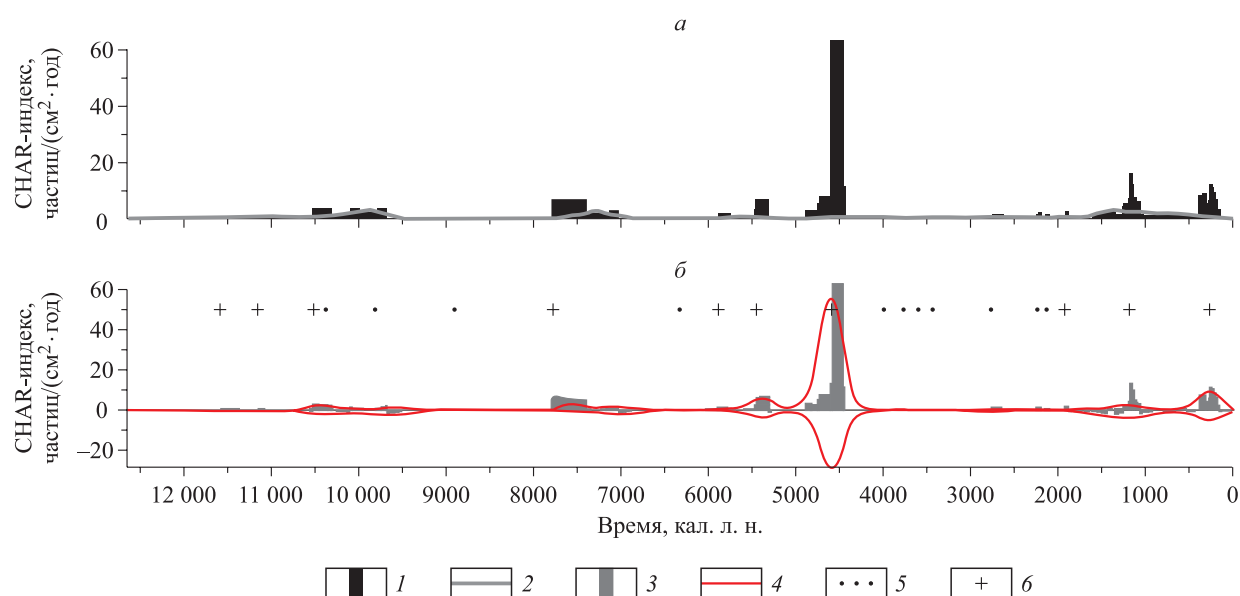
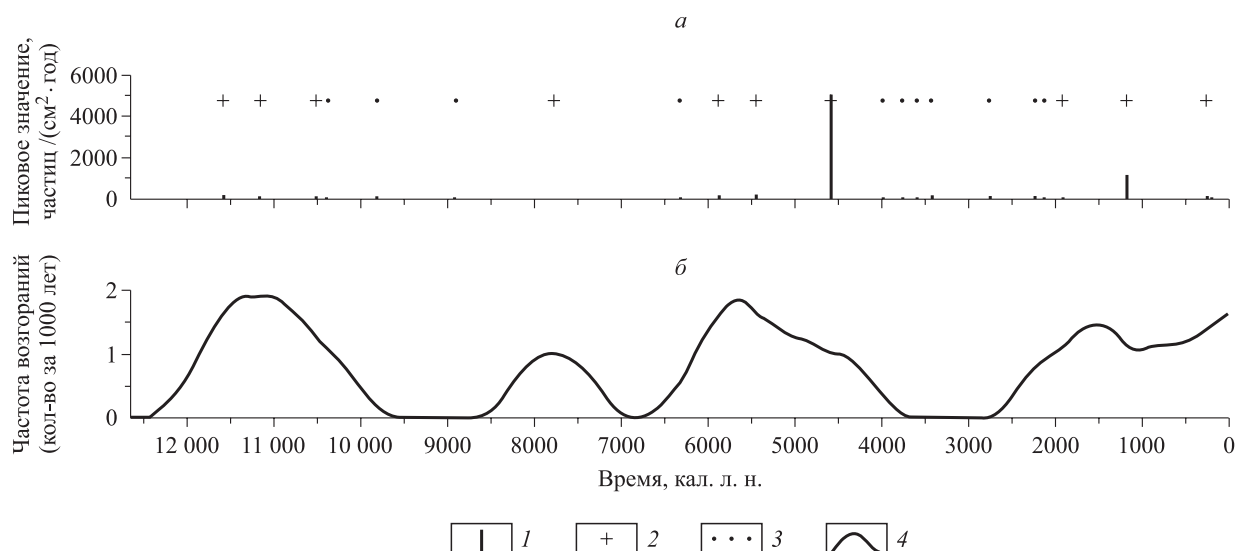


Рис. 5. Скорость аккумуляции частиц угля (CHAR-индекс), фоновые и пороговые значения CHAR-индекса, пожарные эпизоды в голоцене по данным изучения макрочастиц угля в торфяной колонке «Зотино, ВБ7-3».

а –  $C_{\text{интерполированное}}$  и  $C_{\text{фоновое}}$ , определяемые 500-летними трендами; б –  $C_{\text{пиковое}}$  ( $C_{\text{интерполированное}} - C_{\text{фоновое}}$ ), пороговые уровни, определяющие  $C_{\text{шумовое}}$  и достоверные пики притока. 1 – контуры интерполированного притока древесного угля; 2 – смоделированный фоновый приток древесного угля, шт./(см<sup>2</sup> · год); 3 – пики древесного угля (разность интерполированного значения притока и фонового значения притока); 4 – пороговый уровень; 5 – истинный или достоверный пик древесного угля, т. е. приток частиц угля, превышающий фоновый приток; 6 – пики, не превышающие пороговые значения, отображаются в виде серых точек.



**Рис. 6.** Достоверные пики притока древесного угля и временной ряд частоты пожаров.

1 – максимальное содержание частиц угля, выпадавшее на 1 см<sup>2</sup> в год (пиковое значение); 2 – все истинные пики угля (пожарные эпизоды, которые были в близкой локализации к месту исследования); 3 – пики, не соответствующие пороговым значениям; 4 – временной ряд частоты пожаров.

и теплым, т. н. Таймырское потепление (Кинд, 1974). Он характеризуется январскими и июльскими температурами воздуха выше современных на 2–3 °С, а также сокращением количества осадков на 100 мм в холодный период и на 70 мм – в теплый (Кошкаров, Кошкарлова, 2003). Сокращение осадков, вероятно, способствовало пожарной обстановке, что нашло отклик в первом пожарном эпизоде – 11600 кал. л. н.

Наибольший фоновый приток макрочастиц угля, отмеченный во время 10 500–9700 кал. л. н. (см. рис. 5, а) и пик в 10 500 кал. л. н. (см. рис. 5, б), может быть откликом на первое раннеголоценовое потепление (10 300–9800 л. н.). Этот период времени в Приенисейской Сибири характеризуется повышением суммы среднемесячных температур за вегетационный период не менее чем на 8–10 °С по сравнению с современной (Кошкаров, Кошкарлова, 2003).

Между первым и вторым периодами высокой пожарной активности выделяется интервал времени (9890–8500 кал. л. н.), характеризующийся отсутствием фонового притока макрочастиц угля. В это время на болоте в составе растительности сократилась доля древесных и началось развитие разнотравно-осоковых сообществ с осоками топяной (*Carex limosa* L.), носиковой (*C. rostrata* Stokes), волосистоплодной (*C. lasiocarpa* Ehrh.), дернистой (*C. cespitosa* L.) при болотном увлажнении (до 95–97-й ступени). Этот отрезок голоцена известен как Питско-Игаркинское похолодание (Кинд, 1974). Возможно, слабая пожарная активность или полное

отсутствие пожаров на суходолах, окружающих болото, были связаны с прохладным и влажным климатом этого периода времени.

Второй период высокой пожарной активности длился с 8250 по 7250 кал. л. н., его начало пришлось на так называемое «сухое похолодание», широко известное для Северного полушария (Bond et al. 2001; Mayewski et al. 2004). Фоновый приток макрочастиц угля был аналогичен первому периоду и не превышал пяти частиц на 1 см<sup>2</sup> в год. Отмечен пожарный эпизод около 7800 кал. л. н., произошедший непосредственно на болоте, на что указывает пиковая величина до 6000 частиц (рис. 6), и наличие пироженных прослоек в стратиграфии торфяной залежи (см. табл. 2). По нашему мнению, пожар на болоте был средней или низкой интенсивности (так как анатомическая структура растений-торфообразователей в пироженных прослойках хорошо идентифицируется). В результате пожара частично сгорел только кустарничково-моховый покров. Согласно результатам ботанического анализа торфа, пожару предшествовало снижение общей увлажненности на болоте (ступень 81–83 – сырлуговое увлажнение), восстановление древесного яруса и резкое снижение доли осок. После пожара нарастающее стабильное положение в составе растительного покрова занимает пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.). В ряде публикаций (Гришуткин, 2012; Напреенко-Дорохова, Напреенко, 2015; Бляхарчук и др., 2021) отмечается, что пушица влагалищная – один из первых видов, который

массово заселяет участки болот, пройденные пожарами, в том числе и довольно обводненные.

Третий пожарный период, длившийся с 6300 до 4000 кал. л. н. (3.05–2.35 м), включает три пожарных эпизода – 5900, 5450 и 4600 кал. л. н. (см. рис. 5, б, 5). Приток макрочастиц угля на протяжении первой половины периода аналогичен предыдущим, в конце периода (около 4600 кал. л. н.) отмечен резкий рост поступления частиц с пиковым значением до 5000 частиц/(см<sup>2</sup> · год) (рис. 6). Маломощные слои березового торфа в интервале глубин 295–285 см и 270–260 см свидетельствуют о том, что на болоте дважды происходило возобновление березовых древостоев (волокно торфа на 65–70 % образовано остатками древесины и коры березы и сосны). Лесная стадия развития болота также дважды была прервана пожарами – во время 5610 и 4890 кал. л. н. Как отмечалось М. А. Софроновым и А. В. Волокитиной (1986), несмотря на то что болота относятся к классу с редкой повторяемостью пожаров, в случае атмосферной засухи могут появиться благоприятные условия для их возникновения. По данным авторов, при опускании уровня грунтовых вод (УГВ) на 0.5–0.8 м происходит высыхание торфяного горизонта (содержание влаги менее 200 %). В нашем случае значение влажности (74–75-я ступень) показывает, что увлажненность болота в эти отрезки голоцена была наименьшей за всю историю его формирования. В периоды, близкие к пожарным эпизодам, в составе растительного покрова болота отмечено появление, порой в значительном количестве, сфагнового мха. Так, в интервале глубин 3.10–3.00 м (6650–5900 кал. л. н.) сфагнум центральный (*Sphagnum centrale* С. Е. О. Jensen), который произрастает на кочках и микроповышениях, занимал 10 % покрытия, а в интервале глубин 2.85–2.70 м (5460–5030 кал. л. н.) он уже доминирует в растительном покрове болота (60–90 %). Как отмечалось ранее (Софронов, Вакуров, 1981; Валендик, 1990), в сильные засухи, когда болото пересыхает, сфагновый мох, подстилка и торф могут быть проводниками огня.

Необходимо отметить, что известный для голоцена суббореальный термический максимум (3700–3000 кал. л. н.), нашедший отклик в некоторых палеоархивах Приенисейской Сибири, в том числе и пожарными сигналами (Кошкар, Кошкар, 2003; Гренадерова и др., 2021), в торфяной залежи «Зотино, ВБ7-3» отмечен пиками, которые не соответствуют пороговым значениям (рис. 6, 3). Следовательно, в этот период

времени на суходолах, окружающих болото, не было пожаров или они были очень слабыми. Отсутствие пирогенных прослоек в верхней части торфяной залежи, сформированной в позднеголоценовое время, свидетельствует о том, что в это время и на болоте не было пожаров, что можно объяснить высоким УГВ по сравнению с предыдущим периодом (90–92-я ступени – болотно-луговое увлажнение).

Четвёртый пожарный период продолжался с 2400 кал. л. н. и до настоящего времени. Он включал три пожарных эпизода: 1900, 1200 и 250 кал. л. н., характеризуется низким, но стабильным фоновым притоком макрочастиц угля. Пожарный эпизод 1200 кал. л. н. отличается высоким значением пиковой величины – около 1000 частиц/(см<sup>2</sup> · год) (рис. 6). Причиной высокой пожарной активности мог стать континентальный климат малого климатического оптимума голоцена – XIII–VIII вв. (Хотинский, 1977). Заключительный пожарный эпизод на суходолах, окружающих исследованное болото, имел место около 250 кал. л. н. Его причиной мог быть антропогенный фактор. Так, по данным М. Ф. Елизарьевой (1964), ягельные боры в недалеком прошлом активно использовались местным населением (кетами, эвенками) в качестве пастбищ для оленей, что приводило к пожарам, которыми были охвачены большие площади в правобережье нижнего течения р. Дубчес. Сухостой сосны с пожарными подсушинами на болоте свидетельствует о том, что и в современное время в годы с исключительно высокой степенью засухи беглые низовые пожары захватывали периферийную часть исследованного болота, но они не смогли оказать существенного влияния на его развитие.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе стратиграфии, радиоуглеродного датирования содержания макроскопических частиц угля и пирологических прослоек в торфяной залежи реконструирована долговременная динамика (аллеред-субатлантика) локальных пожаров в долине нижнего течения р. Дубчес.

Реконструировано четыре периода, которые характеризуются наибольшей частотой возгораний: около 12 000–10 000, 8250–7250, 6300–4000, 2400 кал. л. н. – по настоящее время. Установлено, что локальные пожары имели место как в раннем, так и в позднем голоцене. Однако наибольшей пожарной активностью, отмеченной максимальным фоновым притоком макрочастиц

угля в торфяные отложения, отличаются аллеред, предбореал, начало бореала и атлантика. Об этом свидетельствуют семь зафиксированных пожарных эпизодов, которые пришлись на следующие даты: 11 600, 11 150, 10 500, 7800, 5900, 5450, 4600 кал. л. н. Отмечено, что повышенная пожарная активность была тесно связана с сухими климатическими условиями этих временных отрезков голоцена. В суббореальный период пожарная активность снизилась, о чем свидетельствует низкое обилие макроугольков в торфяной колонке. В субатлантическом периоде отмечено три пожарных эпизода: 1900, 1200 и 250 кал. л. н., последний из которых мы связываем с антропогенным фактором.

Низовые пожары слабой и средней интенсивности на болоте в конце бореального и в атлантический периоды способствовали активизации лесообразовательного процесса. Причиной этого, как отмечали ранее Т. Т. Ефремова и С. П. Ефремов (1994), является значительное уплотнение торфяного горизонта, «что сопровождается возрастанием общих запасов золы и биогенных элементов», способствуя тем самым «евтрофикации экотопа». По мнению авторов, в результате зазольнения торфяной почвы «в первом десятилетии после пожара отмечается стадия пушистоберезовой чащи с некоторой долей участия новых зарослей» (с. 28).

В суббореальном и субатлантическом периодах после олиготрофизации и поднятия уровня грунтовых вод произошла гибель березового и возобновление соснового древостоя, замыкающего цикл развития болота.

Проведенные исследования могут служить еще одним подтверждением уже существующих представлений о том, что повышенная пожарная активность, выраженная увеличением концентрации частиц угля в торфяных и озерных отложениях, связана с наиболее сухими климатическими условиями раннего и среднего голоцена. Торфяная колонка «Зотино, ВБ7-3» имеет очень древний возраст  $11\,802 \pm 52$  кал. л. н. и поэтому может являться эталонным разрезом для различных палеорекопструкций в средней тайге Западной и Приенисейской Сибири.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бляхарчук Т. А., Дегтярева М. А., Харденбрук М. ван. Голоценовая динамика лесных пожаров по данным макроуголькового анализа донных отложений болотного озера в окрестностях научной станции «Мухрино», Ханты-Мансийский автономный округ // Западно-

Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Шестого Международного полевого симпозиума. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2021. С. 161–163.

Валендик Э. Н. Борьба с крупными лесными пожарами. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 193 с.

Волкова В. С., Левина Т. П. Растительность голоцена Западной Сибири по палинологическим данным // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1982. С. 188–192.

Глебов Ф. З. Взаимоотношения леса и болота в таежной зоне. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 184 с.

ГОСТ 28245-89. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М.: ФГУП Стандартинформ, 2006. 7 с.

Гренадерова А. В., Мандрыка П. В., Сяокунь В., Сенотрусова П. О., Михайлова А. Б., Цянькунь Ц. Комплексные археолого-палеоэкологические исследования голоценового хроноряды в южной тайге Среднего Енисея // Stratum plus. Археология и культурная антропология. 2021. № 6. С. 299–313.

Гришуткин О. Г. Влияние пожаров 2010 года на болотные экосистемы Мордовского государственного природного заповедника // Тр. Мордов. гос. природ. заповед. им. П. Г. Смиловича. 2012. Вып. 10. С. 261–265.

Громцев А. Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. 238 с.

Давыденко Э. П. Охрана лесов от пожаров в США // Лесн. хоз-во. 1999. № 5. С. 46–49.

Елизарьева М. Ф. К изучению растительности низовьев р. Дубчеса (левого притока р. Енисея) // Растительный покров Красноярского края. Вып. I. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. С. 48–64.

Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология. 1994. № 5. С. 27–34.

Залесов С. В. Лесная пирология: учеб. пособ. Екатеринбург: УГЛТА, 1998. 296 с.

Иванова Г. А., Конард С. Г., Макрае Д. Д. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.

Инишева Л. И. Торфяные почвы: их генезис и классификация // Почвоведение. 2006. № 7. С. 781–786.

Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Генезис и история послеледникового развития лесного болота в долине р. Дубчес // Сиб. лесн. журн. 2018. № 5. С. 33–44.

Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Реконструкция пожаров в девственных лесах на междуречье Сым-Дубчес в голоцене // Сиб. лесн. журн. 2019. № 5. С. 61–69.

Кинд Н. В. Геохронология позднего антропогена по изотопным данным. М.: Наука, 1974. 255 с.

Кошкароев А. Д., Кошкароева В. Л. Развитие природной среды бассейна р. Кас в послеледниковый период // Палеогеография Средней Сибири. Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2003. Вып. 3. С. 38–43.

Кошкароева В. Л. Семенные флоры торфяников Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 121 с.

Курбатский Н. П. О механизме возникновения лесных пожаров от молний // Лесоведение. 1976. № 3. С. 95–98.

Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.

- Напреенко-Дорохова Т. В., Напреенко М. Г. Развитие природного комплекса Целау (по данным строения торфяной залежи) // Вестн. Балт. фед. ун-та им. И. Канта. 2015. № 1. С. 50–64.
- Нейштадт М. И. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 404 с.
- Пьявченко Н. И. Степень разложения торфа и методы ее определения. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1963. 55 с.
- Раменский Л. Г., Цаценкин И. А., Чижиков О. Н., Антипин Н. А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Гос. изд-во с.-х. лит-ры, 1956. 472 с.
- Софронов М. А., Вакуров А. Д. Огонь в лесу. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. 128 с.
- Софронов М. А., Волокитина А. В. Пожары в заболоченных лесах Западной Сибири // Гидроморфные лесоболотные экосистемы. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1986. С. 139–150.
- Фуряев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 253 с.
- Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии: Опыт трансконтин. корреляции этапов развития растительности и климата. М.: Наука, 1977. 197 с.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Ямских Г. Ю., Карпенко Л. В., Гренадерова А. В. Реконструкция сукцессий растительности и палеогидрологического режима болот (на примере торфяника в долине реки Касс) // Геогр. и природ. ресурсы. 2004. № 4. С. 128–134.
- Blaauw M. Methods and code for «classical» age-modelling of radiocarbon sequences // Quatern. Geochron. 2010. V. 5. Iss. 5. P. 512–518.
- Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M. N., Showers W., Hoffman S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // Science. 2001. V. 294. P. 2130–2136.
- Clark J. S. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling // Quatern. Res. 1988. N. 30. Iss. 1. P. 67–80.
- Clark J. S., Lynch J. A., Stocks B. J., Goldammer J. G. Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia // The Holocene. 1998. V. 8. Iss. 1. P. 19–29.
- Clark R. L. Point count estimation of charcoal in pollen preparations and thin sections of sediments // Pollen and Spores. 1982. V. 24. P. 523–535.
- Edwards M. E., Hardenbroek M. van, Anderson P. M., Bigelow N. H. Palaeoenvironmental records from Siberia and the Russian Far East – contributions from DIMA Network members – Introduction // Boreas. 2021. V. 50. P. 916–918.
- Higuera P. E., Peters M. E., Brubaker L. B., Gavin D. G. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model // Quatern. Sci. Rev. 2007. V. 26. P. 1790–1809.
- Higuera P. E. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Montana St. Univ., Bozeman, MT, USA, 2009. 27 p.
- Loope L. L., Gruell G. E. The ecological role of fire in the Jackson Hole area, Northwestern Wyoming // Quatern. Res. 1973. V. 3. Iss. 3. P. 425–443.
- Long C. J., Whitlock C. L., Bartlein P. J., Millsaugh S. H. A 9000-year fire history from the Oregon Coast Range, based on a high-resolution charcoal study // Can. J. For. Res. 1998. V. 28. P. 774–787.
- Mayewski P. A., Rohling E. E., Stager J. C., Karlén W., Maasch K. A., Meeker L. D., Meyerson E. A., Gasse F., Kreveld S. van, Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R. Holocene climate variability // Quatern. Res. 2004. V. 62. Iss. 3. P. 243–255.
- Mikhailova A. B., Grenaderova A. V., Kurina I. V., Shumilovskikh L. S., Stojko T. G. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia // Boreas. 2021. V. 50. Iss. 4. P. 948–966.
- Peters M. E., Higuera P. E. Quantifying the source area of macroscopic charcoal with a particle dispersal model // Quatern. Res. 2007. V. 67. P. 304–310.
- R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2013. 437 p.
- Steinhof A., Altenburg M., Machts H. Sample preparation at the Jena <sup>14</sup>C laboratory // Radiocarbon. 2017. V. 59. N. 3. P. 815–830.

## RECONSTRUCTION OF HOLOCENE LOCAL FIRES ACCORDING TO THE MACROCHARCOALS CONTENT FROM THE PEAT DEPOSITS IN THE DUBCHES RIVER VALLEY

L. V. Karpenko<sup>1</sup>, A. V. Grenaderova<sup>2</sup>, A. B. Mikhailova<sup>2</sup>, O. V. Podobueva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: karp@ksc.krasn.ru, agrenadyorova@sfu-kras.ru, arodionova@sfu-kras.ru, olga.podobueva@mail.ru

The results of the local fires reconstruction based on the stratigraphic analysis of the peat deposit in the right-bank part of the Dubches River valley (middle taiga of the Yenisei Siberia) in the Holocene are presented. The object of research was the raised pine-shrub-sphagnum bog with a well-developed tree layer with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The deposit thickness was 4.15 m, its age was interpreted by 11 radiocarbon dates. The bottom peat layer age was  $11802 \pm 52$  <sup>14</sup>C years ago. In a peat core at depths of 3.25, 3.15, 2.90, 2.65 m, traces of fires were found in the form of pyrogenic layers. Reconstruction of the fire dynamics was carried out according to the method of counting macroscopic particles of charcoal “Charcoal”. The time, periodicity and intensity of fires on dry areas surrounding the bog have been established. Four periods were identified in the dynamics of local fires: about 12000–10000, 8250–7250, 6300–4000, 2400 cal. a BP (calibrated age before present). The reliable peaks of charcoal inflow occurred on the following dates: 11600, 11150, 10500, 7800, 5900, 5450, 4600, 1900, 1200 and 250 cal. a BP. It is noted that the highest fire activity was observed in the early Holocene, as evidenced by the increased content of macrocharcoals in peat. The main cause of the fires was probably the abnormally dry spring-summer seasons due to the dry and warm climate. The bog was traversed by fire during: 7790, 7030, 5610 and 4890 cal. a BP. The pyrogenic destruction of peat was minimal, which indicated a weak or medium intensity of the peat fire. Fires in the bog contributed to the activation of the forest formation process. In the late Holocene, the effect of fires on the bog ceased and forest phytocenoses were replaced by heavily watered ridge-hollow complexes.

**Keywords:** mire, macrocoal analysis, pyrogenic layers, charcoal inflow peaks, fire dynamics.

**How to cite:** Karpenko L. V., Grenaderova A. V., Mikhailova A. B., Podobueva O. V. Reconstruction of Holocene local fires according to the macrocharcoals content from the peat deposits in the Dubches river valley // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 3–13 (in Russian with English abstract).

УДК 504.064.36:550.4:631.445.12

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОРФЯНЫХ ПОЧВ БОЛОТНЫХ ЕЛЬНИКОВ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

Т. Т. Ефремова<sup>1</sup>, О. А. Шапченкова<sup>1</sup>, С. П. Ефремов<sup>1</sup>, А. Ф. Аврова<sup>1</sup>, М. В. Седельников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, mike.sedelnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

Исследованы лесные торфяные почвы заболоченных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Выявлено сильное варьирование ( $C_v$  42–88 %) содержания макро- и микроэлементов в слое современных почв (0–30 см). Средневзвешенное количество (с учетом мощности горизонтов почв и площадей торфяных массивов) в пределах орографического профиля 1087–573 м н. у. м. составляет (мг/кг):  $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$ . Методами многомерного статистического анализа выполнено структурирование торфяных почв по содержанию зольных элементов в три кластера, соответствующие высотным отметкам 1087, 832–622, 573 м н. у. м. Наибольшими дискриминирующими возможностями обладают Zn и Fe (82.6 %). Меньшую долю различия обеспечивают Cu, Ni (17.4 %). Топографические ряды долинных торфяных почв определяются гидрогеохимической зональностью подземных вод, а также выносом элементов латеральными миграционными потоками. Впервые статистически обоснованы границы высотных поясов торфяных почв по содержанию минеральных элементов и охарактеризован геохимический состав выделенных экотопических рядов (кластеров) почв. В почвах автономного ландшафта (высокогорья) аккумулируется только Pb и Cd. По сравнению с ним в кластере почв среднегорья количество большинства зольных элементов увеличивается в среднем в 2 раза. В низкогорье интенсивность аккумуляции несколько ослабевает. В почвенном профиле радиальная геохимическая миграция Fe как характерного элемента болот с большей силой положительно связана с зольностью торфяного субстрата, Sr – с реакцией среды, Cu и Mn – с фульвокислотами. В текущий период не выявлено техногенной деградации торфяных почв восточных отрогов Кузнецкого Алатау. Эколого-геохимические особенности горных торфяных почв согласуются с характеристикой естественных биогеохимических провинций юга Центральной Сибири, в пределах которых они развиваются.

**Ключевые слова:** горные торфяные почвы, геохимия элементов, загрязнение, формализованное структурирование, многомерный статистический анализ.

DOI: 10.15372/SJFS20220402

### ВВЕДЕНИЕ

Мощное антропогенное вмешательство в эволюционное развитие биосферы и прогрессирующее ухудшение природной среды привело к осознанию того, что регенерационные механизмы геосистем, слагающих биосферу, уже не справляются с прессингом разнообразных промышленных производств (Теплицын, Ваймер, 2005). Особого внимания требуют почвы

городских территорий, слаборазвитые и гидроморфные (Водяницкий, 2008). В этой связи тщательного исследования заслуживает геохимическая летопись слабо изученных болот Алтае-Саянской горной страны. Разграничение тяжелых металлов на различные весовые доли в зависимости от зоны локализации и гипсометрических уровней дает ценную информацию для понимания ландшафтных, климатических изменений, антропогенного воздействия на от-

даленные горные районы и помогает реконструировать историю загрязнения компонентов природной среды техногенными выбросами (Сысо, 1996; Shotyk, 1996; Инишева, Цыбукова, 1999; Bindler, 2006; Jia et al., 2006; Ефремова, Ефремов, 2014; Efremova, Efremov, 2014; Кашулина, 2017; Kashulina, 2017; Bao et al., 2018, 2019; Pratte et al., 2018; Захарихина, Литвиненко, 2019; и др.). Горные торфяники юга Сибири «гасят» аэротехногенные выбросы предприятий (цветная металлургия, горнодобывающие отрасли угля, рудного золота и т. д.) и выполняют важную биогеохимическую функцию сохранения качества вод сибирских рек, истоки которых лежат в болотах этой горной территории.

Публикации по геохимии горных болотных экосистем немногочисленны. Торфяные почвы горной тайги Западного Саяна по сравнению с торфами южной лесостепи Минусинской котловины обеднены Ca, Ba, Sr, Fe, Cr, U, V и обогащены Yb, Cs, Lu, а концентрация золота в торфяных залежах Восточно-Саянского золотоносного района в отдельных слоях превышает кларк литосферы в 50 раз (Шарафутдинов, 2006). В высокогорных болотах западного макросклона Кузнецкого Алатау выявлено техногенное накопление в верхних слоях торфяной залежи 3–5 (8) см наиболее опасных загрязнителей природной среды: Hg – до 40 мг/кг, Pb – 35.5, Zn – 33.6 мг/кг в результате поступления с влагоносными воздушными массами промышленного Кузбасса (Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010). Такие результаты соответствуют представлению, что высокогорные торфяники в большей мере подвержены накоплению поллютантов, привносимых с дальних расстояний, тогда как торфяники низких высот отражают преимущественно местные геохимические особенности (Bao et al., 2019). В этом аспекте сведений о макро- и микроэлементной неоднородности горных торфяных массивов с позиции геохимической сопряженности повышенных и пониженных элементов горного рельефа практически не содержится. Важнейшей характеристикой физико-географического облика гор является, как известно, структура вертикальных почвенных поясов, в которых торфяные почвы, как правило, не представлены. Объективная организация почв заболоченных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау в связи с градиентами высот выполнена к настоящему времени по кислотно-основным показателям и гумусному состоянию (Ефремова и др., 2019; Efremova et al., 2019).

Цель настоящей работы – выполнить формализованное разграничение (кластеризацию) торфяных почв по содержанию зольных элементов в пределах орографического профиля, охарактеризовать особенности геохимического состава выделенных кластеров и оценить экологическое состояние почв.

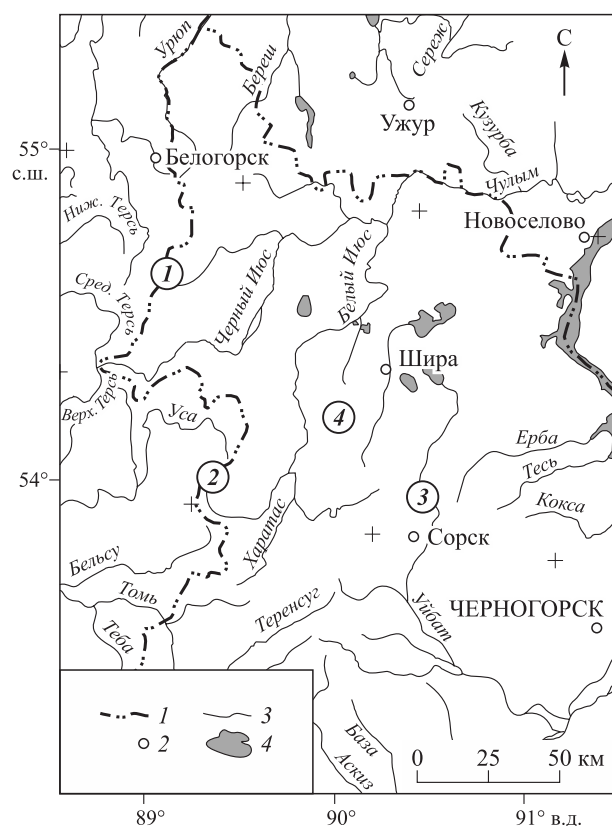
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены горные торфяные почвы заболоченных речных долин (бассейны рек Белый и Черный Июс) на различных гипсометрических уровнях восточного макросклона Кузнецкого Алатау – части Алтае-Саянской горной страны. Орографический профиль восточных отрогов Кузнецкого Алатау характеризуется преимущественно низкорным и среднегорным рельефом высотой 400–800 м и отдельными хребтами, не превышающими 1500 м (Воскресенский, 1962).

Болотные экосистемы различных высотных поясов питаются, как известно, преимущественно подземными водами, разгрузка которых происходит обычно по горным склонам и речным долинам, которые, как правило, заболочены и покрыты в основном ельниками с незначительным участием лиственницы и кедра преимущественно гипново-зеленомошной группы типов леса. Класс бонитета V–Va. Степень проективного покрытия торфяного массива мхами – 100 %. Преобладают смешанные сообщества гилокомиума блестящего (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), аулакомниума вздутого (*Aulacomnium turgidum* (Walenb.) Schwägr.) и болотного (*A. palustre* (Hedw.) Schwägr.), а также монодоминантные сообщества томентгипнума блестящего (*Tomenthypnum nitens* (Hedw.) Loeske).

Исследуемые торфяные массивы поименованы по названию рек, в долинах которых они формируются (рис. 1).

В высокогорной заболоченной долине р. Пихтерек (1087 м н. у. м.) залегает торфяной массив площадью 0.83 тыс. га. Географические координаты отбора почвенных образцов: 54°05'17" с. ш., 89°05'49" в. д. Торфяной массив Бюря (0.65 тыс. га) сформирован на высоте 832 м н. у. м.: 54°07'41" с. ш., 90°15'31" в. д., Тунгужуль (1.77 тыс. га) – на абсолютной отметке 622 м: 54°16'32" с. ш., 89°39'02" в. д., Печище (0.62 тыс. га) – на уровне 573 м: 54°57'54" с. ш., 89°18'08" в. д.



**Рис. 1.** Карта-схема расположения горных торфяных массивов.

Абсолютные высоты, м: 1 – Пихтерек, 1087; 2 – Бюра, 832; 3 – Тунгузюль, 622; 4 – Печище, 573.

В пределах восточного макросклона Кузнецкого Алатау по кислотно-основным свойствам выделены следующие геохимические ассоциации торфяных почв (Ефремова и др., 2018): кислые по всему профилю олиготрофные и олиго-мезотрофные на абсолютных высотах 1500–1100 м (массив Пихтерек), слабокислые мезоэутрофные на высотах 1100–800 м (массив Бюра), нейтральные эутрофные на абсолютных высотах 800–500 м (массивы Тунгузюль и Печище). Для отбора образцов почв вырезались торфяные монолиты размером 25 × 25 × 30 (40) см, которые подразделялись на горизонты. На каждом объекте отобрано по 3–4 монолита сообразно доминирующим растительным ассоциациям. Валовое содержание макро- и микроэлементов в торфяном субстрате определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре МГА-915 МД (Россия) (Методика..., 2009), физико-химические показатели – по общепринятым в почвоведении методам (Аринушкина, 1970). Классификация почв выполнена по принципу насыщенности основаниями (Пьявченко, Корнилова, 1978). Многомерный статистический анализ проведен в программах Excel и Statistica 6 (Халафян, 2007).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В границах абсолютных высот 1087–573 м восточного макросклона Кузнецкого Алатау в современных (корнеобитаемых) торфяных почвах (0–30 см) содержание макро- и микроэлементов сильно варьирует ( $C_v$  42–88 %). Средневзвешенное количество (с учетом мощности горизонтов почв и площадей торфяных массивов) составляет:  $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$ , мг/кг. Большинство макро- и микроэлементов тесно положительно взаимосвязаны между собой и зольностью торфа (табл. 1), Ni, Fe, Co, Al, Cr – дополнительно со степенью гумификации (сумма гуминовых и фульвокислот), Sr, Co, Al – с pH, исключение – Zn, Cd и Pb, которые не связаны как с переменными, так и друг с другом. Коррелированность многих перечисленных металлов и сходное ранжирование по содержанию выявлена также в торфяных болотах горы Чанбай (высота более 900 м н. у. м.) на территории Китая (Jia et al., 2006).

Высокая вариабельность и коррелированность химических элементов торфяных почв разных высотных поясов горного профиля обусловила целесообразность их группировки методом кластерного анализа. На дендрограмме объекты Пихтерек и Печище можно классифицировать как самостоятельные кластеры (рис. 2, а).

Объединились массивы Бюра и Тунгузюль, почвы которых наиболее близки по свойствам. Достоверность межгрупповых различий оценили с помощью дискриминантного анализа. Судя по расстоянию Махаланобиса и  $p$ -уровню значимости, сгруппированные классы почв достоверно отличаются друг от друга (табл. 2).

Итоговый результат корректно классифицированных наблюдений составляет 95 %.

Методом многомерного шкалирования (как средством визуализации) адекватно воспроизвели наблюдаемые расстояния Махаланобиса в пространстве меньшей размерности (на плоскости). Ясность полученной конфигурации точек на диаграмме указывает на высокое качество согласия с воспроизводимой группировкой торфяных почв на абсолютных высотных отметках: 1087 м – высокогорье, 832–622 – среднегорье, 573 м – низкогорье (рис. 2, б). Градация гипсометрических уровней условная и практически совпадает с высотно-поясным спектром растительного покрова: выше 1100 м – высокогорье, 800–1100 – среднегорье, 550–600 м – низкогорье (Бочарников, Исмаилова, 2011).

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции Спирмена макро- и микроэлементов и химических показателей горных торфяных почв

| Элемент | Sr          | Zn    | Cu          | Ni          | Pb    | Cd    | Fe          | Mn          | Co          | Al          | Cr          | З           | СГ          | pH          |
|---------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sr      |             | -0.05 | 0.30        | 0.51        | -0.45 | 0.05  | <b>0.54</b> | <b>0.56</b> | <b>0.63</b> | <b>0.64</b> | 0.26        | <b>0.73</b> | 0.15        | <b>0.90</b> |
| Zn      | -0.05       |       | 0.42        | 0.05        | 0.13  | 0.23  | -0.06       | 0.32        | 0.09        | 0.14        | -0.05       | -0.07       | -0.50       | -0.10       |
| Cu      | 0.30        | 0.42  |             | <b>0.75</b> | -0.01 | -0.11 | <b>0.67</b> | <b>0.91</b> | <b>0.76</b> | <b>0.71</b> | <b>0.61</b> | <b>0.62</b> | 0.38        | 0.29        |
| Ni      | 0.51        | 0.05  | <b>0.75</b> |             | -0.13 | 0.23  | <b>0.98</b> | <b>0.82</b> | <b>0.94</b> | <b>0.89</b> | <b>0.91</b> | <b>0.92</b> | <b>0.70</b> | 0.44        |
| Pb      | -0.45       | 0.13  | -0.01       | -0.13       |       | 0.44  | -0.16       | -0.17       | -0.27       | -0.26       | 0.05        | -0.23       | 0.23        | -0.53       |
| Cd      | 0.05        | 0.23  | -0.11       | 0.23        | 0.44  |       | 0.24        | -0.05       | 0.12        | 0.16        | 0.34        | 0.26        | 0.18        | -0.07       |
| Fe      | <b>0.54</b> | -0.06 | <b>0.67</b> | <b>0.98</b> | -0.16 | 0.24  |             | <b>0.75</b> | <b>0.95</b> | <b>0.89</b> | <b>0.89</b> | <b>0.94</b> | <b>0.75</b> | 0.50        |
| Mn      | <b>0.56</b> | 0.32  | <b>0.91</b> | <b>0.82</b> | -0.17 | -0.05 | <b>0.75</b> |             | <b>0.85</b> | <b>0.79</b> | <b>0.63</b> | <b>0.73</b> | 0.40        | 0.46        |
| Co      | <b>0.63</b> | 0.09  | <b>0.76</b> | <b>0.94</b> | -0.27 | 0.12  | <b>0.95</b> | <b>0.85</b> |             | 0.94        | 0.79        | 0.92        | 0.59        | 0.57        |
| Al      | <b>0.64</b> | 0.14  | <b>0.71</b> | <b>0.89</b> | -0.26 | 0.16  | <b>0.89</b> | <b>0.79</b> | <b>0.94</b> |             | 0.73        | 0.89        | 0.54        | 0.61        |
| Cr      | 0.26        | -0.05 | <b>0.61</b> | <b>0.91</b> | 0.05  | 0.34  | <b>0.89</b> | <b>0.63</b> | <b>0.79</b> | <b>0.73</b> |             | <b>0.78</b> | <b>0.78</b> | 0.17        |
| З       | <b>0.73</b> | -0.07 | <b>0.62</b> | <b>0.92</b> | -0.23 | 0.26  | <b>0.94</b> | <b>0.73</b> | <b>0.92</b> | <b>0.89</b> | <b>0.78</b> |             | 0.64        | 0.71        |
| СГ      | 0.15        | -0.50 | 0.38        | <b>0.70</b> | 0.23  | 0.18  | <b>0.75</b> | 0.40        | <b>0.59</b> | <b>0.54</b> | <b>0.78</b> | <b>0.64</b> |             | 0.12        |
| pH      | <b>0.90</b> | -0.10 | 0.29        | 0.44        | -0.53 | -0.07 | 0.50        | 0.46        | <b>0.57</b> | <b>0.61</b> | 0.17        | <b>0.71</b> | 0.12        |             |

Примечание. Полужирный шрифт – коэффициенты, значимые на уровне  $p < 0.05$ ; З – зольность; СГ – степень гумификации ( $\Sigma ГК + \Sigma ФК$ ).

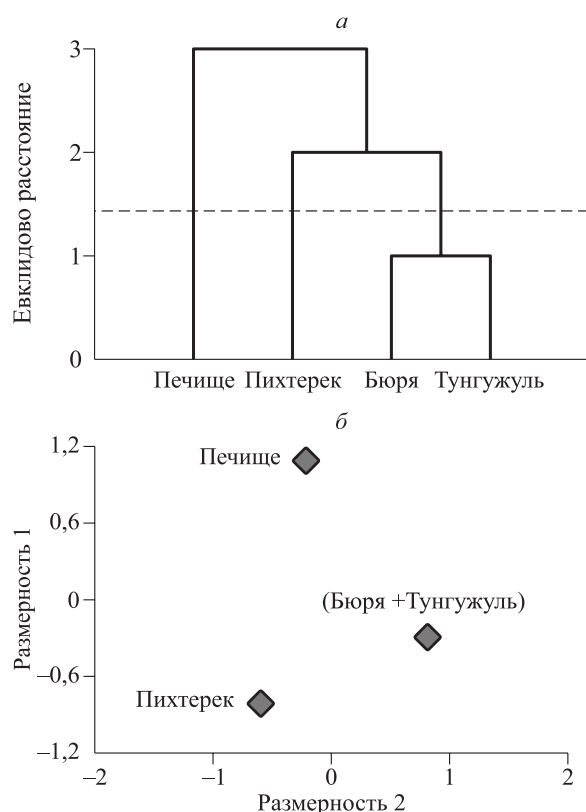
Для нахождения взаимосвязи между выделенными кластерами и содержанием металлов использовали канонический корреляционный анализ. Взвешенные суммы переменных из каждого множества определяют канонический

корень – некую «скрытую» переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных. Выделено два значимых канонических корня, судя по  $p$ -уровню  $< 0.001$  (табл. 3).

Наиболее тесная связь между множествами переменных обнаруживается с первым каноническим корнем. О лучшем разграничении кластеров торфяных почв по корню 1 свидетельствует также статистика  $\lambda$  Уилкса, которая, будучи обратной мерой, приближается к нулю.

Кумулятивная доля объясненной дисперсии первого корня составляет 82.6 %, второй обеспечивает меньшую долю различия – 17.4 % (табл. 4).

Стандартизованные коэффициенты определяют наибольшую долю или «вес» каждой переменной в значение дискриминантной функции (корня). Согласно критерию Кайзера, к рассмотрению принимались те стандартизованные коэффициенты, абсолютные значения которых больше 1 (Ким и др., 1989). В дискриминантную функцию (корня) 1 наибольший совокупный вклад вносят показатели Zn и Fe, в дискриминантную функцию 2 – Cu и Ni. Согласно структурным коэффициентам, первая функция в большей мере связана с Zn, вторая – с Cu. Преимущественный вклад этих металлов в систематизацию торфяных почв согласуется с избыточной обеспеченностью Zn и Cu Тигиртишской биогеохимической провинции рудных полей Центральной Сибири, в пределах которой расположены исследуемые объекты, и соответству-



**Рис. 2.** Кластеризация почв горных торфяных массивов по содержанию Al и тяжелых металлов (а), размещение на плоскости в многомерном пространстве признаков (б).

**Таблица 2.** Оценка методом дискриминантного анализа межгрупповой дисперсии кластеров торфяных почв

| Торфяные массивы         | Квадраты расстояний<br>Махаланобиса |         |    | Матрица классификации, количество корректно<br>классифицированных наблюдений |                     |       |    |
|--------------------------|-------------------------------------|---------|----|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|----|
|                          | $p$ -уровни значимости              |         |    | %                                                                            | число               |       |    |
|                          | 1                                   | 2 + 3   | 4  |                                                                              | 1                   | 2 + 3 | 4  |
| Пихтерек – 1             |                                     | 13      | 61 | 89                                                                           | 16                  | 2     | 0  |
| Бюра + Тунгужуль – 2 + 3 | < 0.001                             |         | 35 | 96                                                                           | 1                   | 29    | 0  |
| Печище – 4               | < 0.001                             | < 0.001 |    | 100                                                                          | 0                   | 0     | 20 |
|                          |                                     |         |    | 95                                                                           | Итоги классификации |       |    |
|                          |                                     |         |    |                                                                              | 17                  | 31    | 20 |

Примечание. Над чертой – квадраты расстояний Махаланобиса, под чертой –  $p$ -уровни значимости различий.

**Таблица 3.** Собственные значения канонических дискриминантных функций (корней) и их статистическая значимость

| Дискриминантная<br>функция (корень) | Собственное<br>значение | Каноническая<br>корреляция, $R$ | $\lambda$ -Уилкса | $\chi^2$ -критерий | $p$ -уровень<br>значимости |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 0                                   | 7.729                   | 0.940                           | 0.043             | 106.44             | < 0.001                    |
| 1                                   | 1.622                   | 0.786                           | 0.381             | 32.78              | < 0.001                    |

ет наиболее высоким значениям азрогенного выпадения этих элементов на территории центральных, южных районов Красноярского края, а также Республики Хакасии,  $n \cdot 10^{-4}$  г/(м<sup>2</sup> в год): Cu – 20.8, Zn – 27.1 против Mo – 1.7, Pb – 5.5, Co – 1.8, Ni – 4.7 (Мирошников и др., 2003).

**Таблица 4.** Стандартизованные коэффициенты вклада химических элементов в дискриминантную функцию (корень) и структурные коэффициенты их корреляции с соответствующими корнями

| Химический<br>элемент       | Коэффициенты      |              |             |              |
|-----------------------------|-------------------|--------------|-------------|--------------|
|                             | стандартизованные |              | структурные |              |
|                             | Корень            |              |             |              |
|                             | 1                 | 2            | 1           | 2            |
| Sr                          | 0.76              | −0.90        | 0.15        | −0.17        |
| Zn                          | <b>1.55</b>       | 0.31         | <b>0.41</b> | 0.21         |
| Cu                          | −0.08             | <b>−1.62</b> | 0.21        | <b>−0.28</b> |
| Ni                          | 0.70              | <b>1.29</b>  | 0.15        | 0.22         |
| Pb                          | −0.56             | −0.64        | −0.14       | 0.00         |
| Cd                          | −0.55             | 0.50         | −0.10       | 0.20         |
| Fe                          | <b>−1.11</b>      | −0.79        | 0.12        | 0.09         |
| Mn                          | 0.62              | 0.38         | 0.19        | −0.19        |
| Co                          | 0.41              | 0.90         | 0.16        | 0.09         |
| Al                          | −0.04             | −0.12        | 0.18        | 0.21         |
| Cr                          | −0.10             | 0.30         | 0.06        | 0.09         |
| Накопленная<br>доля         | 0,826             | 1.0          |             |              |
| Объясненная<br>дисперсия, % | 82.6              | 17.4         |             |              |

Итак, получена новая статистически обоснованная информация пространственной дифференциации торфяных почв по составу минеральных элементов в пределах орографического профиля восточных отрогов Кузнецкого Алатау и определены высотные границы разграничения почв. Хронологическая организация торфяных почв согласуется в определенной мере с гидрогеохимической зональностью подземных вод горных территорий юга Сибири (Степанов, 1959; Ефремова и др., 2015). Так, торфяные почвы кластера Пихтерек (абсолютная отметка 1087 м н. у. м.) приурочены к зоне ультрапресных кислых гидрокарбонатных вод, состав катионов которых отличается большой пестротой. Торфяные массивы Бюра, Тунгужуль, Печище (800–573 м н. у. м.) формируются в зоне жестких слабокислых и слабощелочных гидрокарбонатно-кальциево-магниево-вод. Торфяные массивы различных ступеней рельефа Кузнецкого Алатау целесообразно характеризовать как парагенетические ассоциации, связанные между собой миграцией элементов от верхних гипсометрических ступеней рельефа к нижним (Глазовская, 1964). На высотном уровне 832–622 м н. у. м. содержание большинства минеральных элементов увеличивается примерно в 2 раза (табл. 5). В нижележащие почвы интенсивность миграции несколько ослабевает. В торфяных почвах гипсометрического уровня 573 м н. у. м. содержится почти в 4 раза больше Zn, Co, Al, в 2–3 раза – Sr, Cu, Ni,

**Таблица 5.** Содержание макро- и микроэлементов в кластерах современных торфяных почв орографического профиля восточных отрогов Кузнецкого Алатау, мг/кг

| Глубина, см                                                                    | Sr  | Zn   | Cu   | Ni   | Pb   | Cd   | Fe    | Mn    | Co  | Al    | Cr   |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-------|------|
| Кластер высококорных олиго-мезотрофных почв, 1087 м н. у. м.                   |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| <i>Торфяной массив Пихтерек</i>                                                |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| 0–6                                                                            | 170 | 30.9 | 8.6  | 6.6  | 9.1  | 0.30 | 4990  | 117.4 | 1.8 | 2844  | 13.7 |
| 6–15                                                                           | 121 | 19.6 | 6.5  | 8.4  | 12.5 | 0.43 | 6253  | 31.8  | 1.3 | 3734  | 18.7 |
| 15–30                                                                          | 105 | 4.1  | 3.6  | 4.2  | 2.1  | 0.09 | 2911  | 8.4   | 0.9 | 2168  | 6.0  |
| Средневзвешенное                                                               | 129 | 17.8 | 6.2  | 6.6  | 8.2  | 0.29 | 4845  | 47.7  | 1.3 | 2993  | 13.3 |
| Кластер среднегорных торфяных почв, 832–622 м н. у. м.                         |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| <i>Мезо-эуτροφные, торфяной массив Бюря</i>                                    |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| 0–5                                                                            | 78  | 62.5 | 13.9 | 4.8  | 8.3  | 0.12 | 1862  | 194   | 0.7 | 1192  | 7.1  |
| 5–10                                                                           | 125 | 68.8 | 18.9 | 7.9  | 11.0 | 0.25 | 5722  | 341   | 2.4 | 5122  | 11.3 |
| 10–15                                                                          | 174 | 40.5 | 23.5 | 12.4 | 7.4  | 0.22 | 11206 | 617   | 5.0 | 8349  | 17.5 |
| 15–20                                                                          | 237 | 30.8 | 29.5 | 16.1 | 3.8  | 0.08 | 18354 | 1200  | 6.9 | 9656  | 31.8 |
| Средневзвешенное                                                               | 162 | 47.7 | 22.2 | 11.0 | 7.3  | 0.17 | 10167 | 635   | 4.2 | 6607  | 18.1 |
| <i>Эуτροφные, торфяной массив Тунгужуль</i>                                    |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| 0–5                                                                            | 187 | 45.2 | 6.7  | 3.0  | 2.4  | 0.14 | 2780  | 113   | 0.7 | 1400  | 5.3  |
| 5–15                                                                           | 285 | 37.2 | 9.0  | 5.5  | 4.4  | 0.22 | 3610  | 236   | 1.5 | 5112  | 6.7  |
| 15–20                                                                          | 340 | 27.8 | 11.9 | 8.8  | 4.0  | 0.15 | 7420  | 280   | 3.1 | 9419  | 9.5  |
| 20–30                                                                          | 359 | 25.0 | 18.4 | 14.2 | 2.6  | 0.14 | 14518 | 575   | 5.9 | 12420 | 22.7 |
| Средневзвешенное                                                               | 302 | 34.3 | 12.2 | 8.5  | 2.5  | 0.17 | 7743  | 336   | 3.1 | 7647  | 12.3 |
| Средневзвешенное*                                                              | 232 | 41.0 | 17.2 | 9.8  | 4.9  | 0.17 | 8955  | 485   | 3.6 | 7127  | 15.2 |
| Кластер низкорных эуτροφных почв, 573 м н. у. м.                               |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| <i>Торфяной массив Печице</i>                                                  |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| 0–5                                                                            | 198 | 56.4 | 10.3 | 7.7  | 2.7  | 0.12 | 3896  | 312   | 1.9 | 4049  | 8.1  |
| 5–10                                                                           | 241 | 67.9 | 13.6 | 9.8  | 3.2  | 0.22 | 7378  | 483   | 3.0 | 6742  | 13.1 |
| 10–30                                                                          | 235 | 66.6 | 19.8 | 26.1 | 2.1  | 0.08 | 23506 | 403   | 9.5 | 20144 | 38.0 |
| Средневзвешенное                                                               | 227 | 64.4 | 15.9 | 17.4 | 2.5  | 0.24 | 14571 | 400   | 6.0 | 12770 | 24.3 |
| Статистическая оценка содержания металлов в торфяных почвах по градиенту высот |     |      |      |      |      |      |       |       |     |       |      |
| Средневзвешенное                                                               | 230 | 37.8 | 13.2 | 9.9  | 4.6  | 0.21 | 8623  | 335   | 3.4 | 7295  | 15.4 |
| Ошибка среднего                                                                | 38  | 9.9  | 3.4  | 2.4  | 1.5  | 0.03 | 2058  | 121   | 1.0 | 2019  | 2.8  |
| Медиана                                                                        | 195 | 41.0 | 14.1 | 9.8  | 4.9  | 0.20 | 8955  | 368   | 3.6 | 7127  | 15.7 |
| Минимум                                                                        | 129 | 17.8 | 6.2  | 6.6  | 2.5  | 0.17 | 4845  | 48    | 1.3 | 2993  | 12.3 |
| Максимум                                                                       | 302 | 64.4 | 22.2 | 17.4 | 8.2  | 0.29 | 14571 | 635   | 6.0 | 12770 | 24.3 |

\* Среднее для кластера среднегорных почв в целом.

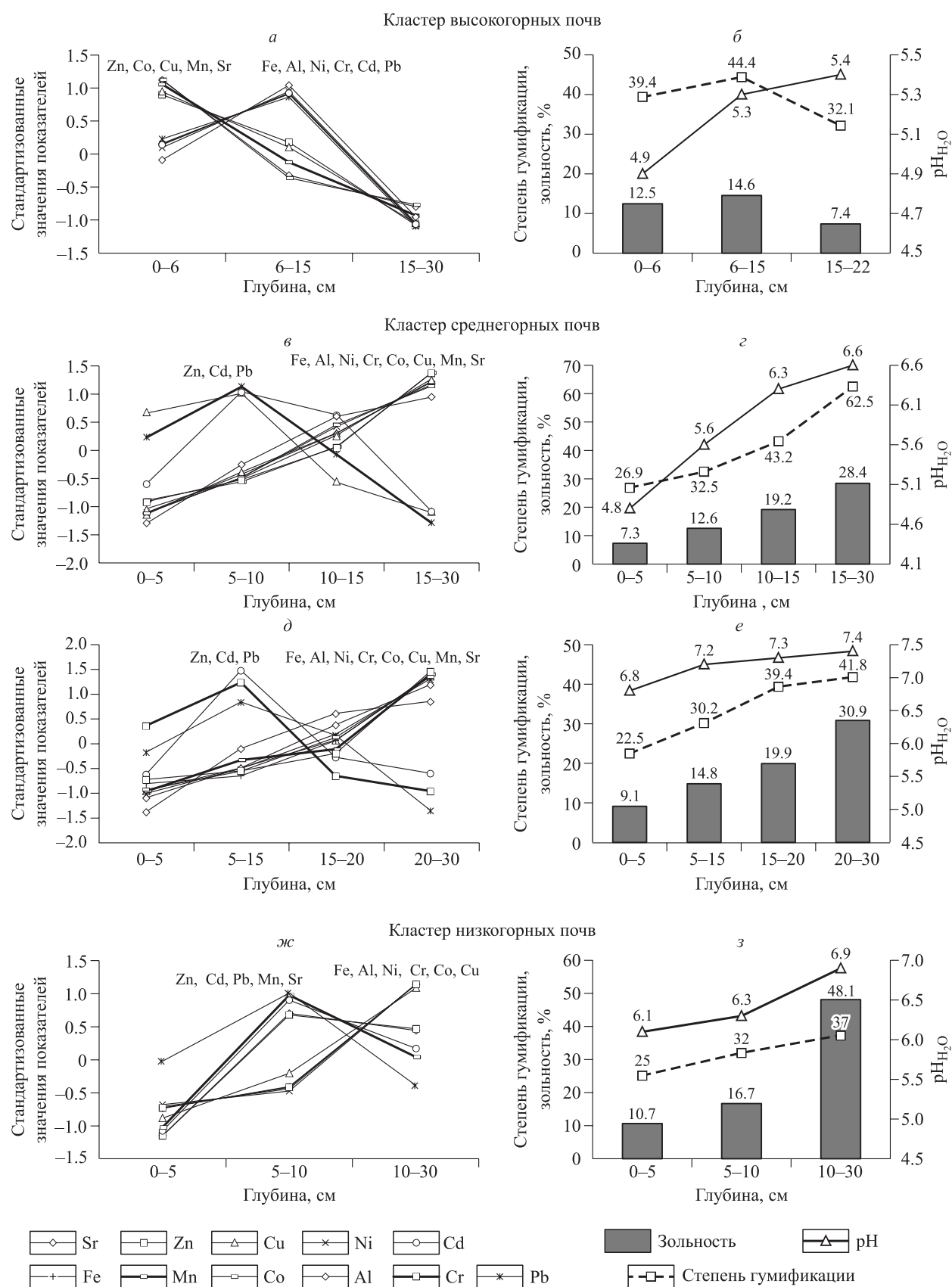
Fe, Cr по сравнению с 1087 м н. у. м. В почвах высокогорного кластера содержится в 2–3 раза больше Cd и Pb. На всех высотных уровнях они аккумулируются в слое 0–6 (15) см. В горах Юра (Швейцария), Чанбай и Фэнхуан (северо-восток Китая) Cd, Pb, Cu, Zn также концентрируются в верхних горизонтах торфяных залежей относительно глубоких частей профиля (Shotyk, 1996; Jia et al., 2006; Bao et al., 2018).

Накопление Pb, Sn, Cd, Zn и Sb в поверхностных слоях торфяных залежей связывают в основном с лесными пожарами и атмосферным переносом загрязнителей с дальних расстояний

(Gerdol, Bragazza, 2006; Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010; Богуш и др., 2019; Bogush et al., 2019; Bao et al., 2019).

В торфяных почвах Кузнецкого Алатау, это, вероятнее всего, результат техногенной воздушной миграции со стороны Кузбасского каменно-угольного бассейна, Сорского молибденового комбината и благоприятных кислотно-основных условий почвенной среды (в нейтральной и щелочной среде эти элементы малоподвижны).

В профиле торфяных почв различных гипсометрических уровней миграция макро- и микроэлементов определяется едиными факторами.



**Рис. 3.** Распределение металлов и химических показателей в почвенном профиле высокогорных олиго-мезотрофных (а и б соответственно), среднегорных мезо-эутрофных (в, д и г, е), низкогорных эутрофных (ж и з) почв.

Так, распределение парагенетической ассоциации Fe, Al, Ni, Cr, Co по профилю визуально соответствует тренду зольности, pH и степени гумификации торфяного субстрата (рис. 3). Известно, что минеральные компоненты активно вступают в многообразные взаимодействия с гумусовыми кислотами, образуя различные по составу сложные органоминеральные производные, которые выпадают в осадок на месте образования.

В этой связи в почвах средне- и низкогогорья содержание Fe, Al, Ni, Cr, Co вниз по профилю последовательно возрастает благодаря повышению степени гумификации, зольности и pH до нейтральной и даже слабощелочной, в условиях которой эти элементы малоподвижны. Зольность нижних горизонтов относительно верхних в 3–4 раза превышает конституционную (12 %) и свидетельствует о преимущественном вкладе абигенного фактора в накопление элементов. В олиготрофном кластере почв высокогорья на фоне кислой по всему профилю реакции среды количество макро- и микроэлементов резко снижается с глубиной подобно зольности, близкой к конституционной, и степени гумификации торфа вследствие влияния мерзлоты.

Совокупное воздействие физико-химических и биохимических показателей торфяных

почв на радиальную геохимическую дифференциацию металлов исследовали методом множественного регрессионного анализа.

Изучали связь Fe как характерного элемента болот и представителя устойчивой парагенетической ассоциации, а также Sr, Mn, Cu, миграция которых в почвах различных гипсометрических уровней несколько различается.

В качестве независимых признаков в модель включили показатели зольности, величину  $pH_{H_2O}$ , сумму гуминовых кислот ( $\Sigma Г К$ ) и сумму фульвокислот ( $\Sigma Ф К$ ). Построенные модели, судя по коэффициенту множественной детерминации ( $R^2 = 0.65–0.97$ ) и  $p$ -уровню значимости  $F$ -критерия ( $0.007 – < 0.001$ ), описывают высокую взаимосвязь показателей (табл. 6).

Силу влияния на функцию отдельных прогностических признаков оценивали по стандартизованным регрессионным коэффициентам beta в порядке убывания их значений. На радиальную геохимическую миграцию Fe наибольшее влияние оказывает зольность торфяного субстрата, Sr – реакция среды, Cu и Mn – фульвокислоты.

Острота экологических проблем в связи с масштабным хозяйственным освоением территорий юга Средней Сибири нарастает. Специфика производств (угольная и золотодобывающая

**Таблица 6.** Результаты множественного регрессионного анализа связи металлов и химических показателей горных торфяных почв

| Предикторы                                              | Beta  | Стандартная ошибка beta | Регрессионный коэффициент $b$ | Стандартная ошибка $b$ | $t$ -критерий Стьюдента | $p$ -уровень |
|---------------------------------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------|
| Железо                                                  |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Оценка модели: $R^2 = 0.97$ , $F = 241.1$ , $p < 0.001$ |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Константа                                               |       |                         | –6846.8                       | 1139.0                 | –6.0                    | $< 0.001$    |
| Зольность                                               | 0.89  | 0.05                    | 516.1                         | 27.2                   | 19.0                    | $< 0.001$    |
| $\Sigma Ф К$                                            | 0.24  | 0.05                    | 301.2                         | 60.2                   | 5.0                     | $< 0.001$    |
| Марганец                                                |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Оценка модели: $R^2 = 0.70$ , $F = 15.9$ , $p = 0.001$  |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Константа                                               |       |                         | –1613.3                       | 398.8                  | –4.0                    | 0.002        |
| $\Sigma Ф К$                                            | 0.77  | 0.15                    | 46.5                          | 9.4                    | 5.0                     | $< 0.001$    |
| pH                                                      | 0.50  | 0.15                    | 173.9                         | 53.7                   | 3.2                     | 0.008        |
| Медь                                                    |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Оценка модели: $R^2 = 0.65$ , $F = 7.1$ , $p < 0.007$   |       |                         |                               |                        |                         |              |
| $\Sigma Ф К$                                            | 0.87  | 0.25                    | 1.3                           | 0.4                    | 3.5                     | 0.007        |
| Стронций                                                |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Оценка модели: $R^2 = 0.86$ , $F = 28.3$ , $p < 0.001$  |       |                         |                               |                        |                         |              |
| Константа                                               |       |                         | –208.3                        | 81.2                   | –2.6                    | 0.028        |
| pH                                                      | 0.69  | 0.12                    | 66.7                          | 11.4                   | 5.8                     | $< 0.001$    |
| $\Sigma Г К$                                            | 0.51  | 0.16                    | 6.9                           | 2.1                    | 3.2                     | 0.009        |
| $\Sigma Ф К$                                            | –0.38 | 0.15                    | –6.4                          | 2.6                    | –2.5                    | 0.032        |

Примечание. В таблицу внесены только значимые параметры уравнения.

отрасль, цветная металлургия, интенсификация сельского хозяйства и др.), разработка которых отличается повышенным объемом антропогенных нагрузок на природную среду, вызывает необходимость мониторинга загрязнения окружающей среды.

Для оценки комплексного полиэлементного загрязнения горных торфяных почв использовали суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  (Сае́т и др., 1990; Перельман, Касимов, 1999):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (1)$$

где  $Z_c$  – суммарный показатель загрязнения;  $K_c$  – коэффициент техногенной концентрации больше 1;  $n$  – число элементов с  $K_c$  больше 1.

Техногенные концентрации определяют, как известно, относительно геохимического фона, который пока не разработан ни по регионам, ни по типам торфяных почв, что утверждают и другие авторы (Московченко, 2006; Безносиков и др., 2007; Beznosikov et al., 2007). В таком случае наиболее объективное представление о местном геохимическом фоне дает особенно часто встречающееся в выборке значение среднего содержания элемента (Добровольский, 1999). Такой подход позволил охарактеризовать природный фон тяжелых металлов и алюминия в торфяных почвах восточного макросклона Кузнецкого Алатау: Sr – 118, Zn – 38.3, Cu – 10.2, Ni – 7.6, Pb – 1.8, Cd – 0.15, Fe – 3700, Mn – 137, Co – 1.7, Cr – 8.1, Al – 3405 мг/кг. Большинство этих металлов входит в список нормируемых химических элементов, принятых в России, Канаде, США и Нидерландах для мониторинга качества почв и защиты окружающей среды (Семенов, Королева, 2019; Semenov, Koroleva, 2019).

Оценили также участие химического элемента в геохимической ассоциации  $M_c$ , % (Сорокина и др., 1984):

$$M_c = (K_c - 1) / Z_c \times 100 \%, \quad (2)$$

где  $K_c$  – коэффициент концентрации (аномальности) химического элемента;  $Z_c$  – суммарный показатель загрязнения.

Суммарный полиэлементный показатель загрязнения кластеров торфяных почв всех гипсометрических уровней характеризует допустимый уровень загрязнения тяжелыми металлами (табл. 7).

Однако в структуре геохимической ассоциации высокогорных почв преобладает доля высокотоксичных элементов и явно доминирует Pb (55 %). Тенденция показательна: повышенная концентрация Pb отмечается в высокогорных торфяниках западного макросклона Кузнецкого Алатау (Волкова и др., 2010; Volkova et al., 2010) и горах Китая (Pratte et al., 2018). Есть мнение, что опасность Pb, Cd, Zn в почвах, согласно ГОСТ 17.4.1.02-83, (ГОСТ 17.4.1.02-83, 2008), преувеличена по сравнению с общетоксикологическим подходом нидерландских экологов (Водяницкий и др., 2012; Vodyanitskii et al., 2012). Между тем свинец стабилен в органических почвах: средний срок его сохранения исчисляется от сотен до тысяч лет (Heinrichs, Mayer, 1977). В геохимической ассоциации торфяных почв среднегорья доля высокоопасных элементов-токсикантов снижается более чем в 4 раза. В условиях низкогогорья показатель загрязнения торфяных почв восточного макросклона достигает наибольших значений ( $Z_c = 18$ ). При этом существенно (почти в 8 раз) уменьшается вклад высокоопасных элементов.

Таким образом, на восточном склоне Кузнецкого Алатау не выявлено техногенной деградации торфяных почв. Такое заключение не противоречит оценке уровня загрязнения Тигиртишской биогеохимической провинции ( $Z_c$  14.2) Центральной Сибири, в пределах территории

**Таблица 7.** Оценка загрязнения тяжелыми металлами кластеров горных торфяных почв

| Ассоциации торфяных почв, геохимическая формула, %                                                                                                              | $Z_c$ | Элементы-токсиканты, % |                |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|----------------|------------------|
|                                                                                                                                                                 |       | $\sum$                 | высоко опасные | умеренно опасные |
| Кластер высокогорных олиго-мезотрофных почв<br>$Pb_{55}^I Cd_{14}^I Cr_{10}^{II} Sr_2^{III} Fe_5$                                                               | 7     | 81                     | 69             | 10               |
| Кластер среднегорных мезо-эуτροφных и эуτροφных почв<br>$Pb_{14}^I Cd_1^I Zn_1^I Cu_6^{II} Ni_2^{II} Co_9^{II} Cr_7^{II} Mn_{21}^{III} Sr_8^{III} Fe_{12} Al_9$ | 12    | 69                     | 16             | 24               |
| Кластер низкогогорных эуτροφных почв<br>$Pb_2^I Cd_3^I Zn_4^I Cu_3^{II} Ni_7^{II} Co_{14}^{II} Cr_{11}^{II} Mn_{11}^{III} Sr_5^{III} Fe_{17} Al_{16}$           | 17    | 60                     | 9              | 35               |

*Примечание.*  $Z_c$  – суммарный показатель загрязнения, верхний индекс химического элемента – класс опасности согласно ГОСТ 17.4.1.02-83 (2008).

которой залегают обсуждаемые торфяные массивы (Мирошников и др., 2003). Однако есть основание говорить о существовании реальной опасности загрязнения торфяных почв в недалеком будущем. Величина  $Z_c$  в низкогорном поясе приближается к нижней границе среднего умеренноопасного уровня загрязнения тяжелыми металлами ( $Z_c$  16–32). Высокая доля Pb в суммарном показателе загрязнения высокогорных районов также свидетельствует о повышенном экологическом риске.

## ВЫВОДЫ

Средневзвешенное содержание макро- и микроэлементов в торфяных почвах восточных отрогов Кузнецкого Алатау составляет, мг/кг:  $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$  и по градиенту абсолютных высот (1087–573 м н. у. м.) сильно варьирует (Cv 42–88 %). Впервые методами многомерного статистического анализа выполнено формализованное разбиение торфяных почв в три кластера по гипсометрическим уровням: высокогорье – 1087 м, среднегорье 832–622 и низкогорье 573 м н. у. м. Основной совокупный вклад в разграничение почв по орографическому профилю вносят Zn и Fe (82.6 %), Cu, Ni обеспечивают (17.4 %). Итоговое число классификационных попаданий составляет 95 %.

Формирование кластеров торфяных почв на различных гипсометрических уровнях горного рельефа согласуется с гидрогеохимической зональностью подземных вод горных территорий юга Сибири и подчиняется законам развития биогенного геохимического ландшафта. Содержание большинства зольных элементов в почвах геохимически подчиненного кластера (высотный уровень 573 м н. у. м.) в 3–4 раза больше относительно 1087 м н. у. м. В высокогорье локализуются лишь Pb и Cd. Радиальная геохимическая миграция элементов в почвенном профиле с наибольшей силой связана у железа с зольностью торфяного субстрата, стронция – с реакцией среды, Cu и Mn – с фульвокислотами. Суммарный показатель загрязнения ассоциации элементов относительно фона не выявил техногенной деградации горных торфяных почв в текущий период.

Эколого-геохимические особенности горных торфяных почв заболоченных речных долин согласуются с характеристикой естественных биогеохимических провинций юга Центральной Сибири, в пределах которых они развиваются.

Работа выполнена в рамках базового проекта Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири» № 0356-2021-0009.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Кондратенко Б. М. Оценка фоновое содержания тяжелых металлов в почвах Европейского Северо-Востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064–1070.
- Богущ А. А., Бобров В. А., Климин М. А., Бычинский В. А., Леонова Г. А., Кривоногов С. К., Кондратьева Л. М., Прейс Ю. И. Особенности формирования отложений и концентрирования элементов в профиле торфяника Выдринский (Южное Прибайкалье) // Геол. и геофиз. 2019. Т. 60. № 2. С. 194–208.
- Бочарников М. В., Исмаилова Д. М. Высотная поясность растительного покрова восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 6. С. 76–84.
- Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 83 с.
- Водяницкий Ю. Н., Савичев А. Т., Трофимов С. Я., Шишкова Е. А. Накопление тяжелых металлов в загрязненных нефтью торфяных почвах // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1109–1114.
- Волкова И. И., Байков К. С., Сысо А. И. Болота Кузнецкого Алатау как естественные фильтры природных вод // Сиб. экол. журн. 2010. № 3. С. 379–388.
- Воскресенский С. С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. 352 с.
- Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
- ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы (ССОП). Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 4 с.
- Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // Почвоведение. 1999. № 5. С. 639–645.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 965–974.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 58–73.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В., Аврова А. Ф. Высотная дифференциация кислотно-основных свойств долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау // Вестн. Том. гос. ун-та. Биол. 2018. № 41. С. 135–155.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В., Аврова А. Ф. Формализованный анализ гумусного состояния горных торфяных почв на уровне высотных поясов // Почвоведение. 2019. № 8. С. 923–934.
- Захарихина Л. В., Литвиненко Ю. С. Эколого-геохимические изменения компонентов природной среды терри-

- тории медно-никелевого месторождения (Центральная Камчатка) // Геогр. и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 49–59.
- Инишева Л. И., Цыбукова Т. Н. Эколого-геохимическая оценка торфов юго-востока Западно-Сибирской равнины // Геогр. и природ. ресурсы. 1999. № 1. С. 45–51.
- Кашулина Г. М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Колыском полуострове // Почвоведение. 2017. Т. 50. № 7. С. 860–873.
- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшифилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Методика измерений массовой доли ванадия, кадмия, кобальта, марганца, меди, мышьяка, никеля, ртути, свинца, хрома и цинка в пробах почв, грунтов и донных отложений методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915 МД. М., 2009. 41 с.
- Мирошников А. Е., Стримжа Т. П., Смолянинова Л. Г., Анцифорова О. В., Кочнева Н. А., Кузнецова В. В., Максимова С. В. Оценка территориального экологического равновесия Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. 192 с.
- Московченко Д. В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 768 с.
- Пьявченко Н. И., Корнилова Л. И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
- Саит Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Семенов И. Н., Королева Т. А. Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // Почвоведение. 2019. Т. 52. № 10. С. 1259–1268.
- Сорокина Е. П., Кулачкова О. Г., Онищенко Т. Л. Сравнительный геохимический анализ воздействия на окружающую среду промышленных предприятий различного типа // Методы изучения техногенных геохимических аномалий. М.: ИМГРЭ, 1984. С. 9–20.
- Степанов В. М. Гидрогеологическая зональность в горных районах Восточной Сибири // Тр. II совещ. по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Вып. I. Иркутск, 1959. С. 71–84.
- Сысо А. И. Геохимические и агрохимические особенности низинных торфяных почв юга Западной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 1996. № 1. С. 87–93.
- Теплицын В. Л., Ваймер А. А. Гидроморфные и полугидроморфные почвы геосистем Западной Сибири и их рациональное использование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 230 с.
- Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных: учебник. 3-е изд. М.: Бином-Пресс, 2007. 515 с.
- Шарафутдинов Р. А. Геохимические свойства и минеральный состав торфяных отложений южной лесостепи Минусинской котловины и горной тайги Центральной части Западного Саяна: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23. Томск. 2006. 20 с.
- Bao K., Wang G., Pratte S., Mackenzie L., Klamt A. M. Historical variation in the distribution of trace and major elements in a poor fen of Fenghuang Mountain, NE China // Geochem. Int. 2018. V. 56. N. 10. P. 1003–1015.
- Bao K., Wang G., Jia L., Xing W. Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: geochemical records of peat and altitude effects // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. V. 26. N. 8. P. 7512–7524.
- Beznosikov V. A., Lodygin E. D., Kondratenok B. M. Assessment of background concentrations of heavy metals in soils of the northeastern part of European Russia // Euras. Soil Sci. 2007. V. 40. Iss. 9. P. 949–955 (Original Rus. Text © V. A. Beznosikov, E. D. Lodygin, B. M. Kondratenok, 2007, publ. in Pochvovedenie. 2007. N. 9. P. 1064–1070).
- Bindler R. Mired in the past – looking to the future: geochemistry of peat and the analysis of past environmental changes // Glob. Planet Change. 2006. V. 53. Iss. 4. P. 209–221.
- Bogush A. A., Bobrov V. A., Klimin M. A., Bychinskii V. A., Leonova G. A., Krivonogov S. K., Kondrat'eva L. M., Preys Yu. I. Sedimentation and Accumulation of Elements in the Vydrino Peat Bog (Southern Baikal Region) // Rus. Geol. Geophys. 2019. V. 60. N. 2. P. 163–175 (Original Rus. Text © A. A. Bogush, V. A. Bobrov, M. A. Klimin, V. A. Bychinskii, G. A. Leonova, S. K. Krivonogov, L. M. Kondrat'eva, Yu. I. Preis, 2019, publ. in Geologiya i geofizika. 2019. V. 60. N. 2. P. 194–208).
- Efremova T. T., Efremov S. P. Ecological and geochemical assessment of heavy-metal and sulfur pollution levels in hilly peatbogs of southern Taimyr // Contemp. Probl. Ecol. 2014. N. 7. P. 685–693 (Original Rus. Text © T. T. Efremova, S. P. Efremov, 2014, publ. in Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2014. N. 6. P. 965–974).
- Efremova T. T., Efremov S. P., Melent'eva N. V., Avrova A. F. Formal criteria for the humus status of mountainous peat soils in altitudinal zones // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. Iss. 8. P. 892–902 (Original Rus. Text © T. T. Efremova, S. P. Efremov, N. V. Melent'eva, A. F. Avrova, 2019, publ. in Pochvovedenie. 2019. V. 52. N. 8. P. 923–934).
- Gerdol R., Bragazza L. Effects of altitude on element accumulation in alpine moss // Chemosphere. 2006. V. 64. Iss. 5. P. 810–816.
- Heinrichs H., Mayer R. Distribution and cycling of major and trace elements in two Central European forest ecosystems // J. Env. Qual. 1977. V. 6. Iss. 4. P. 402–407.
- Jia L., Wang G., Liu J. Distribution and implications of major and trace elements in peat profiles of Yuanchi, Changbai Mountain // J. Mt. Sci. 2006. V. 24. P. 662–666 (in Chinese with English abstract).
- Kashulina G. M. Extreme pollution of soils by emissions of the copper-nickel industrial complex in the Kola Peninsula // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. Iss. 7. P. 837–849 (Original Rus. Text © G. M. Kashulina, 2017, publ. in Pochvovedenie. 2017. N. 7. P. 860–873).
- Pratte S., Bao K., Shen J., Mackenzie L., Klamt A., Wang G., Xing W. Recent atmospheric metal deposition in peatlands of northeast China: a review // Sci. Total Environ. 2018. V. 626. P. 1284–1294.
- Semenkov I. N., Koroleva T. V. International environmental legislation on the content of chemical elements in soils: guidelines and schemes // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. Iss. 10. P. 1289–1297 (Original Rus. Text © I. N. Semenov, T. V. Koroleva, 2019, publ. in Pochvovedenie. 2019. V. 52. N. 10. P. 1259–1268).

- Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb, and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland // *Water Air Soil Pollut.* 1996. V. 90. Iss. 3–4. P. 375–405.
- Vodyanitskii Yu. N., Savichev A. T., Trofimov S. Ya., Shishkonakova E. A. Accumulation of heavy metals in oil-contaminated peat soils // *Euras. Soil Sci.* 2012. V. 45. Iss. 10. P. 977–982 (Original Rus. Text © Yu. N. Vodyanitskii, A. T. Savichev, S. Ya. Trofimov, E. A. Shishkonakova, 2012, publ. in *Pochvovedenie*. 2012. N. 10. P. 1109–1114).
- Volkova I. I., Baikov K. S., Syso A. I. Kuznetsk Alatau mires as filters for natural waters // *Contemp. Probl. Ecol.* 2010. V. 17. N. 3. P. 265–271 (Original Rus. Text © I. I. Volkova, K. S. Baikov, A. I. Syso, 2010, publ. in *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal*. 2010. V. 17. N. 3. P. 379–388).

## ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SWAMP SPRUCE FORESTS PEAT SOILS OF KUZNETSK ALATAU

T. T. Efremova<sup>1</sup>, O. A. Shapchenkova<sup>1</sup>, S. P. Efremov<sup>1</sup>, A. F. Avrova<sup>1</sup>, M. V. Sedel'nikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, mike.sedelnikov@yandex.ru

The studies were carried out in forest peat soils of swampy river valleys of the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau. The content of macro- and microelements in the layer of modern soils (0–30 cm) varies greatly (Cv 42–88 %). The weighted average amount (taking into account the thickness of soil horizons and peat areas) within the orographic profile of 1087–573 m a. s. l. is:  $Fe_{8623} > Al_{7295} > Mn_{335} > Sr_{230} > Zn_{37.8} > Cr_{15.4} > Cu_{13.2} > Ni_{9.9} > Pb_{4.6} > Co_{3.4} > Cd_{0.21}$ , mg/kg. The methods of multidimensional statistical analysis have been used to structure peat soils according to the content of ash elements into three clusters corresponding to altitudinal gradient – 1087, 832–622, 573 m a. s. l. Zn and Fe have the greatest discriminating ability (82.6 %). A smaller share of the difference is provided by Cu, Ni (17.4 %). The topographic series of river valley peat soils are determined by the hydrogeochemical zonality of groundwater, as well as the removal of elements by lateral migration flows. For the first time, the boundaries of the vertical altitudinal zonality of peat soils are statistically were proved by the content of mineral elements and the geochemical composition of the selected ecotopic series (clusters) of soils is characterized. Only Pb and Cd accumulate in the soils of the autonomous landscape (highlands). In comparison with it, in the cluster of soils of the middle highlands, the amount of most ash elements increases by an average of 2 times. In the low mountains, the intensity of accumulation weakens somewhat. In the soil profile, the radial geochemical migration of iron as a characteristic element of swamps is more strongly positively correlated with the ash content of the peat substrate, strontium – with the soil pH, Cu and Mn – with fulvic acids. In the current period, no technogenic degradation of peat soils of the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau has been detected. The ecological and geochemical features of mountain peat soils are consistent with the characteristics of the natural biogeochemical provinces on the south of Central Siberia, within which they develop.

**Keywords:** mountain peat soils, geochemistry of elements, pollution, formalized classification, multidimensional statistical analysis.

**How to cite:** Efremova T. T., Shapchenkova O. A., Efremov S. P., Avrova A. F., Sedel'nikov M. V. Ecological-geochemical assessment of swamp spruce forests peat soils of Kuznetsk Alatau // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 14–25 (in Russian with English abstract).

УДК 630\*181(182.5)

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ЛЕСОВ КУРОРТНОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА УЧУМ: ОЦЕНКА УЩЕРБА ОТ ПОЖАРА

С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, Е. В. Горяева

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmnik@ksc.krasn.ru, gor-elka@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

Результаты внешних воздействий на лесные экосистемы, вне зависимости от их происхождения, выражаются в определенной степени деградации лесной экосистемы и, как правило, предполагают выявление ущерба. До воздействия стоимость насаждения можно представить как сумму экосистемных (экологических и ресурсных) функций:  $C = \sum C_i$ , где  $C_i$  – стоимость  $i$ -й функции из  $n$  рассматриваемых. Расчет выполняется относительно функции, стоимость которой известна и неизменна. В качестве такой функции использована таксовая ставка платы за древесину. Возможен также вариант расчета относительно рыночной цены древесины. Итоговая стоимость экосистемных функций будет различаться пропорционально соотношению таксовых и рыночных цен. После воздействия на ценоз какого-либо фактора стоимость насаждения определяется посредством корректирования стоимости каждой экосистемной функции. Разность до и после воздействия определяет размер ущерба. В соответствии с целевым назначением, а также в силу различия таксационных показателей насаждений, оценки значимостей экосистемных функций могут расходиться, а отсюда распределение долей значимости для каждого насаждения индивидуально. Последовательность выявления стоимости насаждения и далее ущерба демонстрируется на примере уничтоженного пожаром участка сосново-лиственничного леса на территории курорта «Озеро Учум» в Ужурском районе Красноярского края. До пожара стоимость насаждения составляла 156 700 руб./га, после пожара – уменьшилась до 27 819 руб./га; ущерб определен в размере 128 881 руб./га.

**Ключевые слова:** леса курорта, сосново-лиственничное насаждение, значимость экосистемных функций, определение стоимости и ущерба.

DOI: 10.15372/SJFS20220403

### ВВЕДЕНИЕ

Хозяйственное назначение лесов заключается в обеспечении качества окружающей среды и создании условий для жизни. Леса выполняют ресурсные, средозащитные и рекреационные функции (Энциклопедия..., 2006). В литературе отмечается неоднозначность терминов экосистемные функции и экосистемные услуги (Бобылев и др., 2013). Число исследований в области экосистемных услуг значительно, но их единая классификация не выработана (Haines-Young, Potschin, 2009). Следует признать, что содержание понятий экосистемные функции, экосистемные услуги, природные ресурсы, продолжают оставаться дискуссионными (Groot et

al., 2010). По нашему мнению, лесная экосистема (насаждение) имеет экологическую и ресурсную значимость, т. е. выполняются как экологические, так и ресурсные функции. Отсюда следует, что термин «экосистемные функции» является логическим обобщением и экологических, и ресурсных функций.

Лесные ресурсы, обладающие именованными (численными) единицами измерения, имеют определенную таксовую и рыночную стоимость. Для таких ресурсов расчет стоимости и ущерба от внешних воздействий сложности не представляет. Что же касается неименованных экологических функций насаждений, а также неименованных ресурсов (например, рекреационных), то их оценка в заключениях специали-

стов зачастую имеет вербальный уровень обобщений и основывается на собственном опыте и знаниях. При этом очевидно, что объективной может считаться только количественная оценка.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Курорт «Озеро Учум» расположен в Ужурском районе Красноярского края. На правах бессрочного пользования ему принадлежат участки леса общей площадью 128 га. В результате пожара сгорели лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Гарь расположена в пределах 200-метровой полосы от береговой линии оз. Учум. Контурное дешифрирование участка проведено посредством сличения изображения на космических снимках до и после пожара (рис. 1).

Координаты центра участка гари: 55°05'5.9" с. ш. 89°43'27.5" в. д.; площадь 2.45 га. Сведения о показателях рельефа получены на основе материалов цифровой модели рельефа: склон северной экспозиции, уклон 6–9°.

Таксация проводилась измерительно-перечислительным методом. Заложено девять круговых реласкопических площадок (пунктов таксации), что позволяет определять запас древостоя с точностью  $\pm 10\%$ . Для описания подроста и подлеска в центрах реласкопических площадок закладывались площадки постоянного радиуса, равного 2.52 м. Географические координаты

центров реласкопических площадок фиксировались с помощью приемника спутниковой навигации GPS. По значениям высот  $H$  и диаметров  $D_{1.3}$  модельных деревьев сформированы уравнения регрессии  $H = f(D_{1.3})$ . Коэффициент детерминации  $R^2$  для сосны равен 0.68; для лиственницы – 0.66.

Сравнение территориальных образований относится к задачам оценочных классификаций. Для классов  $S_1, \dots, S_k$  требуется определить лучше или хуже представители одного класса, чем другого. Классы, полученные в результате проведения оценочной классификации, ранжированы, т. е.  $S_1 < S_2 < \dots < S_k$  или, наоборот,  $S_1 > S_2 > \dots > S_k$ . Обязательным в оценочных классификациях является переход к результирующему показателю, по значению которого классы могут интерпретироваться, например, как плохие, средние, хорошие (Заварзин, Тикунов, 2004). В качестве территориальных образований можно рассматривать насаждения до и после внешнего воздействия. В контексте настоящей работы его атрибутами являются экосистемные функции. Предполагается выполнение сравнения их значимости. Результирующие показатели могут выражаться как в единицах стоимости, так и в ранжированных баллах, что и позволяет провести сравнение, т. е. ответить лучше или хуже.

Для оценки стоимости насаждений могут применяться разные методы (Прешкин, 2010), из-за чего результаты расчетов могут значительно расходиться. Выбор метода диктуется спецификой решаемых задач. Стоимость насаждения



Рис. 1. Контур сгоревшего участка леса на территории курорта «Озеро Учум».

до и после пожара есть сумма его экологических и ресурсных функций, поэтому для расчета ущерба от пожара подходит так называемый модульный метод, предполагающий дифференциацию полезностей леса. Стоимостная оценка экосистемных функций насаждений и следующая за ней оценка ущерба от внешних воздействий – актуальная научно-производственная проблема.

Цель работы – адаптировать модульный метод для определения стоимости экосистемных функций насаждения с последующей оценкой ущерба от пожара. Задачи исследований: стоимостная оценка допожарного насаждения; определение ущерба от пожара. Адаптированный модульный метод расчета демонстрируется на примере уничтоженного пожаром участка леса на территории курорта «Озеро Учум».

**Стоимостная оценка допожарного насаждения.** В работе С. К. Фарбера с соавт. (2021) показана возможность получения рыночной стоимости экологических функций для отдельных деревьев и кустарников городских посадок. Стоимость экологических функций рассчитывалась как доля от годового бюджета города. Для насаждений (лесных экосистем) расчеты во многом аналогичны. Обозначим стоимость показателей экосистемных функций  $C_1, \dots, C_n$ . Тогда общая стоимость экосистемы составит  $C = \sum C_i$ .

Для выполнения расчетов требуются исходные данные: целевое назначение и таксационные показатели насаждения. Последовательность этапов методики:

- формируется перечень экосистемных функций;
- выявляется экспертное распределение долей значимости экосистемных функций;
- по отношению к стоимости одной из экосистемных функций вычисляется стоимость других и далее – общая стоимость насаждения.

Стоимость экосистемных функций напрямую зависит от их значимости. Так, для защитных насаждений значимость средозащитных функций насаждений априори выше ресурсных; эксплуатационные же насаждения с аналогичными таксационными показателями, напротив, имеют более высокую значимость древесных ресурсов. Отсюда следует, что в силу разнообразия участков, стандартизация процесса выявления значимости экосистемных функций невозможна, а распределение долей значимости для каждого участка должно выполняться индивидуально и, по-видимому, исключительно посредством экспертных оценок специалистов лесоводов и экологов. Здесь важна сама возмож-

ность установления такого рода соотношения между отдельными экосистемными функциями.

Для насаждений выбор экосистемной функции, относительно которой будет проводиться расчет стоимости, затруднений не вызывает. В этом качестве следует использовать ставку платы за единицу объема древесины (О ставках..., 2007). Возможен также вариант использования рыночной цены древесины как наиболее сбалансированной по критерию спроса и предложения. Расчетные значения при этом будут различаться пропорционально соотношению таксовых и рыночных цен на древесину. Нормативная ставка предпочтительнее, поскольку не содержит погрешности, вносимой варьированием цен оптовой продажи круглой древесины. Заметим также, что в задаче оценки нелесных экосистем, (т. е. без наличия древесного ресурса) выбор экосистемной функции, относительно которой следует проводить расчеты, вовсе не очевиден, и требует дополнительного анализа.

В целом состояние экологического мониторинга в России оценивается как неудовлетворительное. Система научно-методического обеспечения в настоящее время разрушена, а порядок учета находится в состоянии реформирования. Полноценную и достоверную информацию о состоянии биоресурсов получить достаточно сложно. Происходит также и коммерциализация доступа к ведомственным данным, что не может оцениваться положительно (Бобылев и др., 2013), хотя поиски вариантов экономической оценки лесов продолжаются (Бобылев и др., 2002). Количество сведений о стоимости экосистемных услуг в насаждениях следует признать незначительным. Фактически пропорции их значимости можно выявить только на основании субъективных экспертных суждений. Именно поэтому составление перечня экосистемных функций и оценка их значимости проведены в экспертном порядке.

**Методика определения ущерба.** Влияние внешнего воздействия на насаждение может быть позитивное, в этом случае можно говорить о его эффективности, а если воздействие негативное – то о причиненном ущербе. Цена ущерба – разность между стоимостью тождественных экосистемных функций первичной лесной экосистемы (до воздействия) и вторичной (после воздействия).

Обозначим показатели экосистемных функций первичной экосистемы  $P_1, \dots, P_n$ ; показатели экосистемных функций вторичной экосистемы  $B_1, \dots, B_n$ . Если показатели именованные, то

относительно первичной экосистемы снижение (повышение) значимости  $i$ -й функции составит  $K_i = (P_i - B_i)/P_i$ . Величина  $K_i$  – есть корректирующий коэффициент, показывающий насколько произошло изменение. Соответственно стоимость функций вторичной экосистемы будет равна  $K_1 \times C_1, \dots, K_n \times C_n$ , а ее общая стоимость составит  $\sum K_i \times C_i$ . Ущерб (или эффективность) рассматривается как разность между стоимостью тождественных экосистемных функций первичной лесной экосистемы (до воздействия) и вторичной (после воздействия). Очевидное преимущество такого подхода: расчёты проводятся с использованием долей значимости экосистемных функций первичной лесной экосистемы и соответственно ущерб определяется относительно рыночной цены древесины, т. е. ровно также, как и до воздействия.

Судить об изменении значимости экосистемных функций после внешнего воздействия можно по косвенным показателям. Например, для функции защиты почв – это объем дождевых осадков, перехваченных кронами деревьев; для защиты водотоков от загрязнения – объем дождевых осадков, переведенных во внутрипочвенный сток. Сама величина  $K_i$  должна быть выражена в долях. Соответственно, литературные данные также следует представить в долях. Для именованных показателей, как представлено выше, перевод проводится по зависимости  $K_i = (P_i - B_i)/P_i$ ; проценты (неименованные показатели) переводятся в доли делением на 100; при кратном уменьшении проводится деление, при кратном увеличении – умножение. Например, снижение поверхностного стока в насаждении в 4 раза дает долю корректирующего коэффициента 1/4 или 0.25, а увеличение урожая лесных ягод на гари (в результате осветления) в 2 раза добавляет долю значимости до 2 долей (или 200 %). К литературным данным следует относиться критически, с учетом местных лесорастительных условий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Характеристика допожарного насаждения.** Линейное расположение деревьев и сохранившиеся на поверхности почвы пахотные борозды подтверждают искусственное происхождение допожарного насаждения. До пожара здесь произрастал сосново-лиственничный высокобонитетный разнотравный лес, с густым кустарниковым подлеском, что свидетельствует об исключительно благоприятных лесорастительных условиях.

Независимо от породы дерева – сосны или лиственницы, их возраст на год пожара был равен 31 год, что также подтверждает искусственное происхождение насаждения. Средний диаметр сосны равен 17.5 см, лиственницы – 18.3 см, средняя высота соответственно 14.2 и 14.5 м, относительная полнота древостоя – 0.62, запас – 52 и 79 м<sup>3</sup>/га, общий запас – 131 м<sup>3</sup>/га (на участке 2.45 га – 321 м<sup>3</sup>). Состояние кустарникового и травяного яруса допожарного насаждения оценивается по смежному участку леса. Здесь подлесок классифицируется как очень густой, высотой 2–3 м и представлен спиреей средней (*Spiraea media* Schmidt), шиповником иглистым (*Rosa acicularis* Lindl.), боярышником кроваво-красным (*Crataegus sanguinea* Pall.). Следствием контакта с луговыми и лугово-степными группировками является развитие мощной травянистой растительности. Травяной покров представлен лесными, луговыми и лугово-степными видами, среди которых кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt), таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), герань ложносибирская (*Geranium pseudosibiricum* J. Mayer), вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth), коротконожка перистая (*Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), клевер люпиновый (*Trifolium lupinaster* L.). Проективное покрытие трав и кустарников составляет 100 %. Почвы участка – луговые темно-каштановые, плодородные для светлохвойных и лиственных древесных пород (рис. 2).

**Характеристика гари.** Вероятная причина лесного пожара – неосторожное обращение с огнем, вероятное место начала пожара – подножие холма, что подтверждается наличием аналогичных очагов возгорания, расположенных в непосредственной близости к тропе, проходящей вдоль береговой кромки озера. Пожар весенний, что характерно для травяных типов леса. Распространение огня вверх по склону поддерживалось наличием сухой прошлогодней травы; густой кустарник создавал вертикальную ярусность, что позволило пожару перейти в верховой и уничтожить древостой. Верховой пожар не остановила и дорога, огонь распространился далее вверх по склону за границу курорта. На гари поселились насекомые (вторичные вредители). Гарь превратилась в очаг вредителей леса, которые далее распространяются на смежные насаждения.

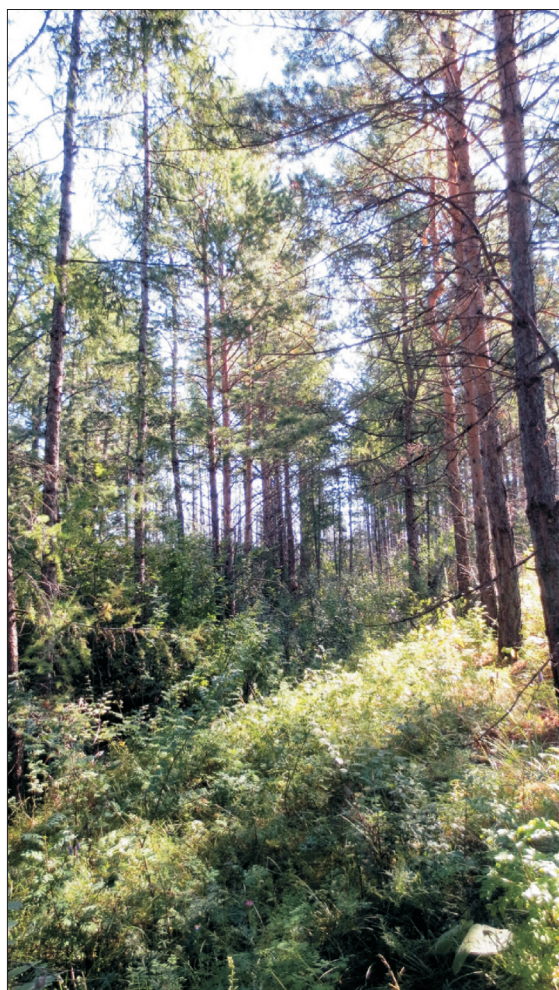


Рис. 2. Насаждение, расположенное в непосредственной близости с участком гари.



Рис. 3. Участок гари (фрагмент).

Основная часть древостоя в результате пожара превратились в сухостой и только частично ушла в отпад. Деревья засохли на корню. И поскольку корневая система осталась практически неповрежденной, прогнозируется длительный период (десяtkи лет) выпадения сухостоя. По мере отпада сухостоя, гарь будет становиться все более труднодоступной для посещения. Начался и далее будет продолжаться процесс разложения древесины. По С. К. Фарберу (2000), кривые изменения во времени количества валежа и сухостоя сосны и лиственницы во многом схожи. В первые послепожарные годы объемы валежа увеличиваются, достигая максимального значения, затем идет их постепенное равномерное уменьшение. Наибольшее значение объемов валежа приходится на возраст гари 9–15 лет, когда количество сухостоя уже начинает уменьшаться. Разложение соснового валежа заканчивается к 45–50 годам, а лиственничного продолжается 100 лет и более. Продукты гниения мертвой древесины вместе с почвенной органикой смываются в озеро,

способствуя развитию синезеленых водорослей (*Cyanobacteria* (ex Stanier) Cavalier-Smith). Вода теряет прозрачность и приобретает затхлый запах, что негативно отражается на ее качестве.

Увеличение на гари количества солнечной радиации и почвенно-грунтовые условия благоприятны для видов растительного покрова. Интенсивное разрастание травяного яруса создает препятствие для естественного возобновления древостоя. При обследовании зафиксированы только единичные экземпляры возобновления березы (*Betula* L.). Развитие сосново-лиственничного насаждения было прервано пожаром. Лесная экосистема сменилась на травяно-кустарниковую. Без хозяйственного вмешательства лес на участке уже не восстановится. За прошедшие после пожара время явно обозначилось начало новой пирогенной сукцессии по направлению закустаривание и одернение, с последующим вероятным образованием луга (рис. 3).

**Стоимостная оценка допожарного насаждения.** Целевое назначение курортных лесов

заключается в сохранении естественных лечебных свойств (полезностей) курортов и создании благоприятных микроклиматических условий (Лесная энциклопедия, 1985). Перечень экосистемных (экологических и ресурсных) функций курортных лесов достаточно обширен и требуется из них выбрать приоритетные. Предпочтение отдается наиболее значимым. При выборе принимались во внимание следующие факторы: целевое назначение участка, наличие озера (основного лечебного ресурса), а также расположение курорта в экологически чистом районе. В перечень не вошли важные санитарно-гигиенические функции регуляции атмосферы – выделение кислорода и поглощение углекислого газа, но на фоне окружающих экосистем вклад гари в стабилизацию состава приземной воздушной среды незначителен.

А. М. Ветитнев и Я. А. Войнова (2017) полагают, что природные ресурсы для санаторно-курортного лечения уже достаточно подробно изучены. И для оценки каждого необходимо лишь выработать единый подход. Допускаем, что у эксперта-специалиста санаторно-курортной деятельности, приоритеты значимости могут принимать другие, возможно и более объективные, значения. Важно, что посредством экспертной оценки значимости экосистемных функций достигается консенсус, удовлетворяющий разноректорные интересы.

По товарным таблицам Н. П. Анучина (1981) определены объемы деловой (по классам крупности) и дровяной древесины. Расчет стоимости экосистемных функций и общей стоимости насаждения участка проведен относительно таксовой платы за единицу объема древесины для первого Восточно-Сибирского лесотаксового района при расстоянии вывозки до 10 км (О ставках..., 2007). Стоимость стволовой древесины сосны составила 2282 руб./га, лиственницы – 2419 руб./га, сосново-лиственничного древостоя – 4701 руб./га. Например, стоимость функции «защита почв» ( $4701 \times 0.1$ )/0.03 = 15 670 (руб./га), а насаждения (сумма стоимостей экосистемных функций) – 156 700 руб./га.

**Определение ущерба.** Насаждение огнем уничтожено. Следствие пожара – насаждение сменилось на гарь. Стоимость экосистемных функций на участке после пожара также изменилась. Приняты следующие значения корректирующих коэффициентов  $K_i$ :

1. *Защита почв.* Поверхностная водная эрозия почв возникает под воздействием стекающих по склону дождевых и талых вод. Отсюда следует, что количество осадков, задерживаемое кро-

нами, можно использовать в качестве показателя выполнения насаждением почвозащитной функции. По данным А. М. Матвеева и Т. А. Матвеевой (2014), сосняки задерживают в кронах от 30 до 80 % дождевой влаги, лиственничники – от 20 до 60 %. Диапазон достаточно широк, но в процессе экспертных оценок расхождения аргументированно объясняются крутизной склона, сомкнутостью полога, интенсивностью осадков. Применительно к таксационным показателям сосново-лиственничного насаждения количество перехватываемых кронами осадков в среднем можно принять равным около 30 %. Из этого следует, что для гари корректирующий коэффициент  $K_1 = 0.30$ . Получается, что уничтожение древостоя снизило защитные свойства участка, что только отчасти компенсируется развитием на гари трав и кустарников.

2. *Защита вод.* Поверхностный сток вод частично смывает вниз по склону лесную подстилку, послепожарную сажу и другие продукты горения. Насаждение уменьшает поверхностный сток, переводя его во внутрпочвенный. Объем воды поверхностного стока может служить показателем эффективности выполнения насаждением водозащитной функции озера, расположенного вниз по склону. Количество поверхностного стока, в силу разнообразия почвенно-грунтовых условий может значительно варьировать. Так, по Г. И. Васенкову с соавт. (2013), в сосняках оно составляет 8 мм, на лугах – 39 мм; коэффициент стока в сосняках – 0.12, на лугах – 0.79. Получается, что на лугах поверхностный сток выше в 4–6 раз. Нами принимается снижение поверхностного стока в 4 раза (корректирующий коэффициент  $K_2 = 1/4 = 0.25$ ).

3. *Пыле- и газозащита.* Способность насаждений нейтрализовать определенное количество пыли или газа реализуется там, где эти виды загрязнений присутствуют, поэтому доля значимости функций пыле- и газозащиты не может быть одинакова для городских и курортных условий среды. В городах, особенно промышленных, количество пыли и химического загрязнения выше, и способность их нейтрализации растениями высоко значима. Экологическая ситуация на территории курорта «Озеро Учум» несравнимо лучше, и здесь необходимость в пыле- и газозащите фактически отсутствует, потому для функций пылезащита и газозащита принята символическая значимость 0.01. Количество пыли и химического загрязнения до и после пожара практически не меняется и не отличается от фонового. Значения корректирующих коэффициентов  $K_3 = 0.01$  и  $K_4 = 0.01$ .

4. *Регуляция микроклимата.* Способность насаждений смягчать режим влажности, температуры и скорость ветра имеет значение как для города, так и для курорта. Известно, что в лесу относительная влажность воздуха на 36 %, а в парке на 27 % выше, чем в городской застройке (Горохов, 1991). Сосновый древостой снижает температуру воздуха на 1.7 °С (Молчанов, 1968). Относительно летней температуры 25 °С снижение составит 7 %. Скорость ветра в насаждении снижается на 30 % (Молчанов, 1973). Принимаются значения корректирующих коэффициентов  $K_5 = 0.25$ ;  $K_6 = 0.07$ ;  $K_7 = 0.30$ .

5. *Рекреация.* Наличие послепожарной сажи, валежа сухостоя, труднопроходимых зарослей кустарников и разнотравья создает негативное эстетическое восприятие погибшего насаждения. Санитарно-оздоровительное воздействие участка отрицательное, что для курортного предприятия как минимум недопустимо. Участок гари отдыхающими не посещается, и его рекреационная значимость оценивается как нулевая. Корректирующий коэффициент  $K_8 = 0$ .

6. *Древесина.* Сухостой и валеж можно использовать только в качестве дров. Деловая дре-

весина пожаром уничтожена. Следовательно, посредством коэффициента  $K_9$  определяется только стоимость дровяной части древостоя. При этом следует учесть, что деловая часть допожарного древесного ресурса тоже перешла в дрова. По товарным таблицам для диаметра 18 см количество ликвидной древесины сосны составляет 88 %, лиственницы – 80 % (Анучин, 1981). На участке в результате пожара образовалось 46 м<sup>3</sup>/га сосновой дровяной древесины и 6 м<sup>3</sup>/га неликвидных отходов (всего 52 м<sup>3</sup>/га), а также 63 м<sup>3</sup>/га лиственничной дровяной древесины и 16 м<sup>3</sup>/га неликвидных отходов (всего 79 м<sup>3</sup>/га). Общее количество дровяной древесины стало 109 м<sup>3</sup>/га. Ставка платы 2.34 руб./м<sup>3</sup>. Отсюда стоимость дровяной древесины составляет 255 руб./га.

7. *Побочное пользование.* На участке в качестве объекта побочного пользования может выступать дикорастущая малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.). Кустарник полностью восстановился, а за счет увеличения количества солнечной радиации урожайность малины выросла как минимум в 2 раза ( $K_{10} = 2$ ).

В таблице представлена версия расчета стоимости экосистемных функций.

Стоимость экосистемных функций допожарного насаждения и расчет послепожарного ущерба

| Экосистемные функции     | Сосново-лиственничное насаждение |                    | Гарь                       |           | Послепожарный ущерб |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------|---------------------|
|                          | Значимость, доля от 1.00         | Стоимость, руб./га | Корректирующий коэффициент | Стоимость |                     |
|                          |                                  |                    |                            | руб./га   |                     |
| Защитные:                |                                  |                    |                            |           |                     |
| защита почв              | 0.10                             | 15 670             | 0.30                       | 4701      | –10 969             |
| защита вод               | 0.15                             | 23 505             | 0.25                       | 5876      | –17 629             |
| Санитарно-гигиенические: |                                  |                    |                            |           |                     |
| пылезащита               | 0.01                             | 1567               | 0.01                       | 16        | –1551               |
| газозащита               | 0.01                             | 1567               | 0.01                       | 16        | –1551               |
| влажность                | 0.11                             | 17 237             | 0.25                       | 4309      | –12 928             |
| температура              | 0.11                             | 17 237             | 0.07                       | 1207      | –16 030             |
| ветер                    | 0.11                             | 17 237             | 0.30                       | 5171      | –12 066             |
| Ресурсные:               |                                  |                    |                            |           |                     |
| рекреация                | 0.35                             | 54 845             | 0                          | 0         | –54 845             |
| древесина деловая        | 0.03                             | 4694               | 2.00                       | 0         | –4694               |
| древесина дровяная       | 0.02                             | 7                  |                            | 255       | +248                |
| древесина всего          |                                  | 4701               |                            | 255       | –4446               |
| побочное пользование     |                                  | 3134               |                            | 6268      | +3134               |
| И т о г о ...            |                                  | 156 700            |                            | 27 819    | –128 881            |

*Примечание.* 1. По товарным таблицам Н. П. Анучина (1981): для диаметра 18 см количество ликвидной древесины сосны составляет 88 %, из них дрова – 1 %; для диаметра 20 см количество ликвидной древесины лиственницы составляет 80 %, из них дрова – 3 %. 2. В первом Восточно-Сибирском лесотаксовом районе для расстояния вывозки до 10 км стоимость 1 м<sup>3</sup> деловой древесины крупной равна 90.54 руб., средней – 64.62 руб., мелкой – 32.4 руб., дровяной 2.34 руб. 3. На участке в результате пожара образовалось 46 м<sup>3</sup>/га сосновой дровяной древесины и 6 м<sup>3</sup>/га неликвидных отходов (всего 52 м<sup>3</sup>/га), а также 63 м<sup>3</sup>/га лиственничной дровяной древесины и 16 м<sup>3</sup>/га неликвидных отходов (всего 79 м<sup>3</sup>/га). Общее количество дровяной древесины стало 109 м<sup>3</sup>/га.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время определение стоимости природных благ основано на затратных подходах, оценках дифференциальной ренты, балльных и нормативных методах. Общая экономическая стоимость экосистемных услуг включает стоимость использования (прямую и косвенную) и стоимость неиспользования. Но единого методического подхода пока не выработано. При этом необходимость определения экологической и ресурсной значимости и стоимости насаждений возникает при решении научно-практических задач лесного хозяйства.

Результаты внешних воздействий вне зависимости от их происхождения выражаются в определенной степени деградации лесной экосистемы и, как правило, предполагают выявление ущерба. Анализ состояния сосново-лиственничного насаждения на территории курорта «Озеро Учум» позволил сделать следующие выводы:

1. Модульный метод определения стоимости насаждения и оценки ущерба позволяет оперировать экологическими и ресурсными функциями.

2. Стоимость пройденного огнем насаждения до пожара составляла 156 700 руб./га, после пожара она уменьшилась до 27 819 руб./га. Ущерб от пожара определен в размере 128 881 руб./га. Стоимость всех основных для курорта экосистемных функций после пожара стала меньше. Исключение – повысилась урожайность малины, что только незначительно компенсировало общий ущерб. Налицо значительное снижение экологической значимости участка. Ресурсная значимость участка также уменьшилась: деловая древесина перешла в дровяную, рекреационная ценность участка стала нулевой.

3. Сложившаяся ситуация требует неотложных мер хозяйственного воздействия. Восстановление леса на участке достигается посредством выполнения лесохозяйственных мероприятий: проведение сплошной санитарной рубки (сухостоя); очистки от порубочных остатков, уборки валежа; создания лесных культур; формирования посредством рубок ухода насаждения с таксационными показателями, отвечающими лечебно-оздоровительным задачам курорта.

4. Целевое для курортной зоны насаждение должно выполнять рекреационные, экологические и санитарно-оздоровительные функции. В таком качестве может рассматриваться сосново-лиственничное насаждение, которое для снижения пожарной опасности следует целена-

правленно формировать по парковому типу, т. е. разреженным, имеющим в составе лиственные породы деревьев и кустарники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н. П. Сортиментные и товарные таблицы. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 536 с.
- Бобылев С. Н., Букварева Е. Н., Грабовский В. И., Данилкин А. А., Дгебуадзе Ю. Ю., Дроздов А. В., Замолотчиков Д. Г., Краев Г. Н., Тишков А. А., Филенко О. Ф., Хорошев А. В. Анализ имеющихся данных для подготовки прототипа Национального доклада по экосистемным услугам // Экосистемные услуги наземных экосистем России: первые шаги. Status Quo Report. М.: Центр охраны дикой природы, 2013. 45 с.
- Бобылев С. Н., Медведева О. Е., Соловьева С. В. Экономика сохранения биоразнообразия. Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия Российской Федерации». М.: Ин-т экон. природопольз., 2002. 604 с.
- Васенков Г. И., Будник И. П., Пициль А. О. Поверхностный сток талых вод в Житомирском Полесье // Соврем. пробл. науки и образов. 2013. № 6. 7 с.
- Ветитнев А. М., Войнова Я. А. Организация санаторно-курортной деятельности: учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Фед. агентство по туризму, 2017. 292 с.
- Горохов В. А. Городское зеленое строительство: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1991. 416 с.
- Заварзин А. В., Тикунов В. С. Классификации // Основы геоинформатики. В 2-х кн. Кн. 1: учеб. пособ. М.: Академия, 2004. С. 171–200.
- Лесная энциклопедия: В 2-х т. Т. 1. / гл. ред. Г. И. Воробьев. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 563 с.
- Матвеев А. М., Матвеева Т. А. Задержание осадков кронами древесных пород // Усп. совр. естествозн. 2014. № 5 (1). С. 220–223.
- Молчанов А. А. Лес и окружающая среда. М.: Наука, 1968. 246 с.
- Молчанов А. А. Влияние леса на окружающую среду. М.: Наука, 1973. 359 с.
- О ставках платы за единицу объема лесных ресурсов и ставках платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности. Постановление Правительства РФ от 22.05.2007 № 310 (ред. от 06.01.2020). М.: Правительство РФ, 2007.
- Преишкин Г. А. Затратный подход к оценке лесных благ // Лесн. вестн. 2010. № 5. С. 203–208.
- Фарбер С. К. Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 432 с.
- Фарбер С. К., Злобин Д. В., Кузьмич Н. С. Оценка экологических функций городских посадок // Интерэкспо-Гео. 2021. Т. 4. № 2. С. 166–170.
- Энциклопедия лесного хозяйства: в 2-х томах. Т. 1. М.: ВНИИЛМ, 2006. 416 с.
- Groot R. S. de, Alkemade R., Braat L., Hein L., Willemsen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making // Ecol. Complexity. 2010. N. 7. P. 260–272.
- Haines-Young R. H., Potschin M. B. Methodologies for defining and assessing ecosystem services. Final Rep. Project Code C08-0170-0062. JNCC, 2009. 69 p.

## ENVIRONMENTAL VALUE OF FORESTS OF THE UCHUM LAKE RESORT ZONE: FIRE DAMAGE ASSESSMENT

S. K. Farber, N. S. Kuzmik, E. V. Goryaeva

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch*

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch*

*Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

---

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru, gor-elka@yandex.ru

The results of external impacts on forest ecosystems, regardless of their origin, are expressed in a certain degree of degradation of the forest ecosystem and, as a rule, involve the identification of damage. The paper shows that before the impact, the cost of stands can be represented as the sum of ecosystem (ecological and resource) functions:  $C = \sum C_i$ , where  $C_i$  is the cost of the  $i$ -th function of the  $n$  considered. The calculation is performed relative to a certain function, the cost of which is known. As such a function, the tax rate of payment for wood is used. It is also possible to calculate the relative market price of wood. The final values of the value of ecosystem functions, at the same time, will differ in proportion to the ratio of tax and market prices. After exposure, the cost of stands is determined by adjusting the cost of each ecosystem function. The difference between before and after exposure determines the amount of damage. In accordance with the intended purpose, as well as due to the difference in forest inventory indicators of the stands, estimates of the significance of ecosystem functions may radically differ. This means that the distribution of the shares of significance for each stand is individual. The sequence of identifying the cost of stand and further damage is demonstrated by the example of a section of pine-larch forest destroyed by fire on the territory of the Lake Uchum resort. It was found that before the fire, the cost of stand was 156 700 rubles/ha, after the fire it decreased to 27819 rubles/ha; damage was determined in the amount of 128881 rubles/ha.

**Keywords:** *forests of the resort, pine-larch stand, importance of ecosystem functions, determination of cost and damage.*

**How to cite:** *Farber S. K., Kuzmik N. S., Goryaeva E. V. Environmental value of forests of the Uchum Lake resort zone: fire damage assessment // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 26–34 (in Russian with English abstract).*

УДК 630\*812.14+633.877.2+633.877.3

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРЫ ЛИСТВЕННИЦЫ И СОСНЫ: ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПИРОЛИЗ

Е. А. Петрунина<sup>1</sup>, С. Р. Лоскутов<sup>1</sup>, Т. В. Рязанова<sup>2</sup>, А. А. Анискина<sup>1</sup>,  
Г. В. Пермякова<sup>1</sup>, В. В. Стасова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева  
660049, Красноярск, пр. Мира, 82

E-mail: petrunina@ksc.krasn.ru, lsr@ksc.krasn.ru, tatyana-htd09@mail.ru, aniskina\_a@ksc.krasn.ru,  
vistasova@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

Исследование посвящено термическому анализу и флэш-пиролизу коры лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как многотоннажного отхода переработки древесины этих пород. С помощью методов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) выявлен ряд закономерностей термического разложения коры. По четвертым производным контура ДТГ установлены различия «фракционности» потери массы при нагреве коры в условиях термогравиметрического теста. На основе данных ТГ/ДТГ проведен анализ кинетики термодеструкции с использованием изоконверсионного метода Озавы – Флинна – Уолла (ОФУ). Полученные зависимости энергии активации ( $E_a$ ) термического разложения коры от степени конверсии использованы для расчета термодинамических параметров  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta S$  этого процесса, используемых при проектировании и масштабировании технологий термической обработки и пиролиза коры для производства технических продуктов с повышенной добавленной стоимостью. Средние значения  $E_a$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta S$  составляют 206.7, 201.1, 248.7 кДж/моль и  $-78.0$  Дж/(моль · К) для коры лиственницы (КЛ) и 235.3, 229.7, 310.6 кДж/моль и  $-129.4$  Дж/(моль · К) для коры сосны (КС). С помощью метода хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) по технологии парового пробоотбора установлен состав летучих соединений коры, которые представлены моно-, сескви-, дитерпенами и кислородсодержащими углеводородами. Идентифицировано 37 соединений КЛ и 41 соединение КС. По результатам ТГ и ДСК охарактеризована термическая устойчивость КЛ и КС относительно графита; рассчитаны парциальные теплоты окислительной термодеструкции для стадий термического разложения, свидетельствующие о различии термических параметров коры. Экзотермические эффекты термоокислительной деструкции равны 15.1 и 15.9 кДж/г для КЛ и КС соответственно. В результате аналитического флэш- пиролиза идентифицировано 55 продуктов пиролиза КЛ и КС с суммарной площадью идентифицированных пиков 77.6 и 89.7 % соответственно. Предложены варианты использования результатов исследования.

**Ключевые слова:** кора, лиственница, сосна, термический анализ, аналитический пиролиз.

DOI: 10.15372/SJFS20220405

### ВВЕДЕНИЕ

С ростом промышленного использования древесины увеличивается количество отходов ее переработки, в частности коры. Отходы окорки в короотвалах наносят большой вред окружающей среде, захламляя большие участки земли,

отравляя воздух и гидросферу продуктами горения свалок, токсичными соединениями, выделяющимися при разложении, экстрактивными веществами коры и т.п. В связи с этим поиск способов (технологий) утилизации коры становится все более актуальным.

Кора деревьев является ценным возобновляемым биологическим ресурсом, переработкой которого можно получать широкий спектр товаров с повышенной добавленной стоимостью (Рязанова, Репях, 1996; Pásztor et al., 2016). Для разработки новых технологий ее использования в производстве инновационной продукции требуются детальные знания физико-химических свойств этого весьма специфического растительного сырья, которые могут быть получены на современном уровне развития физико-химических методов анализа материалов.

В последние годы повышается интерес к современным высокоинформативным аналитическим системам и методам термического анализа и пиролитической хромато-масс-спектрометрии, с помощью которых решаются самые разные задачи о физико-химических свойствах коры (ретидома) как основы для создания эффективных технологий ее переработки.

Так, в работах А. В. Семенович и С. Р. Лоскутова (2004), V. Dulman с соавт. (2005), С. Р. Лоскутова с соавт. (2020) показано существенное изменение тепловых свойств модифицированной коры ели (*Picea A. Dietr.*) и лиственницы (*Larix Mill.*) после ее использования для извлечения катионных красителей и тяжелых металлов из технологических вод по сравнению с исходным сырьем. Установленные характерные температурные диапазоны потери массы при нагреве, остаток после термоокислительной деструкции, а также энергия активации основных стадий термического разложения, рассчитанная по неизотермическим термогравиметрическим данным (ТГ/ДТГ) вместе с тепловыми показателями ДСК важны для создания оптимальных технологий получения из коры биосорбентов с заданными свойствами.

J. Dibdiakova с соавт. (2015) исследовали эффективность и прибыльность сжигания биомассы дерева, коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с ограничениями, связанными с золой, поскольку процессы плавления и спекания золы имеют важное значение с точки зрения прогнозирования и уменьшения проблем, обусловленных накоплением золы в котлах, работающих на биомассе. С помощью термогравиметрии и сканирующей калориметрии биомассы установлены температурные диапазоны превращения силикатного шлака (930–965 °C), разложения  $K_2CO_3$  (900 °C), эндотермических эффектов при выделении  $CO_2$  из  $K_2CO_3$  и разложении  $CaCO_3$  (~ 1300 °C), которые могут быть отнесены к различным стадиям плавления золы. Полученные результаты рассматриваются авто-

рами как полезная информация в рамках отраслевых интересов для прогнозирования поведения плавления золы лесной биомассы.

W. Shangguan с соавт. (2018) рассматривают термогравиметрию как метод для получения информации о динамике и механизме пиролиза, теплового поведения коры. На основе использования изоконверсионных методов анализа термогравиметрических данных авторами упомянутого исследования была рассчитана энергия активации термического разложения коры. Показано, что термическое разложение коры отличалось от термодеструкции древесины и выделенных гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина (Shangguan et al., 2018). Характерные температуры этого процесса для коры обусловлены её химическим составом. Энергия активации термодеструкции коры была ниже, чем натуральных волокон.

Механизм реакции и выделяющиеся газы при пиролизе коры лиственницы были исследованы с помощью совмещенных методов ИК-Фурье-спектроскопии и термогравиметрии в работе Q. Shao с соавт. (2019). Были использованы два изоконверсионных метода расчета энергии активации термодеструкции коры по ТГ-кривым Озавы – Флинна – Уолла (ОФУ) и Киссинджера – Акахиры – Суносе (КАС). В первом случае энергия активации варьировала от 93.2 до 307.1 кДж/моль со средним значением 184.7 кДж/моль, во втором – от 104.6 до 333.6 кДж/моль со средним значением 201.4 кДж/моль. Современных исследований по аналитическому пиролизу (Пи-ГХ/МС) коры существенно меньше, чем по термическому анализу. Хорошим примером комплексного подхода к изучению коры с помощью методов ТГ/ДТГ, ДСК и Пи-ГХ/МС с целью поиска эффективных способов утилизации для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью являются работы Н. Chen с соавт. (2019) и X. Yue с соавт. (2018), в которых впервые обнаружено и идентифицировано 225 индивидуальных соединений – продуктов пиролиза коры торреи крупной (*Torreya grandis* Fortune ex Lindl.). Среди них выделяют вещества, которые потенциально могут найти широкое применение в химической промышленности: уксусная кислота, 2-метокси-4-винилфенол, D-манноза, фурфурол. Большое число веществ перспективны для использования в биомедицине и пищевой промышленности. В целом подход авторов к исследованию коры – многотоннажного растительного сырья – можно рассматривать как экспериментально-теорети-

ческую основу для будущего развития новых технологий ее индустриального использования.

Х. Yue и соавт. (2018) изучали кору кизила лекарственного (*Cornus officinalis* Torr. ex Dur.) с помощью методов ТГ/ДТГ и Пи-ГХ/МС для обеспечения более полного использования ресурсов этого растения. На пирограммах было зарегистрировано 276 пиков; все пики идентифицированы, а соединения классифицированы на сложные эфиры, кислоты, фенолы, дубильные вещества, иридоиды, мыла, кетоны и гликозиды. Среди установленных соединений авторы отметили наиболее представленные и важные с их точки зрения компоненты пиролизата. Фурфурол используется в медицине и в промышленности как растворитель для селективного извлечения ненасыщенных компонентов из нефти и растительных масел. Фенол – денатурирующий белок патогенных микробов – обеспечивает бактерицидный эффект при дезинфекциях. Мальтол широко используется в различных фруктовых ароматизаторах в пищевой промышленности благодаря своим уникальным сливочным вкусовым характеристикам. В результате детального исследования продуктов пиролиза коры создается основа для понимания и рекомендаций по созданию технологий производства новых медицинских и промышленных товаров, продуктов питания.

Кора деревьев разных видов и разного ботанико-географического происхождения имеет существенно неодинаковый химический состав по количеству и качеству экстрактивных веществ, соотношению массовых долей основных полимерных компонентов (гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина), что обуславливает разнообразие термических характеристик разных видов коры. Изученность термических свойств и продуктов пиролиза коры сибирских хвойных пород крайне мала, поэтому целью нашего исследования стало изучение термических характеристик и продуктов флэш-пиролиза коры основных лесобразующих пород Сибири – лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны обыкновенной с помощью современных методов термического анализа (ТГ/ДТГ, ДСК), газовой хроматографии (ГХ/МС) и аналитического пиролиза (Пи-ГХ/МС).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Корой называют комплекс тканей, расположенных снаружи от древесины и отделенных от нее слоем образовательной ткани – камбием. Относительный объем коры в стволе (без сучьев)

лиственницы составляет 22–25 %, сосны 10–16 % (Анучин, 2004).

В коре различают две части: внутреннюю (живую) – луб, или флоэму, и наружную, мертвую – корку, или ритидом (что являлось объектом нашего исследования), отделенную от луба перидермой. У лиственницы чешуи корки состоят из тонкостенных гипертрофированных паренхимных клеток, часто с извилистыми стенками, склерейд, единичных кристаллоносных клеток (больше всего их у лиственницы) и пустых смоловместилищ. Ситовидные клетки и лучи четко не выявляются. Перидерма шириной 0.4–0.7 мм. Феллодерма состоит из 2–6 слоев крупных прозрачных тонкостенных клеток; клетки-феллоиды, составляющие каменистую пробку, расположены 7–8-рядными слоями. У лиственницы во внутренних слоях пробки, примыкающих к феллодерме, встречаются немногочисленные кристаллоносные клетки (Лотова, 1987).

У сосны корка чешуйчатая. Ее ситовидные элементы полностью облитерированы, чешуи имеют более или менее однородное строение и состоят из рыхлой паренхимной ткани, клетки которой сходны с клетками дилатационной зоны луба или крупнее их. У сосны в чешуях корки заметны тонкие тяжи деформированных элементов, разделяющие участки очень крупных тонкостенных паренхимных клеток. В корке сосны нередко можно видеть лучи и смоловместилища, встречаются немногочисленные кристаллоносные клетки. Число рядов обычной, губчатой и особенно каменистой пробки у сосны сильно варьирует. У сосны обыкновенной хорошо развита каменистая пробка, состоящая из 8–15 рядов, уплощенных клеток-феллоидов с толстыми одревесневшими слоистыми стенками, пересеченными узкими поровыми каналами (Лотова, 1987).

Образцы коры лиственницы и сосны были заготовлены в одной ботанико-географической зоне Красноярского края (Красноярская лесостепь, насаждения II и III классов возраста) и подготовлены для всех анализов по методам, рекомендуемым в химии древесины (Оболенская и др., 1991).

В табл. 1 представлен химический состав коры сосны обыкновенной и лиственницы сибирской.

Термический анализ – ТГ/ДТГ и ДСК – осуществлен с помощью приборов TG 209 F1 и DSC 204 F1 (NETZSCH, ФРГ).

Образцы коры, кондиционированные до постоянной влажности около 5 % при температуре

**Таблица 1.** Химический состав коры сосны обыкновенной (КС) и лиственницы сибирской (КЛ)

| Компоненты                                                | КС           | КЛ           |
|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Экстрактивные вещества, экстрагируемые:                   |              |              |
| спирто-толуольной смесью                                  | 7.73 ± 0.20  | 7.63 ± 0.18  |
| этанолом                                                  | 3.16 ± 0.14  | 2.86 ± 0.15  |
| горячей водой                                             | 4.76 ± 0.17  | 6.04 ± 0.10  |
| Вещества, экстрагируемые горячей водой (исходный образец) | 7.60 ± 0.14  | 9.44 ± 0.17  |
| Лигнин (после обработки коры щелочью, 1 %)                | 23.10 ± 0.18 | 24.92 ± 0.19 |
| Целлюлоза:                                                |              |              |
| после обработки коры спирто-толуольной смесью             | 23.45 ± 0.21 | 26.00 ± 0.17 |
| в исходном образце                                        | 23.75 ± 0.13 | 25.72 ± 0.20 |

(20.0 ± 1.5) °С и относительной влажности воздуха 50–55 %, проанализированы в атмосфере воздуха при следующих условиях.

ТГ: скорость нагрева 10, 20 и 40 °С/мин от 25 до 700 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл/мин; масса образца 9.41–9.56 мг, тигель Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> цилиндрической формы. ДСК: скорость нагрева 10 °С/мин от 25 до 590 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 40 мл/мин; масса образца 1.23–1.25 мг, тигель алюминиевый, с перфорированной крышкой; эталон – пустой алюминиевый тигель. Обработка данных термического анализа осуществлялась с помощью пакета программ NETZSCH. Proteus Thermal Analysis. 4.8.4.

Анализ кинетики термического разложения коры осуществлен с помощью уравнения Озавы – Флинна – Уолла (ОФУ) изоконверсионной кинетики (Ozawa, 1965; Mamleev et al., 2004; Baroni et al., 2016; Petrunina et al., 2021):

$$\ln(\beta) \cong \ln\left(\frac{AE_a}{RF(\alpha)}\right) - 5.3305 - 1.052 \frac{E_a}{RT},$$

где  $a = (m - m_0)/(m_0 - m_f)$  – степень превращения,  $m_0$  – начальная масса образца в термогравиметрическом опыте,  $m$  – текущее значение массы при температуре  $T$ ,  $m_f$  – масса образца после завершения процесса термодеструкции,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\beta$  – скорость нагрева,  $A$  – константа, функция  $F(\alpha)$  – математическое представление кинетической модели.

В основе использования метода ОФУ лежит предположение о том, что скорость реакции при постоянном значении  $\alpha$  зависит только от температуры. Энергия активации  $E_a$  термического разложения исследуемого образца определяется углом наклона прямой, построенной в координатах  $\ln(\beta) - \frac{1}{T}$ . При этом не требуется знание механизма (порядка) реакции.

Качественный компонентный состав летучих веществ коры определяли с помощью хромато-масс-спектрометрической системы Agilent 5975C-7890A (США) с использованием парофазного пробоотборника HeadSpace Sampler G1888. Применяли 30-метровую кварцевую колонку HP-5 (сополимер 5%-дифенил-95%-диметилсилоксан) с внутренним диаметром 0.25 мм. Газ-носитель – гелий с постоянным потоком 1.1 мл/мин. Температура колонки: начальный изотермический участок – 50 °С (10 мин), подъем температуры со скоростью 4 °С/мин от 50 до 200 °С. Параметры парофазного пробоотборника: температура термостата 100 °С, температура петли 110 °С, температура HS-интерфейса 115 °С, время выдержки образца в термостате пробоотборника 7 мин. Температура испарителя 280 °С, температура ионизационной камеры 170 °С, энергия ионизации 70 эВ. Идентификацию зарегистрированных компонентов проводили методом сравнения со стандартными образцами «Базы данных стандартных образцов» из масс-спектральной библиотеки NIST05a.L по наличию и соотношению характерных ионов-фрагментов и значениям линейных индексов удерживания, используя программу обработки данных AMDIS.

Пиролитическую хромато-масс-спектрометрию (Пи-ГХ/МС) качественного определения компонентного состава продуктов пиролиза коры проводили с помощью аналитической системы EGA/PY-3030D/GCMS-QP2020 (Shimadzu, Япония). Использовали капиллярную колонку Ultra ALLOY-5 длиной 30 м, внутренним диаметром 0.25 мм, толщиной слоя жидкой фазы (5 % дифенил, 95 % диметилполисилоксан) 0.25 мкм. Температура пиролиза 600 °С, масса образцов ~70–95 мкг. Условия хроматографирования: газ-носитель – гелий с постоянным потоком 1.0 мл/мин; сплит-впрыск 1 : 50; температура инжектора 250 °С. Температурная программа: начальный изотермический участок – 50 °С

(5 мин), подъем температуры от 50 до 240 °C со скоростью 4 °C/мин, подъем температуры до 300 °C со скоростью 10 °C/мин, время выдержки при 300 °C 5 мин. Температура ионного источника 250 °C; интерфейса – 300 °C; диапазон сканирования – от 40 до 550 m/z. Идентификацию компонентов проводили методом сравнения, по наличию и соотношению характеристичных ионов-фрагментов с использованием базы данных стандартных образцов из масс-спектральной библиотеки NIST (2017 г.) и сравнением с литературными данными.

Хроматографией с масс-спектрометрическим детектированием летучих компонентов коры и продуктов пиролиза в двух аналитических повторностях установлено практически полное совпадение соответствующих качественного и количественного компонентного составов по группам главных (> 1 %) и минорных (< 1 %) летучих соединений и продуктов пиролиза КЛ и КС. Для сравнения количественных показателей аналитических повторностей соответствующих групп соединений использовались критерии Стьюдента и Манна – Уитни, показавшие отсутствие статистически значимых различий составов аналитических повторностей исследованной КЛ и КС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

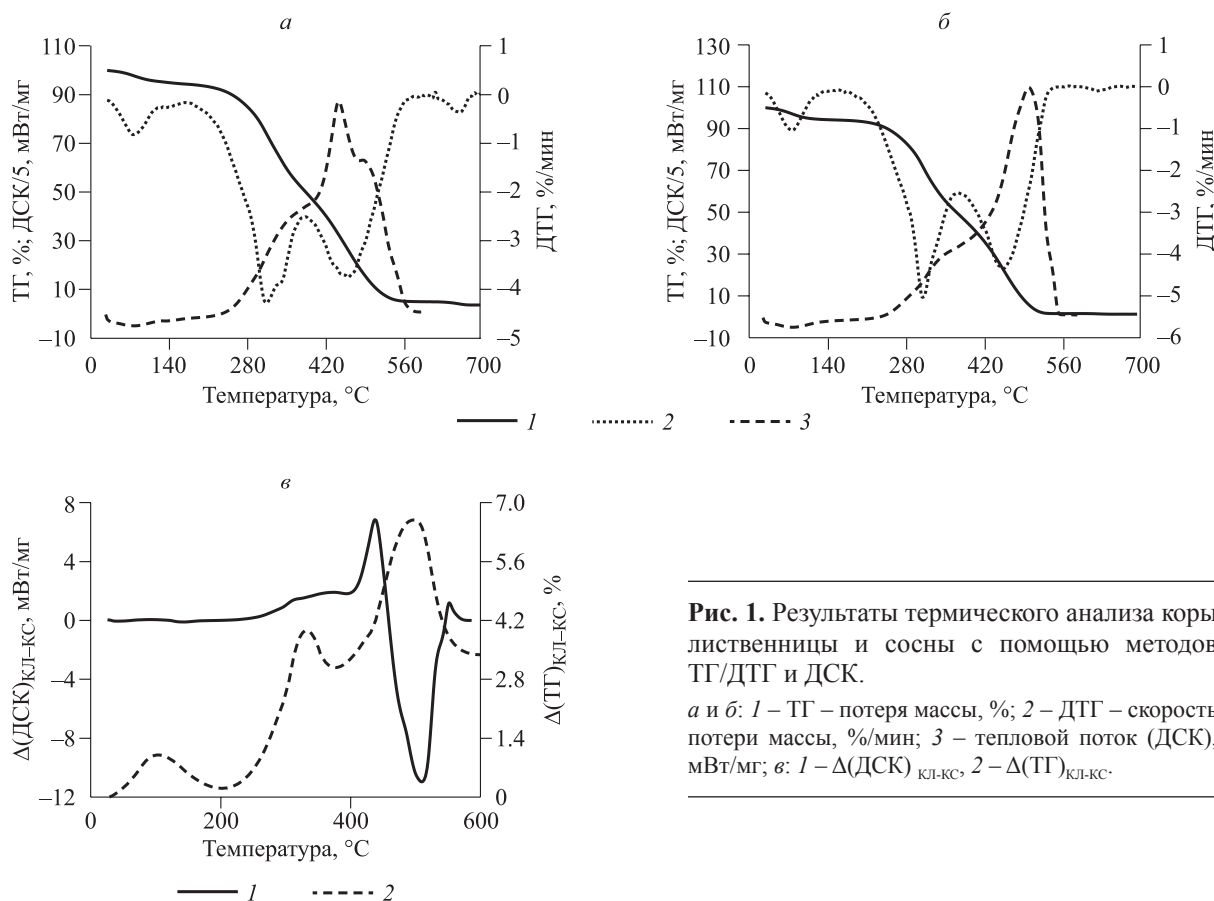
На рис. 1 представлены термограммы КЛ и КС, а в табл. 2–4 – результаты обработки экспериментальных термограмм.

Результаты измерений свидетельствуют о сходстве и различии термических параметров КЛ и КС.

Общими являются трехстадийность процесса потери массы в температурном интервале от 20 до 600 °C и практически одинаковые температурные диапазоны стадий, форма ТГ- и ДТГ-кривых.

Так, на первой (от 29 до ~165 °C) и второй (от 168 до 361 °C) стадиях термического разложения отмечаются близкие значения потери массы. При дальнейшем нагреве различия в потере массы увеличиваются от ~3 до 5 %; остаточная масса КЛ на 65 % больше, чем КС (см. табл. 2).

Заметные различия потери массы (около 50 %) в температурном интервале от 120 до ~170 °C обусловлены неодинаковым содержанием связанной влаги и легколетучих органических веществ, о чем свидетельствуют хромато-масс-спектрометрический анализ по методу парофазного пробоотбора из образцов КЛ и КС,



**Рис. 1.** Результаты термического анализа коры лиственницы и сосны с помощью методов ТГ/ДТГ и ДСК.

а и б: 1 – ТГ – потеря массы, %; 2 – ДТГ – скорость потери массы, %/мин; 3 – тепловой поток (ДСК), мВт/мг; в: 1 –  $\Delta(\text{ДСК})_{\text{КЛ-КС}}$ , 2 –  $\Delta(\text{ТГ})_{\text{КЛ-КС}}$ .

**Таблица 2.** Термическое разложение коры в окислительной среде: температурные интервалы (°C, числитель) и соответствующая им потеря массы (% , знаменатель)

| Образец | Показатели            |                        |                         |                         |                         |                         |                        | ОМ*, % |
|---------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------|
| КЛ      | $\frac{29-133}{4.87}$ | $\frac{133-168}{0.75}$ | $\frac{168-335}{29.79}$ | $\frac{335-381}{14.03}$ | $\frac{381-436}{15.94}$ | $\frac{436-578}{29.58}$ | $\frac{578-698}{1.38}$ | 3.66   |
| КС      | $\frac{29-123}{5.51}$ | $\frac{123-154}{0.38}$ | $\frac{154-373}{44.64}$ | $\frac{373-421}{13.18}$ | $\frac{421-571}{34.74}$ | $\frac{571-698}{0.28}$  |                        | 1.28   |

*Примечание.* В соответствии с методическими рекомендациями А. В. Оболенской с соавт. (1991), все измерения ТГ/ДТГ и ДСК проведены с использованием «усредненных» образцов. Статистический анализ определяемых величин в пяти аналитических повторностях выполнен для «реперного» образца древесины лиственницы. Стандартное отклонение потери массы на разных стадиях термодеструкции изменялось от 0.21 до 1.07 %, температуры максимумов ДТГ – от 0.36 до 0.84 °C; ДТГ<sub>max</sub> – от 0.08 до 0.68 °C/мин ( $p = 0.05$ ). ОМ – остаточная масса, представляет собой зольные вещества и недоокисленный уголь.

**Таблица 3.** Показатели скорости термодеструкции коры: температура максимумов (°C) и соответствующие ей значения ДТГ (%/мин) при нагревании образца со скоростью 10 °C/мин в окислительной среде

| Образец | $t_{max}$ | ДТГ <sub>max</sub> | $t_{max}$ | ДТГ <sub>max</sub> | $t_{max}$ | ДТГ <sub>max</sub> | $t_{max}$ | ДТГ <sub>max</sub> |
|---------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|
| КЛ      | 77        | –0.81              | 314       | –4.25              | 459       | –3.73              | 656       | –0.36              |
| КС      | 77        | –1.03              | 312       | –4.98              | 455       | –4.33              | 622       | –0.10              |

**Таблица 4.** Основные параметры коры, полученные в эксперименте по ДСК

| Образец | Температурный интервал | $t_{\min}$ эндотермы | $Q_{\text{эндо}}$ , Дж/г | Температурный интервал | $t_{\max}$ экзотермы |              |              | $Q_{\text{экзо}}$ , кДж/г |
|---------|------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------|--------------|---------------------------|
|         | °C                     |                      |                          | °C                     |                      |              |              |                           |
| КЛ      | 40–128                 | 78                   | 91.4                     | 224–582                | 389*                 | 442;<br>482* | 540*         | 15.1                      |
| КС      | 33–131                 | 78                   | 147.2                    | 215–561                | 319*;<br>364*        | –            | 501;<br>539* | 15.9                      |

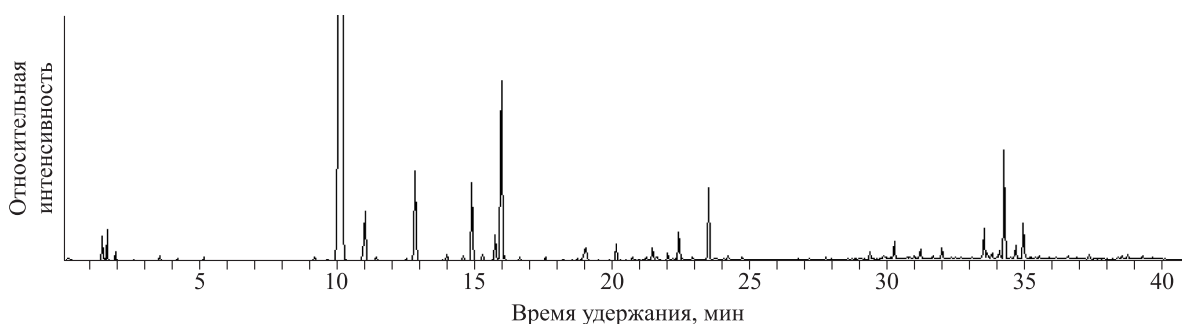
*Примечание.* Инструментальная погрешность определения теплового эффекта ( $Q_{эндо/экзо}$ ) не превышала 5 %. \* Температура в точке перегиба ДСК-кривой; прочерк – отсутствие максимума на кривой ДСК.

а также результаты ранее проведенных исследований (рис. 2, табл. 5) (Petrulina et al., 2021).

Как видно из табл. 5, различие в составе летучих веществ КЛ и КС проявляется в качественном и количественном отношениях. В коре сосны, например, на долю пиненовой фракции приходится более 60 % от общего содержания летучих веществ, а в коре лиственницы – чуть больше 40 %.

Кроме того, в составе летучих веществ лиственницы присутствуют дитерпены, которые отсутствуют в составе сосны. Легколетучие соединения КЛ и КС существенно различаются по составу сесквитерпенов и кислородсодержащих веществ.

В температурном диапазоне 154(168) – 335(381) °C происходит преимущественное термическое разложение углеводного комплек-



**Рис. 2.** Хроматограмма летучих веществ (на примере КС) – паровая фаза пробоботвор.

Таблица 5. Состав летучих соединений коры лиственницы и сосны

| Наименование соединения, формула                                     | КЛ                          |                            | КС                          |                            |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                                                                      | Время удержи-<br>вания, мин | Содержание,<br>% от общего | Время удержи-<br>вания, мин | Содержание,<br>% от общего |
| 1                                                                    | 2                           | 3                          | 4                           | 5                          |
| <i>Монотерпены</i>                                                   |                             |                            |                             |                            |
| $\alpha$ -Туйен, $C_{10}H_{16}$                                      | 9.64                        | 0.40                       | 9.65                        | 0.08                       |
| $\alpha$ -Пинен, $C_{10}H_{16}$                                      | 10.04                       | 34.00                      | 10.09                       | 59.55                      |
| Камфен, $C_{10}H_{16}$                                               | 11.01                       | 1.28                       | 11.01                       | 2.63                       |
| Бицикло[3.1.0]гекс-2-ен,<br>4-метилен-1(1-метилэтил), $C_{10}H_{14}$ | 11.43                       | 0.27                       | 11.43                       | 0.19                       |
| 1,3,5-Циклогептатриен, 3,7,7-триметил, $C_{10}H_{14}$                | 12.51                       | 0.66                       | 12.51                       | 0.10                       |
| $\beta$ -Пинен, $C_{10}H_{16}$                                       | 12.83                       | 7.33                       | 12.83                       | 4.00                       |
| 2,6-Диметил-1,3,5,7-октатетраен, Е,Е-, $C_{10}H_{14}$                | —                           | —                          | 13.84                       | 0.06                       |
| $\beta$ -Мирцен, $C_{10}H_{16}$                                      | 13.99                       | 0.24                       | 14.00                       | 0.27                       |
| $\alpha$ -Фелландрен, $C_{10}H_{16}$                                 | 14.59                       | 0.34                       | 14.60                       | 0.31                       |
| $\delta$ -3-Карен, $C_{10}H_{16}$                                    | 14.90                       | 18.32                      | 14.90                       | 3.10                       |
| $\alpha$ -Терпинен, $C_{10}H_{16}$                                   | 15.29                       | 0.49                       | 15.29                       | 0.28                       |
| о-Цимен, $C_{10}H_{14}$                                              | 15.75                       | 1.25                       | 15.75                       | 1.03                       |
| Лимонен, $C_{10}H_{16}$                                              | 15.95                       | 1.92                       | 15.95                       | 7.72                       |
| $\alpha$ -транс-Оцимен, $C_{10}H_{16}$                               | —                           | —                          | 16.66                       | 0.14                       |
| $\tau$ -Терпинен, $C_{10}H_{16}$                                     | 17.58                       | 0.50                       | 17.58                       | 0.13                       |
| о-Изопропенил толуол, $C_{10}H_{12}$                                 | 18.75                       | 0.57                       | 18.75                       | 0.10                       |
| Терпинолен, $C_{10}H_{16}$                                           | —                           | —                          | 19.02                       | 0.49                       |
| Бензол, 1-метил-4-(1-метилэтенил)-, $C_{10}H_{12}$                   | 19.07                       | 1.28                       | 19.06                       | 0.39                       |
| <i>Сесквитерпены</i>                                                 |                             |                            |                             |                            |
| $\alpha$ -Кубебен, $C_{15}H_{24}$                                    | 29.36                       | 0.19                       | —                           | —                          |
| Циклосативен, $C_{15}H_{24}$                                         | —                           | —                          | 29.65                       | 0.08                       |
| Копаен, $C_{15}H_{24}$                                               | —                           | —                          | 29.92                       | 0.08                       |
| Иланген, $C_{15}H_{24}$                                              | —                           | —                          | 30.10                       | 0.06                       |
| Юнипен, $C_{15}H_{24}$                                               | —                           | —                          | 30.98                       | 0.11                       |
| Юнипен, $C_{15}H_{24}$                                               | 31.20                       | 0.48                       | —                           | —                          |
| Кариофиллен, $C_{15}H_{24}$                                          | 31.68                       | 0.29                       | —                           | —                          |
| Аристолен, $C_{15}H_{24}$                                            | —                           | —                          | 32.45                       | 0.04                       |
| $\alpha$ -Кариофиллен, $C_{15}H_{24}$                                | 32.76                       | 0.24                       | —                           | —                          |
| Бициклогермакрен, $C_{15}H_{24}$                                     | —                           | —                          | 33.64                       | 0.25                       |
| $\alpha$ -Мууролен, $C_{15}H_{24}$                                   | —                           | —                          | 33.80                       | 0.20                       |
| $\beta$ -Кадинен, $C_{15}H_{24}$                                     | —                           | —                          | 34.66                       | 0.45                       |
| Кадина-4,9-диен, $C_{15}H_{24}$                                      | —                           | —                          | 34.95                       | 1.20                       |
| $\alpha$ -Калакорен, $C_{15}H_{20}$                                  | —                           | —                          | 35.21                       | 0.07                       |
| <i>Кислородсодержащие</i>                                            |                             |                            |                             |                            |
| Эвкалиптол, $C_{10}H_{18}O$                                          | —                           | —                          | 16.07                       | 0.17                       |
| Фенхол, $C_{10}H_{18}O$                                              | 20.15                       | 0.18                       | 20.15                       | 0.58                       |
| $\alpha$ -Камфоленал, $C_{10}H_{16}O$                                | —                           | —                          | 20.75                       | 0.09                       |
| транс-Пинокарвеол, $C_{10}H_{16}O$                                   | 21.24                       | 0.25                       | 21.24                       | 0.14                       |
| Камфора, $C_{10}H_{16}O$                                             | 21.48                       | 0.20                       | 21.48                       | 0.43                       |
| $\beta$ -Терпинеол, $C_{10}H_{18}O$                                  | —                           | —                          | 21.59                       | 0.12                       |
| Изоборнеол, $C_{10}H_{18}O$                                          | —                           | —                          | 22.03                       | 0.25                       |
| Пинокамфон, $C_{10}H_{16}O$                                          | —                           | —                          | 22.20                       | 0.08                       |
| Бицикло[2.2.1]гептан-3-он,<br>6,6-диметил-2-метилен, $C_{10}H_{14}O$ | —                           | —                          | 22.29                       | 0.05                       |
| Борнеол, $C_{10}H_{18}O$                                             | 22.43                       | 0.35                       | 22.43                       | 0.98                       |
| $\alpha$ -Терпинеол, $C_{10}H_{18}O$                                 | 23.50                       | 0.66                       | —                           | —                          |
| р-Мента-1,5-диен-8-ол, $C_{10}H_{16}O$                               | —                           | —                          | 22.53                       | 0.10                       |

Окончание табл. 5

| 1                                                                                                                           | 2     | 3    | 4     | 5    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|
| 4-Терпинеол, $C_{10}H_{18}O$                                                                                                | —     | —    | 22.93 | 0.12 |
| Миртена, $C_{10}H_{14}O$                                                                                                    | 23.69 | 0.23 | 23.50 | 2.39 |
| Вербенон, $C_{10}H_{14}O$                                                                                                   | 24.22 | 0.63 | —     | —    |
| Метилвый эфир тимол, $C_{11}H_{16}O$                                                                                        | 25.28 | 0.72 | —     | —    |
| Терпингидрат, $C_{10}H_{20}O_2$                                                                                             | —     | —    | 27.15 | 0.04 |
| цис-Миртанол, $C_{10}H_{18}O$                                                                                               | 26.15 | 0.26 | —     | —    |
| Борнилацетат, $C_{12}H_{20}O_2$                                                                                             | 27.15 | 0.48 | —     | —    |
| Терпин, $C_{10}H_{20}O_2$                                                                                                   | —     | —    | 27.77 | 0.08 |
| $\delta$ -Кадиол, $C_{15}H_{26}O$                                                                                           | —     | —    | 38.40 | 0.14 |
| Кадалин, $C_{15}H_{18}$                                                                                                     | —     | —    | 38.52 | 0.12 |
| Дегидроабети, $C_{20}H_{28}O$                                                                                               | 50.80 | 0.28 | —     | —    |
| <i>Дитерпены</i>                                                                                                            |       |      |       |      |
| Тунберген Цембрен, $C_{20}H_{32}$                                                                                           | 45.95 | 6.27 | —     | —    |
| Фенантрен, 7-этилен-1,2,3,4,4a,5,6,7,8,10,10a-додекагидро-4a,7-диметил-1-метилен-, [4AS-(4aa,4aa,7a,10aa)]-, $C_{19}H_{28}$ | 46.10 | 0.25 | —     | —    |
| Биформен, $C_{20}H_{32}$                                                                                                    | 48.59 | 0.24 | —     | —    |

са – гемицеллюлозы и целлюлозы, а в интервале 373(381) – 421(436) °C в основном лигнин и другие термостабильные компоненты ароматической природы подвергаются термодеструкции.

Параллельно с началом термического разложения коры при температуре выше ~170 °C происходит частичное обугливание исследуемых образцов. Образовавшийся уголь окисляется в температурном интервале 571(578) – 698 °C.

Графики разностных зависимостей ТГ и ДСК от температуры ( $\Delta(TG)_{КЛ-КС}$  и  $\Delta(DSC)_{КЛ-КС}$ , см. рис. 1, в) наглядно указывают на три основных стадии ( $20 < t_1 < 200$ ;  $200 < t_2 < 400$ ;  $400 < t_3 < 600$  °C) термодеструкции коры с постоянным отставанием потери массы корой лиственницы от коры сосны, достигающей максимальных значений 6.6 % при 509 °C. Последнее об-

стоятельство свидетельствует о несколько повышенной термоустойчивости коры лиственницы.

Детальное представление о различии по интенсивности и положению «полос фракций» потери массы при термогравиметрии дает сравнение четвертых производных контуров ДТГ =  $f(t)$  термического разложения КЛ и КС (рис. 3).

Анализ зависимости энергии активации от степени термической конверсии КЛ и КС показывает, что термодеструкция экстрактивных веществ, гемицеллюлозы и целлюлозы КЛ и КС в температурном интервале от 168 до ~365 °C с точки зрения кинетики этого процесса протекает практически одинаково, о чем свидетельствует изменение  $E_a$  при  $0.1 < \alpha < 0.4$  (рис. 4).

Существенное различие термодеструкции наблюдается в диапазоне температуры 350–

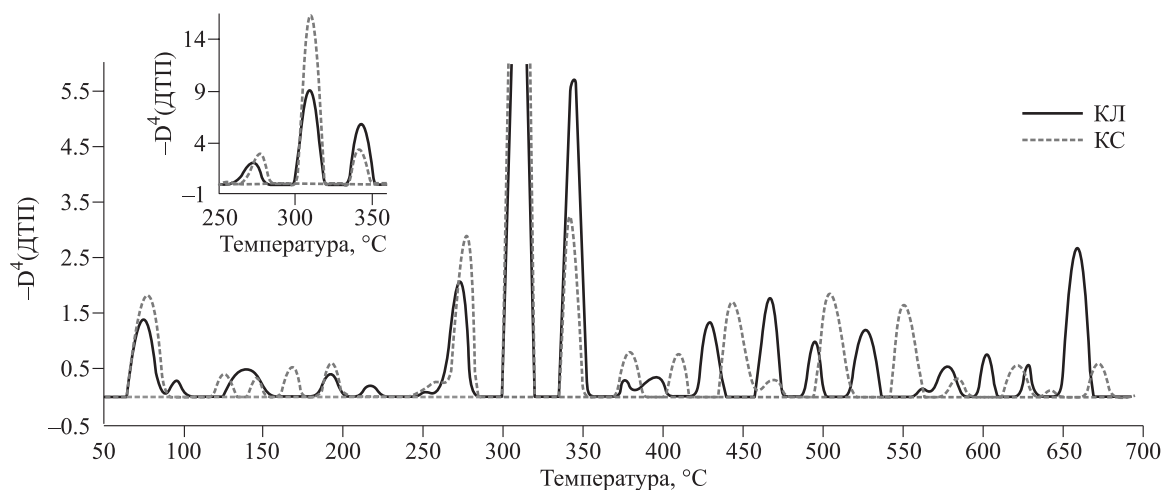
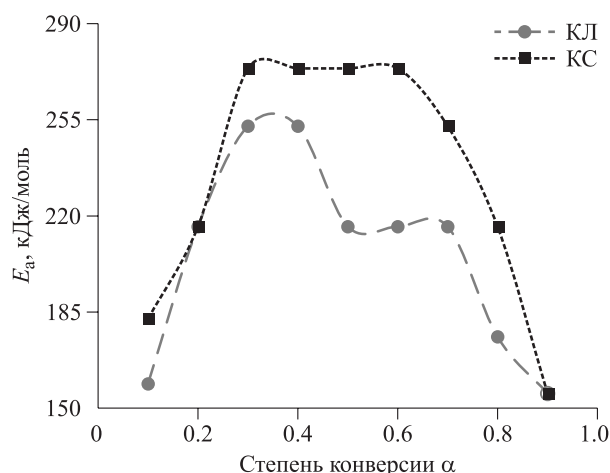


Рис. 3. Четвертые производные скорости потери массы (ДТГ) по температуре при термодеструкции КЛ и КС.



**Рис. 4.** Зависимость энергии активации термоокислительной деструкции коры от степени конверсии.

550 °С ( $0.4 < \alpha < 0.7$ ) преимущественного разложения лигнина и других термостабильных компонентов коры, а также окисления образовавшегося угля. Средние значения энергии активации при ( $0 < \alpha < 0.9$ ) термического разложения КЛ и КС составляют 206.69 и 235.29 кДж/моль соответственно.

Следует отметить важность термодинамических параметров  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta S$  для эффективного проектирования и требуемого масштабирования процессов термической обработки и пиролиза древесины и коры, поскольку они предоставляют ценную информацию о теплосодержании, осуществимости процесса, протекании непроизвольных реакций и т. п. Расчет термодинамических параметров проведен нами на основе зависимости энергии активации от степени конверсии КЛ и КС, найденной по методу ОФУ

(рис. 4) в соответствии с методикой А. Dave и соавт. (2021).

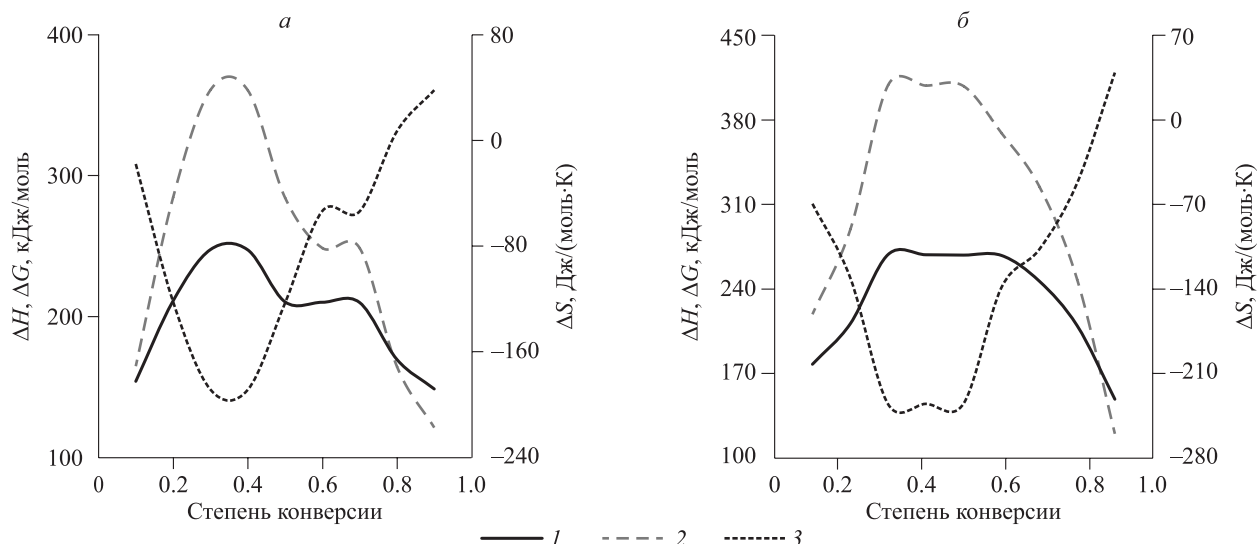
На рис. 5 представлены зависимости термодинамических параметров термодеструкции сухого вещества коры от степени конверсии. Из рис. 4 и 5 видно, что  $\Delta H$  и  $\Delta G$  изменяются симбатно  $E_a$ .  $\Delta H$  отражает теплопередачу между активированным комплексом и реагентами: более высокие значения означают более высокую реакцию способность и более высокую скорость реакции.

Характер зависимостей  $\Delta H$  и  $E_a$  от  $\alpha$  схож: для КЛ и КС при  $E_a > \Delta H$  и всех значениях  $\alpha$ , разность  $(E_a - \Delta H)$  изменяется в пределах  $5.61 \pm 0.61$  кДж/моль.

Энергия Гиббса  $\Delta G$  является мерой самопроизвольности протекания процесса. При  $\Delta G > 0$ , что наблюдается при термодеструкции коры в неизотермических условиях (рис. 5), протекают непроизвольные реакции в результате прогрессирующего нагрева образцов КЛ и КС.

Изменение энтропии  $\Delta S = f(\alpha)$  при  $0 < \alpha < 0.8$  принимает отрицательные значения, а при  $\alpha > 0.8$  достигает +38.2 Дж/(моль · К) для КЛ и +39.1 Дж/(моль · К) для КС. Последнее означает, что при термическом разложении от ~170 до 470 °С для КЛ и до 490 °С для КС, параллельно улетучиванию продуктов термодеструкции происходит образование упорядоченных конденсированных структур при обугливания.

Термограммы, полученные в результате ДСК КЛ и КС при температуре выше 200 °С, характеризуются неодинаковыми параметрами: температурой в точках перегиба и максимумов на кривой теплового потока, а также интенсивно-



**Рис. 5.** Изменение энтальпии (1), свободной энергии Гиббса (2) и энтропии (3) в процессе термического разложения коры лиственницы (а) и сосны (б).

**Таблица 6.** Параметры термической устойчивости коры лиственницы и сосны

| Температурный<br>интервал, град. | $Q_i$ |        | $T_{50}, ^\circ\text{C}$ |       | $R_{50} = T_{50}(\text{ТГ}) / T_{50}(\text{графит})$<br>$T_{50}(\text{графит}) = 823\text{ }^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------|-------|--------|--------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | %     | кДж/г  | ТГ                       | ДСК   |                                                                                                             |
| КЛ                               |       |        |                          |       |                                                                                                             |
| 200–280 ( $Q_1$ )                | 1.82  | 0.274  | 384.2                    | 436.5 | 0.467                                                                                                       |
| 280–400 ( $Q_2$ )                | 3.23  | 4.566  |                          |       |                                                                                                             |
| 400–600 ( $Q_3$ )                | 67.95 | 10.263 |                          |       |                                                                                                             |
| КС                               |       |        |                          |       |                                                                                                             |
| 200–280 ( $Q_1$ )                | 1.41  | 0.224  | 381.5                    | 465.1 | 0.464                                                                                                       |
| 280–400 ( $Q_2$ )                | 22.98 | 3.648  |                          |       |                                                                                                             |
| 400–600 ( $Q_3$ )                | 75.60 | 12.000 |                          |       |                                                                                                             |

*Примечание.* Температурные интервалы установлены на основе данных термогравиметрии коры (рис. 1, а, б) и не совпадают с используемыми в О. R. Harvey с соавт. (2012) для пироженных растительных образцов.

стью теплового потока на заключительном этапе термоокислительной деструкции коры. Тепловой поток при термическом разложении КС при  $t > 443 ^\circ\text{C}$  существенно интенсивнее, чем при разложении КЛ (см. рис. 1, в). Вместе с тем интегральные тепловые эффекты термического разложения КЛ и КС довольно близки – 15.1 и 15.9 кДж/г соответственно.

В работах О. R. Harvey с соавт. (2012), С. Santín с соавт. (2017) на примере термического разложения пироженного растительного материала предлагается метод сравнения термодеструкции исследуемых образцов по так называемой парциальной теплоте процесса ( $Q_i$ ) в разных температурных интервалах; по температуре отвечающей 50%-й потере массы сухого вещества в термогравиметрическом опыте ( $T_{50}(\text{ТГ})$ ), и температуре, отвечающей 50 % выделившейся теплоты в опыте ДСК ( $T_{50}(\text{ДСК})$ ), а также с использованием параметра  $R_{50}$ , отражающего степень устойчивости горючего материала к термоокислительной деструкции по сравнению с графитом (табл. 6).

Из трех классов устойчивости горючего материала в соответствии с работой О. R. Harvey с соавт. (2012): А –  $R_{50} < 0.50$ , слабая термоустойчивость (recalcitrance); В –  $0.5 \leq R_{50} < 0.70$ , средняя; С –  $R_{50} > 0.70$ , высокая, независимо от выбранных температурных интервалов для  $Q_i$ , кора хвойных попадает в класс А. Переход любого материала растительного происхождения из класса А в класс В по принятому в О. R. Harvey с соавт. (2012) способу определения устойчивости к термоокислительной деструкции невозможен принципиально, так как границе между классами А и В отвечает температура 50%-го термического разложения натуральных растительных образцов меньше  $411 ^\circ\text{C}$ .

В данном случае значения параметра  $R_{50}$  для КЛ и КС очень близки. Существенно различное распределение  $Q_i$  (%) для КЛ и КС обуславливает соответствующие вклады парциальных теплот  $Q_i$  (кДж/г) в интегральный экзотермический эффект термоокислительной деструкции коры (табл. 6).

Большой практический интерес, по нашему мнению, представляют результаты анализа продуктов флэш пиролиза КЛ и КС как сырья для пиролитической переработки с целью получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. На рис. 6 представлены типичные пирограммы КЛ и КС, а в табл. 7 – идентифицированные продукты.

Всего в экспериментах по Пи-ГХМС коры идентифицировано по 55 соединений на пирограммах КЛ и КС. Продукты пиролиза – это в основном производные углеводного и полифенольного комплексов вещества коры. Как видно из табл. 7, качественно составы пиролизатов КЛ и КС довольно схожи. Главное различие заключается в их относительном содержании.

Среди установленных соединений в пиролизате коры лиственницы преобладали (в %) глицидол (3.47), ацетон (4.59), 2,3-бутандион (1.02), фуран, 2-метил- (1.07), 2-пропанон, 1-гидрокси- (1.33), фурфурол (1.13), фенол (1.70), оксазолидин, 2,2-диэтил-3-метил-фенил (1.00), фенил, 2-метил- (1.54), р-крезол (2.33), фенол, 2-метокси- (1.54), креозол (2.66), катехол (4.57), 5-гидроксиметилфурфурол (1.17), 1,2-бензенидиол, 4-метил- (4.04), 2-метокси-4-винилфенол (3.50), ванилин (1.11), β-D-глюкопираноза, 1,6-ангидро- (2.93), транс-изоэвгенол (2.00), кониферилловый альдегид (1.04), (Е)-3,3'-диметокси-4,4'-дигидроксиستيرбен (1.22), g-ситостерол (1.61).

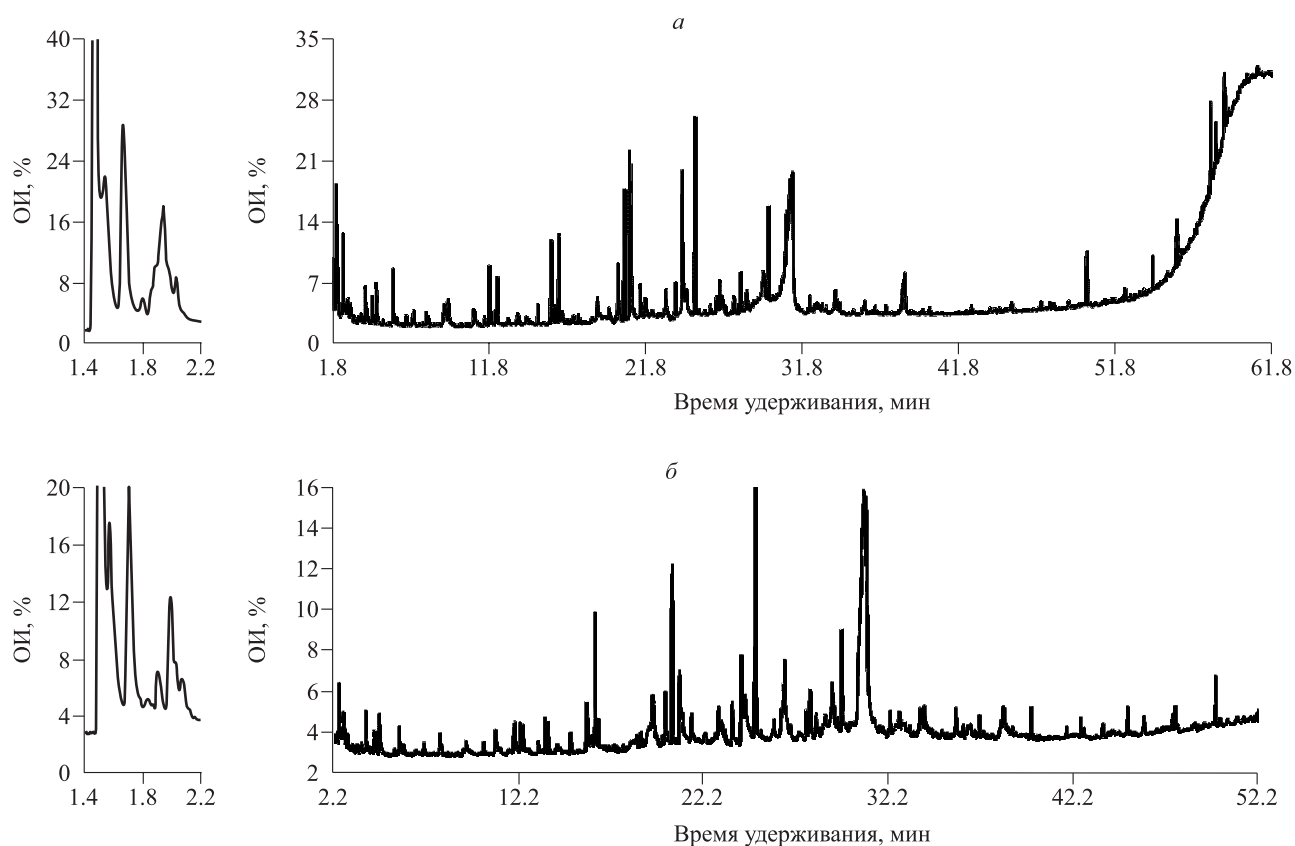


Рис. 6. Типичные пирограммы коры лиственницы и сосны. ОИ – относительная интенсивность.

Преобладающими продуктами пиролиза коры сосны являются (в %) глицидол (2.87), ацетон (3.21), 2,3-бутандион (1.54), фурфурол (10.66), *p*-крезол (1.19), фенол, 2-метокси- (2.00), креозол (2.45), катехол (5.10), бензофуран, 2,3-дигидро- (2.56), 1,2-бензендиол, 4-метил- (3.37), 2-метокси-4-винилфенол (3.75),  $\beta$ -D-глюкопираноза, 1,6-ангидро- (1.73), транс-изовангенол (1.54), апоцинин (8.79), гексадекановая кислота, 2-гидрокси-1-(гидроксиметил) этиловый эфир (1.35), (E)-3,3'-диметокси-4,4'-дигидроксистильбен (1.08), *g*-ситостерол (1.31).

Большое различие наблюдается в содержании фурфурола, в пиролизате КС его на 9.5 % больше, чем в КЛ. Можно отметить, что в составе продуктов пиролиза КС больше по массовой доле соединений, образующихся в результате термического разложения полифенольного комплекса.

В сравнительно небольших количествах в пиролизатах КЛ и КС присутствуют соединения, используемые в производстве различных товаров. Так, уксусная кислота используется в качестве пищевой добавки, а также является хорошим антимикробным агентом благодаря ее способности снижать pH. Ее используют для получения ацетона – широко используемого органического растворителя.

Ванилин очень востребован как ароматизатор пищевых продуктов и компонент парфюмерных композиций. В фармакологии он применяется при производстве антигипертензивных препаратов (Chen et al., 2019).

Эвгенол обладает пряным ароматом гвоздики. Он используется в пищевой промышленности, а также в качестве ароматизатора при изготовлении косметики, мыла, табачной продукции и т. д. (Гайле и др., 2000). Обладая бактерицидным действием, эвгенол используется в стоматологии в качестве антисептика и анальгетика (Jadhav et al., 2004).

Фуран, 2-метил- находит применение в фармацевтической промышленности при производстве витамина B<sub>1</sub>, хлорохин и прометазин фосфата (Carrasco et al., 2018).

2-метокси-4-винилфенол, фенол, 4-этил-2-метокси- используются в пищевой промышленности в качестве пищевых добавок и ароматизаторов (Chen et al., 2019).

Поскольку в составе пиролизатов значительную долю составляют продукты фенольного характера, то для разделения пиролизной жидкости (ПЖ) предлагается достаточно простая трехстадийная схема фракционирования (Валеева, 2022) с получением основного про-

**Таблица 7.** Продукты флэш-пиролиза коры лиственницы и сосны

| Компонент                                   | КЛ      |      | КС      |       | Происхождение |
|---------------------------------------------|---------|------|---------|-------|---------------|
|                                             | ВУ, мин | А, % | ВУ, мин | А, %  |               |
| 1                                           | 2       | 3    | 4       | 5     | 6             |
| Глицидол                                    | 1.58    | 3.47 | 1.60    | 2.87  |               |
| Ацетон                                      | 1.73    | 4.59 | 1.67    | 3.21  | ПС            |
| 2,3-Бутандион                               | 1.98    | 1.02 | 1.98    | 1.54  | ПС            |
| Уксусная кислота                            | 2.03    | 0.73 | 2.11    | 0.73  | ПС            |
| Фуран, 2-метил-                             | 2.09    | 1.07 | —       | —     | ПС            |
| 2-Пропанон, 1-гидрокси-                     | 2.48    | 1.33 | 2.50    | 0.93  |               |
| Гептан, 1-фтор-                             | —       | —    | 2.69    | 0.47  | ПС            |
| 1-Гептен                                    | 2.81    | 0.34 | 2.75    | 0.20  |               |
| Фуран, 2,5-диметил-                         | 2.91    | 0.41 | —       | —     | ПС            |
| Пропановая кислота, 2-оксо-, метиловый эфир | —       | —    | 4.43    | 0.37  |               |
| 2-Пропанон, 1-гидрокси-                     | 3.83    | 0.70 | —       | —     |               |
| Пропановая кислота, 2-оксо-, метиловый эфир | 4.38    | 0.49 | —       | —     |               |
| 1-Гептен, 3-метил-                          | 4.51    | 0.21 | —       | —     |               |
| Фурфурол                                    | 5.64    | 1.13 | 5.67    | 10.66 | ПС            |
| 4-Циклопентен-1,3-дион                      | 6.70    | 0.15 | 5.80    | 0.17  | ПС            |
| 2-Фуранметанол                              | —       | —    | 6.43    | 0.19  |               |
| Стирол                                      | 7.73    | 0.22 | 7.84    | 0.08  | ПС            |
| 1-Нонен                                     | 8.00    | 0.21 | 8.06    | 0.21  | ПС*           |
| Гексанал, 3-метил-                          | 8.86    | 0.98 | 8.88    | 0.83  |               |
| 2-Циклопентен-1-он, 2-гидрокси-             | 9.33    | 0.63 | 9.40    | 0.31  |               |
| Камфен                                      | —       | —    | 10.32   | 0.17  |               |
| 2-Фуранкарбоновый альдегид, 5-метил-        | 10.89   | 0.43 | 10.84   | 0.15  | ПС            |
| Фенол                                       | 11.98   | 1.70 | 12.05   | 0.59  | ПС            |
| 1-Децен                                     | 12.19   | 0.30 | 12.36   | 0.37  | Л             |
| 2-Циклопентен-1-он, 2-гидрокси-3-метил-     | —       | —    | 13.58   | 0.12  |               |
| Оксазолидин, 2,2-диэтил-3-метил-            | 12.25   | 1.00 | —       | —     |               |
| о-Цимен                                     | —       | —    | 13.66   | 0.44  |               |
| D-Лимонен                                   | —       | —    | 13.73   | 0.34  |               |
| Фенил, 2-метил-                             | 15.05   | 1.54 | 15.11   | 0.33  | Л             |
| p-Крезол                                    | 15.90   | 2.33 | 15.91   | 1.19  | Л             |
| Фенол, 2-метокси-                           | 16.36   | 1.54 | —       | —     | Л             |
| 1-Ундецен                                   | 16.40   | 0.15 | —       | —     |               |
| Фенол, 2-метокси-                           | —       | —    | 16.41   | 2.00  | ПС            |
| 1-Ундецен                                   | —       | —    | 16.60   | 0.29  | Л*            |
| Мальтол                                     | 17.15   | 0.10 | 17.15   | 0.05  | Л*            |
| Фенол, 3,5-диметил-                         | 18.76   | 0.39 | —       | —     | Л             |
| Фенол, 4-этил-                              | 19.60   | 0.20 | —       | —     | Л             |
| Креозол                                     | 20.54   | 2.66 | 20.59   | 2.45  | Л             |
| Катехол                                     | 20.91   | 4.57 | 21.05   | 5.10  | Л             |
| Бензофуран, 2,3-дигидро-                    | 21.60   | 0.70 | 21.60   | 2.56  | Л*            |
| 5-Гидроксиметилфурфурол                     | 21.75   | 1.17 | 21.73   | 0.59  | ПС            |
| 1,2-Бензендиол, 3-метил-                    | 23.05   | 0.81 | 23.05   | 0.37  | Л*            |
| Фенол, 4-этил-2-метокси-                    | 23.80   | 0.72 | 23.86   | 0.69  | Л             |
| 1,2-Бензендиол, 4-метил-                    | 24.20   | 4.04 | 24.16   | 3.37  | Л*            |
| 2-Метокси-4-винилфенол                      | 25.06   | 3.50 | 25.10   | 3.75  | Л             |
| Фенол, 4-(2-пропенил)-                      | 25.89   | 0.12 | 25.96   | 0.42  | Л             |
| Эвгенол                                     | 26.53   | 0.77 | 26.53   | 0.65  | Л             |
| 1-Тетрадецен                                | 27.74   | 0.26 | 27.75   | 0.37  |               |

Окончание табл. 7

| 1                                                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6  |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----|
| Ванилин                                           | 28.01 | 1.11  | 28.06 | 0.70  | Л  |
| Транс-изоэвгенол                                  | 28.27 | 0.34  | 28.36 | 0.35  | Л  |
| b-D-Глюкопираноза, 1,6-ангидро-                   | 29.30 | 2.93  | 29.31 | 1.73  | ПС |
| Транс-изоэвгенол                                  | 29.73 | 2.00  | 29.66 | 1.54  | Л  |
| Апоцинин                                          | 30.84 | 1.94  | 30.82 | 8.79  |    |
| b-D-Глюкопираноза, 1,6-ангидро-                   | 30.87 | 1.75  | 31.03 | 20.14 | ПС |
| b-D-Глюкопираноза, 1,6-ангидро-                   | 31.27 | 13.95 | —     | —     | ПС |
| 2-Пропанон, 1-(4-гидрокси-3-метоксифенил)         | 32.28 | 0.56  | 32.28 | 0.31  | ПС |
| Цетен                                             | —     | —     | 34.18 | 0.28  |    |
| 1-Пропанол,3-(4-гидрокси-3-метоксифенил)-1-ацетат | 35.85 | 0.40  | 35.94 | 0.56  |    |
| 1-Гептадецен                                      | 37.12 | 0.20  | —     | —     |    |
| (Е)-4-(3-Гидроксипроп-1-ен-1-ил)-2-метоксифенол   | —     | —     | 38.52 | 0.91  | Л  |
| Кониферилловый альдегид                           | 38.24 | 1.04  | 38.24 | 0.65  | Л  |
| (Е)-4-(3-Гидроксипроп-1-ен-1-ил)-2-метоксифенил   | 38.41 | 0.66  | —     | —     |    |
| 1-Нонадецен                                       | 42.61 | 0.19  | 42.61 | 0.31  |    |
| 1-Гептакозанол                                    | 54.21 | 0.78  | 54.26 | 0.34  |    |
| Гексадекановая кислота,                           | —     | —     | 56.00 | 1.35  |    |
| 2-гидрокси-1-(гидроксиметил)этиловый эфир         |       |       |       |       |    |
| (Е)-3,3'-Диметокси-4,4'-дигидроксистильбен        | 57.88 | 1.22  | 57.88 | 1.08  |    |
| g-Ситостерол                                      | 58.71 | 1.61  | 58.74 | 1.31  |    |

Примечание. ВУ – время удерживания; А – относительная площадь пика, прямо пропорциональна массовой доле компонента; ПС – полисахариды; Л – лигнин. Суммарная площадь идентифицированных пиков КЛ – 77.6 %, КС – 89.7 %. Вероятность соответствия с базой данных NIST 91 – 99 %. \* Предположительное происхождение, требующее дополнительного подтверждения.

дукта – комплекса фенольных производных, – имеющего практическое применение при создании новых композиций фенолформальдегидных смол (Валеева и др., 2021), в производстве жестких пенополиуретанов (Валиуллина и др., 2021) и т.п. (рис. 7).

На первом этапе пиролизная жидкость (ПЖ-1) подвергается вакуумной разгонке для удаления уксусной кислоты и летучих терпеноидов. Далее полученный остаток (ПЖ-2) подвергается последовательно водной экстракции для выделения углеводных компонентов и органическим растворителем для извлечения нейтральных веществ. Неэкстрагируемый остаток представляет собой фенольный комплекс (ФК).

В исследовании использовались аналитические приборы и оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов измерений с помощью методов ТГ/ДТГ, ДСК, ГХ/МС, Пи-ГХ/МС и рассчитанных параметров физико-химических свойств коры лиственницы сибирской и сосны обыкновенной установлены их сходства и различия.

Представленные данные термического анализа коры сибирских хвойных пород свиде-

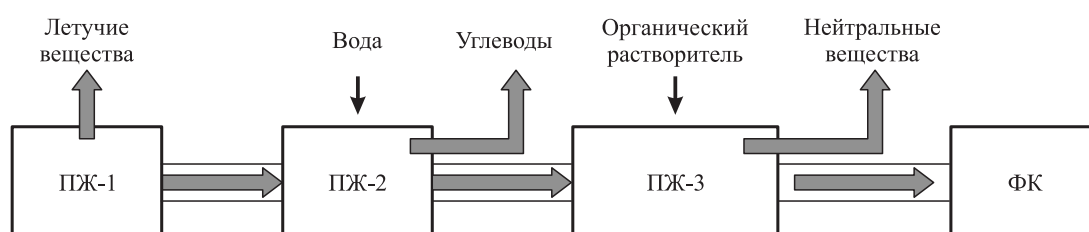


Рис. 7. Схема фракционирования жидких продуктов быстрого пиролиза (Валеева, 2022), которая может быть использована для фракционирования ПЖ коры сосны и лиственницы.

тельствуют о возможности ее использования в качестве смешанного насыпного теплоизоляционного материала с улучшенными санитарными свойствами, обусловленными пролонгированной эмиссией биологически активных терпенов, а также в качестве сырья для производства биотоплива (например, пеллет или композитных с отходами зернопроизводства топливных брикетов) с приемлемой удельной теплотой сгорания около 20 МДж/кг.

В состав продуктов пиролиза коры лиственницы и сосны входят соединения, которые применяются в производстве фенолформальдегидных смол, пенополиуретанов, синтетической резины, пестицидов; используются как ароматизаторы в парфюмерии и пищевой промышленности; являются прекурсорами для синтеза веществ, применяемых для создания композиций в парфюмерии и фармацевтике и т. п., что указывает на экономическую целесообразность использования коры в качестве сырья для пиролизической переработки с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н. П. Лесная таксация. 6-е изд. М.: ВНИИЛМ, 2004. 552 с.
- Валеева А. Р., Валиуллина А. И., Бикбулатова Г. М., Башкиров В. Н. Уменьшение массовой доли свободного формальдегида в фенолоформальдегидных смолах с замещением фенола жидкими продуктами пиролиза древесины // Деревообр. пром-сть. 2021. № 3. С. 94–102.
- Валеева А. Р. Применение жидких продуктов быстрого пиролиза древесных отходов в качестве компонента фенолоформальдегидных смол: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.21.03. Казань: КНИТУ, 2022. 16 с.
- Валиуллина А. И., Грачев А. Н., Валеева А. Р., Бикбулатова Г. М., Забелин С. А., Башкиров В. Н. Использование биополиолов, полученных из жидких продуктов пиролиза березовых опилок, в качестве возобновляемого компонента в производстве жестких пенополиуретанов // Все материалы. Энциклопед. справочник. 2021. № 10. С. 41–48.
- Гайле А. А., Сомов В. Е., Варшавский О. М. Ароматические углеводороды: выделение, применение, рынок: справочник. СПб.: Химиздат, 2000. 544 с.
- Лоскутов С. Р., Петрунина Е. А., Шапченкова О. А., Плещинник М. А., Стасова В. В. Физико-химические показатели коры лиственницы сибирской: натуральной, химически модифицированной и после адсорбции катионов тяжелых металлов // Лесн. вестн. 2020. Т. 24. № 2. С. 98–110.
- Лотова Л. И. Анатомия коры хвойных. М.: Наука, 1987. 152 с.
- Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов. М.: Экология, 1991. 320 с.
- Рязанова Т. В., Ренях С. М. Химия и технология коры. Красноярск: КГТА, 1996. 302 с.
- Семенович А. В., Лоскутов С. Р. Адсорбция катионных красителей модифицированной корой хвойных древесных пород // Хим. раст. сырья. 2004. № 3. С. 121–125.
- Baroni É. G., Tannous K., Rueda-Ordóñez Y. J., Tinoco K. The applicability of isoconversional models in estimating the kinetic parameters of biomass pyrolysis // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 123. N. 2. P. 909–917.
- Carrasco E., Smith K. J., Meloni G. Synchrotron photoionization study of Furan and 2-Methylfuran reactions with Methylidyne radical (CH) at 298 K // J. Phys. Chem. A. 2018. V. 122. N. 1. P. 280–291.
- Chen H., Yue X., Yang J., Lv C., Dong S., Luo X., Sun Z., Zhang Y., Li B., Zhang F., Gu H., Yang Y., Zhang Q., Ge S., Bi H., Zheng D., Zhao Y., Li C., Peng W. Pyrolysis molecule of *Torreya grandis* bark for potential biomedicine // Saudi J. Biol. Sci. 2019. V. 26. Iss. 4. P. 808–815.
- Dave A., Gupta G. K., Mondal M. K. Study on thermal degradation characteristics, kinetics, thermodynamic, and reaction mechanism analysis of *Arachis hypogaea* shell pyrolysis for its bioenergy potential // Biomass Convers. Biorefin. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01749-7> (Publ. online: 14 July 2021).
- Dibdiakova J., Wang L., Li H. Characterization of ashes from *Pinus Sylvestris* forest biomass // The 7<sup>th</sup> Int. Conf. Appl. Energy – ICAE2015 Energy Proc. 2015. V. 75. P. 186–191.
- Dulman V., Odochian L., Dumitras M., Cucu-Man S. A study by non-isothermal thermal methods of spruce wood bark materials after their application for dye removal // J. Serb. Chem. Soc. 2005. V. 70. N. 11. P. 1325–1333.
- Harvey O. R., Kuo L.-J., Zimmerman A. R., Louchouart P., Amonette J. E., Herbert B. E. An index-based approach to assessing recalcitrance and soil carbon sequestration potential of engineered black carbons (biochars) // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. N. 3. P. 1415–1421.
- Jadhav D. K., Khandelwal K. R., Ketkar A. R., Pisal S. S. Formulation and evaluation of mucoadhesive tablets containing eugenol for the treatment of periodontal diseases // Drug Develop. Industr. Pharm. 2004. V. 30. N. 2. P. 195–203.
- Mamleev V., Bourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG // J. Therm. Anal. Calorim. 2004. V. 78. P. 1009–1027.
- Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data // Chem. Soc. Jap. 1965. V. 38. N. 11. P. 1881–1886.
- Páztory Z., Mohácsiné I. R., Gorbacheva G., Börcsök Z. The utilization of tree bark // BioRes. 2016. V. 11. N. 3. P. 7859–7888.
- Petrutina E. A., Shapchenkova O. A., Loskutov S. R. Physicochemical parameters of Siberian larch (*Larix sibirica* L.) bark extracted with water-amino-alcoholic extractants // Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya (Chem. Plant Raw Mat.). 2021. N. 2. P. 103–107.
- Santín C., Doerr S. H., Merino A., Bucheli T. D., Bryant R., Ascough P., Gao X., Masiello C. A. Carbon sequestration potential and physicochemical properties differ between wildfire charcoals and slow-pyrolysis biochars // Sci. Rep. 2017. V. 7. Article number: 11233.
- Shangguan W., Chen Z., Zhao J., Song X. Thermogravimetric analysis of cork and cork components from *Quercus variabilis* // Wood Sci. Technol. 2018. V. 52. P. 181–192.

Shao Q., Wang C., Liu H., Wang Y., Guo J. Reaction mechanism and evolved gases of larch bark pyrolysis by TG-FT-IR analysis // Wood Sci. Technol. 2019. V. 53. Iss. 5. P. 101–118.

Yue X., Li X., Chen X., Ashraf M. A., Liu Z., Bi H., Zheng D., Zhao Y., Peng W. Molecules and functions of *Cornus officinalis* bark volatiles // Emir. J. Food Agr. 2018. V. 30. Iss. 10. P. 828–838.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF LARCH AND PINE BARK: THERMAL ANALYSIS AND ANALYTICAL PYROLYSIS

E. A. Petrunina<sup>1</sup>, S. R. Loskutov<sup>1</sup>, T. V. Ryazanova<sup>2</sup>, A. A. Aniskina<sup>1</sup>,  
G. V. Permyakova<sup>1</sup>, V. V. Stasova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
Prospekt Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049 Russian Federation

E-mail: petrunina@ksc.krasn.ru, lsr@ksc.krasn.ru, tatyana-htd09@mail.ru, aniskina\_a@ksc.krasn.ru, vistasova@mail.ru

The study focuses on the thermal analysis and flash pyrolysis of bark of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Using thermogravimetry (TG/DTG) and differential scanning calorimetry (DSC), a number of patterns of thermal decomposition of bark were established. The fourth derivatives of the DTG contours revealed differences in the “fractionality” of mass loss during heating of the bark samples. The thermal decomposition kinetics of bark was investigated using the Ozawa – Flynn – Wall isoconversion method. The obtained dependence of the activation energy ( $E_a$ ) on the conversion degree was used to calculate the thermodynamic parameters ( $\Delta H$ ,  $\Delta G$  and  $\Delta S$ ) of thermal decomposition. The mean values of  $E_a$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  and  $\Delta S$  were 206.7, 201.1, 248.7 kJ/mol and –78.0 J/(mol×K) for larch bark (LB) and 235.3, 229.7, 310.6 kJ/mol and –129.4 J/(mol×K) for pine bark (PB). The composition of mono-, sesqui-, diterpenes and oxygen-containing hydrocarbons of bark was determined by headspace GC/MS analysis. 37 and 41 volatile organic compounds were identified for LB and PB, respectively. The thermal stability of LB and PB was characterized using recalcitrant indices calculated from TG and DSC data. Integral values of exothermic effects of thermo-oxidative degradation were 15.1 kJ/g for LB and 15.9 kJ/g for PB. 55 flash pyrolysis products were identified, which accounted for 77.6 % of the total peak area for LB and 89.7 % for PB.

**Keywords:** bark, larch, pine, thermal analysis, analytical pyrolysis.

**How to cite:** Petrunina E. A., Loskutov S. R., Ryazanova T. V., Aniskina A. A., Permyakova G. V., Stasova V. V. Comparative analysis of physical-chemical properties of larch and pine bark: thermal analysis and analytical pyrolysis // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 35–49 (in Russian with English abstract ).

УДК 635.939.43:581.165.1(571.5)

## ОПЫТ РАЗМНОЖЕНИЯ И ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ВЕГЕТАТИВНОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ *Phlox sibirica* L. В КУЛЬТУРЕ НА ЮГЕ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

М. А. Мартынова, А. И. Лобанов

Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии СО РАН  
655132, Республика Хакасия, Усть-Абаканский р-он, с. Зеленое, ул. Садовая, 5

E-mail: artemisiadracun61@mail.ru, anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

Привлечение новых видов и сортов декоративных растений – актуальная задача зеленого и ландшафтного строительства. Целью исследований стало обобщение опыта и изучение динамики развития вегетативного возобновления флокса сибирского (*Phlox sibirica* L.) в культуре на юге Средней Сибири. В годы наблюдений определялась площадь дерновинок, образуемых разводочным материалом в течение вегетационного периода. По методике Б. А. Доспехова в Хакасском ботаническом саду методом организованных повторений высаживали в три срока с двумя вариантами (с укрытием и без укрытия) кусочки молодых корневищ растения с одним надземным побегом. В процессе наблюдения в начале вегетации фиксировали число побегов и площадь вегетативного возобновления в течение 3 лет (2006–2008 гг.). Установлено, что в первый год вегетации площадь дерновинок увеличилась в 2.0–5.0 раз, во второй – в 1.5–3.3 раза, в третий – в 1.5–4.0 раза. Полученные результаты исследований достоверны на 5 %-м уровне значимости. За 3 года вегетации площадь дерновинок в вариантах с первоначальным укрытием увеличилась в 27.5–50.0 раз, без укрытия – в 50.0–128.0 раз. Наиболее активное вегетативное возобновление происходило у растений, посаженных в самые ранние сроки (в начале апреля), где на третий год вегетации растений отмечено максимальное значение площади дерновинок ( $1.1 \pm 0.02 \text{ м}^2$ ). В среднем за первый год вегетации в варианте с укрытием сформировались дерновинки площадью 0.05 м<sup>2</sup>, а без укрытия – 0.03 м<sup>2</sup>, за второй год вегетации – соответственно 0.33 и 0.27 м<sup>2</sup>, за третий год – 0.57 и 0.6 м<sup>2</sup>. В засушливых условиях юга Средней Сибири для озеленения и ландшафтного строительства перспективно использование флокса сибирского, образующего хорошее вегетативное возобновление и не требующего систематического полива.

**Ключевые слова:** флокс сибирский, озеленение и ландшафтное строительство, Хакасский ботанический сад.

DOI: 10.15372/SJFS20220405

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях существует тенденция привлечения в культуру озеленения и ландшафтного строительства новых видов и сортов декоративных растений (Ханбабаева и др., 2020). Для успешного использования каждой новой культуры необходимо разработать способы ускоренного размножения, улучшить приемы ее агротехники (Мазко, 2019), а также изучить особенности вегетативного возобновления.

Виды рода флокс (*Phlox* L.) широко используются в озеленении городов и населенных пунктов как в России (Верещагина и др., 1969;

Зубкус, Пятицкая, 1978; Долганова, 2002; Фомина, 2012; Бутенкова, 2014), так и за рубежом (Arends, 1951; Gleason, Cronquist, 1991; Locklear, 2011).

Флокс сибирский (*Phlox sibirica* L.) относится к семейству синюховые (Polemoniaceae). Это многолетний приземистый корневищный полукустарничек с сильно разветвленным основанием, от которого отходят многочисленные стелющиеся и восходящие побеги высотой 10–15 см (рис. 1).

Флокс сибирский образует рыхлые дерновинки. Корневище у него тонкое и ветвистое. В естественных местообитаниях растет по ка-



Рис. 1. Цветущий флокс сибирский в Хакасском ботаническом саду.

менистым южным склонам, по сухим лугам в лесных и степных районах Заволжья и Сибири (Алексеев и др., 1971; Приходько, Михайловская, 1991; Тельпуховская, 1991). Растения декоративны, засухоустойчивы, относятся к экологической группе ксерофитов (Растительный покров..., 1976).

Вид внесен в Красные книги Иркутской (2010) и Кемеровской (2012) областей, Республики Хакасия (2012) и Республики Тыва (2019), Красноярского края (2012). До настоящего времени в озеленении юга Средней Сибири флокс сибирский широко не использовался.

Сведения об использовании этого вида немногочисленны. Т. И. Фомина (2012) после испытания флокса сибирского в Центральном сибирском ботаническом саду отмечает, что условия возделывания его в Новосибирской области не совсем благоприятные, он входит в группу неустойчивых видов, освоение которых возможно лишь при всестороннем изучении ритмов развития, биологии цветения, формирования семян и физиолого-биохимических особенностей. Л. П. Зубкус и Л. И. Пятницкая (1978) считают, что флокс сибирский плохо поддается культуре, слабо развивается и выпадает. Это растение также культивируется в Ботаническом саду УрО РАН в г. Екатеринбурге (Красная книга..., 2008).

Виды из рода флокс неприхотливы в культуре, размножаются вегетативно и семенами

(Приходько, Михайловская, 1991). Флокс сибирский при культивировании на юге Средней Сибири не дает семян и его размножение возможно только вегетативным способом. Вопросы, связанные с ускоренным размножением и эффективным возделыванием в культуре флокса сибирского как декоративного и засухоустойчивого растения, охраняемого Красными книгами, весьма актуальны.

Целью исследований стало обобщение опыта размножения и вегетативного возобновления флокса сибирского в культуре на юге Средней Сибири. Для этого необходимо было изучить динамику развития его вегетативного потомства и определить площади дерновинки, образуемых разводимым материалом в течение года.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа проведена на юге Средней Сибири в Хакасском ботаническом саду НИИ аграрных проблем Хакасии СО РАН в 2006–2008 гг. Объектом исследования служило вегетативное возобновление флокса сибирского. Ежегодно, по методике Б. А. Доспехова (1985), закладывали опыты на делянках площадью 1 м<sup>2</sup> методом организованных повторений в четырехкратной повторности в двух вариантах: с укрытием и без укрытия. Всего в каждый год исследований было заложено 24 делянки.

Кратковременное укрытие (первые 2 нед полиэтиленом, следующие 2 нед – агроспаном) использовали на период укоренения разводочного материала. Посадку растений в количестве 20 экз. на каждой делянке проводили в три срока с интервалом в 2 нед. Первый срок посадки проходил в первых числах апреля. Посадочная единица состояла из кусочка молодого корневища длиной около 1 см с одним придаточным корнем и укороченным надземным побегом, имеющим одну пару листьев. Расстояние между растениями в ряду 1.5–2.0 см, между рядами – 5 см. Полив из расчета 15 л/м<sup>2</sup> проводили только при посадке, дальнейшее увлажнение – только атмосферное.

Для определения динамики вегетативного возобновления замеряли площадь всех дерновин, образованных каждой посадочной единицей на каждой делянке. Материалы опытов подвергали статистической обработке в программе Microsoft Excel с применением однофакторного дисперсионного анализа.

Климат в районе исследования резко континентальный: среднегодовая температура воздуха –0.2 °С; амплитуда абсолютных температур достигает 77 °С при максимуме 37 °С и минимуме –40 °С. Годовая сумма осадков 286 мм, до 90.5 % их приходится на теплый период. При средней высоте снежного покрова 11 см происходит глубокое (до 1.5–2.7 м) промерзание каштановой среднесуглинистой почвы. Содержание гумуса в горизонте А составляет всего 3.0–4.5 %. И зи-

мой, и летом характерна большая скорость ветра (Агроклиматический справочник..., 1961; Растительный покров..., 1976).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт культивирования флокса сибирского в Хакасском ботаническом саду с 1995 г. показывает, что растения хорошо размножаются вегетативным путем и по хозяйственному использованию, по мнению М. А. Мартыновой (2010), относятся к почвопокровным (рис. 2).

Закладка опытов по размножению флокса сибирского на юге Средней Сибири показана на рис. 3.

В табл. 1 представлены данные по развитию вегетативного потомства флокса сибирского в первый год жизни при его посадке в 2008 г.

Отметим, что в первый год вегетации флокса сибирского образовались дерновинки. Во время летнего учета выявлено, что в 1-й срок посадки площадь, занятая корневищным растением под укрытием, была в 5.7 раза больше, чем без укрытия, во 2-й – в 1.3 раза, а в 3-й, наоборот, дерновинки были больше на участке без укрытия.

В осенний учет эти тенденции сохранились. Очевидно, причина в том, что под укрытием почва сильнее уплотнялась, и это отрицательно повлияло на фазы развития вегетативных органов растений, посаженных в 3-й срок.

Полученные результаты 1-го срока посадки под укрытием – лучшие, так как для растений

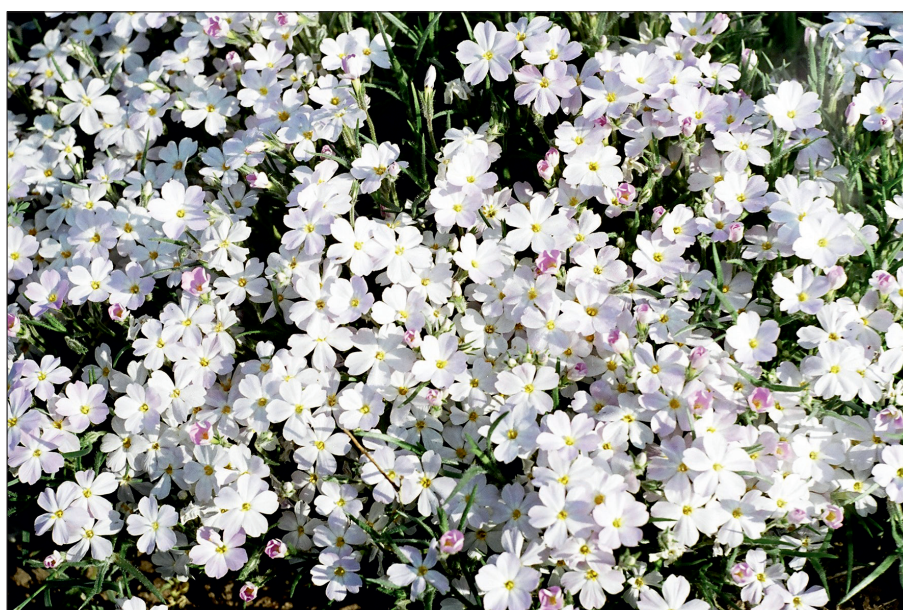


Рис. 2. Флокс сибирский – почвопокровное растение в культуре Хакасского ботанического сада в период массового цветения.



Рис. 3. Экспериментальный участок по размножению флокса сибирского в Хакасском ботаническом саду.

складывались наиболее оптимальные условия произрастания: дольше сохранялась влага в почве и дневные температуры были ниже, чем в последующие сроки посадки. Во время летнего учета также выявлено, что площадь дерновинок 1-го срока посадки под укрытием превышала площадь дерновинок 2-го срока посадки в 5 раз, во время осеннего учета – в 2 раза. Для варианта с укрытием отмечена достоверная разница по влиянию сроков посадки на разрастание дерновинок на 5 %-м уровне значимости (наименьшая существенная разница составляла 0.0063). В варианте без укрытия сроки посадки не повлияли на скорость разрастания дерновинок. Однако выявлена существенная разница при сравнении площадей с укрытием и без укрытия в 1-й срок посадки.

Таблица 1. Вегетативное возобновление флокса сибирского в год посадки

| Срок посадки | 22.07.2008                         |      | 10.09.2008                         |      |
|--------------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|
|              | Площадь дерновинок, м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинок, м <sup>2</sup> | V, % |
| С укрытием   |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 0.04 ± 0.0009                      | 5    | 0.08 ± 0.009                       | 21   |
| 2-й          | 0.008 ± 0.0006                     | 16   | 0.04 ± 0.002                       | 8    |
| 3-й          | 0.004 ± 0.0002                     | 12   | 0.02 ± 0.002                       | 19   |
| Без укрытия  |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 0.007 ± 0.0005                     | 13   | 0.03 ± 0.003                       | 21   |
| 2-й          | 0.006 ± 0.0004                     | 15   | 0.03 ± 0.004                       | 26   |
| 3-й          | 0.007 ± 0.002                      | 51   | 0.03 ± 0.001                       | 10   |

Примечание. Здесь и далее: V – коэффициент вариации.

**Таблица 2.** Вегетативное возобновление флокса сибирского за 2 года вегетации при посадке в 2007 г.

| Срок посадки | Первый год жизни                   |      |                                    |      | Второй год жизни                   |      |                                    |      |
|--------------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|
|              | 31.08.2007                         |      | 09.04.2008                         |      | 22.07.2008                         |      | 10.09.2008                         |      |
|              | Число побегов, экз./м <sup>2</sup> | V, % | Число побегов, экз./м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % |
| С укрытием   |                                    |      |                                    |      |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 58.0 ± 4.7                         | 4    | 66.6 ± 1.6                         | 4    | 0.2 ± 0.006                        | 5    | 0.3 ± 0.02                         | 11   |
| 2-й          | 103 ± 3.6                          | 7    | 78.5 ± 2.1                         | 5    | 0.2 ± 0.01                         | 11   | 0.4 ± 0.02                         | 4    |
| 3-й          | 38.5 ± 2.0                         | 10   | 33 ± 1.0                           | 6    | 0.2 ± 0.01                         | 21   | 0.3 ± 0.01                         | 5    |
| Без укрытия  |                                    |      |                                    |      |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 28.5 ± 3.2                         | 22   | 26.3 ± 0.8                         | 6    | 0.2 ± 0.01                         | 12   | 0.3 ± 0.02                         | 11   |
| 2-й          | 17.8 ± 0.8                         | 8    | 19.5 ± 3.3                         | 33   | 0.06 ± 0.007                       | 20   | 0.2 ± 0.007                        | 6    |
| 3-й          | 31.3 ± 3.3                         | 21   | 31 ± 1.2                           | 7    | 0.1 ± 0.009                        | 13   | 0.3 ± 0.02                         | 15   |

Анализ вегетативного возобновления за вегетационный период показал, что площадь дерновинок под укрытием увеличилась в 4.3–5.0 раза, без укрытия – в 2.0–5.0 раз. В среднем за первый вегетационный период из 20 экз. тоненьких побегов в варианте с использованием укрытия появились дерновинки площадью 0.05 м<sup>2</sup>, без укрытия – 0.03 м<sup>2</sup>.

В табл. 2 представлены данные по развитию естественного возобновления флокса первого и второго года жизни.

В первый год вегетации наблюдали активное вегетативное возобновление. Численность побегов в августе значительно превысила первоначальное количество (за исключением 2-го срока посадки в варианте без укрытия). Численное преимущество на делянках 2-го срока посадки в варианте с укрытием объясняется действием мышевидных грызунов (*Rodentia Bowdich*), которые частично нарушили корневую систему растений на делянках 1-го срока посадки.

В зимний период складывались не совсем благоприятные условия для перезимовки растений, поэтому на некоторых делянках число побегов уменьшилось. К неблагоприятным условиям относятся глубокое промерзание почвы, иссушение ее поверхностного слоя, неглубокий (до 15 см и менее) снеговой покров. При сравнении показателей в разных вариантах опыта по срокам посадки и укрытию существенной разницы во время проведения летнего и осенних учетов не выявлено.

Нами была определена разница между показателями площадей дерновинок летнего и осеннего периода, которые достоверны на 5%-м уровне значимости (наименьшая существенная разница 0.069). Большее увеличение площади дерновинок произошло там, где была выше численность побегов. Динамика вегетативного возобновления флокса сибирского такова, что за вегетационный период дерновинка в варианте с укрытием увеличилась в 1.5–2.0 раза, без

**Таблица 3.** Динамика вегетативного возобновления флокса сибирского за 3 года вегетации при посадке в 2006 г.

| Срок посадки | 31.08.2006                         | 10.04.2007 | 31.08.2007                         |      | 16.04.2008                         |      | 22.07.2008                         |      | 10.09.2008                         |      |
|--------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|
|              | Число побегов, экз./м <sup>2</sup> |            | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % | Площадь дерновинки, м <sup>2</sup> | V, % |
| С укрытием   |                                    |            |                                    |      |                                    |      |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 32.2 ± 5.1                         | 30.0 ± 1.5 | 0.3 ± 0.02                         | 10   | 0.5 ± 0.03                         | 16   | 0.8 ± 0.02                         | 6    | 1.1 ± 0.04                         | 7    |
| 2-й          | 17.0 ± 5.2                         | 11.8 ± 4.1 | 0.1 ± 0.02                         | 23   | 0.1 ± 0.02                         | 26   | 0.4 ± 0.02                         | 8    | 0.4 ± 0.01                         | 5    |
| 3-й          | 9.3 ± 1.4                          | 6.0 ± 1.2  | 0.09 ± 0.01                        | 12   | 0.1 ± 0.01                         | 13   | 0.2 ± 0.01                         | 7    | 0.2 ± 0.03                         | 30   |
| Без укрытия  |                                    |            |                                    |      |                                    |      |                                    |      |                                    |      |
| 1-й          | 47.3 ± 2.1                         | 43.3 ± 2.2 | 0.4 ± 0.01                         | 9    | 0.5 ± 0.02                         | 6    | 0.7 ± 0.02                         | 4    | 0.9 ± 0.08                         | 17   |
| 2-й          | 20.5 ± 1.9                         | 16.5 ± 1.7 | 0.1 ± 0.02                         | 30   | 0.2 ± 0.02                         | 21   | 0.2 ± 0.03                         | 27   | 0.3 ± 0.02                         | 10   |

Примечание. Третий срок посадки в варианте В отсутствует по антропогенным причинам.

укрытия – в 1.5–3.0 раза. В среднем за второй год вегетации в варианте с укрытием площадь дерновинок составила 0.33 м<sup>2</sup>, а без укрытия – 0.27 м<sup>2</sup>.

В табл. 3 представлены данные по динамике развития вегетативного возобновления флокса сибирского за 3 года вегетации.

За зимний период 2006/07 г. произошло небольшое уменьшение числа побегов из-за неблагоприятных условий во время перезимовки. За период с 31.08.2007 г. по 16.04.2008 г. произошло увеличение размеров дерновинок благодаря тому, что растения активно вегетировали в сентябре 2007 г. Динамика вегетативного возобновления флокса сибирского такова, что за вегетационный период 2008 г. площадь дерновинок в варианте с укрытием увеличились в 2.0–4.0 раза, а в варианте без укрытия – в 1.5–1.8 раза. В летние и осенние учеты выявлена достоверная разница по влиянию сроков посадки: наименьшее ее значение на 5 %-м уровне значимости для летнего учета составило 0.141, для осеннего – 0.101. Укрытие, которое применялось в период посадки растений, не оказало существенного влияния на дальнейшее развитие флокса сибирского.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флокс сибирский следует размножать ранней весной, когда за 3 года можно вырастить из 20 побегов дерновинку площадью  $1.1 \pm 0.02$  м<sup>2</sup>. За этот период получены следующие результаты: за первый год вегетации в варианте с укрытием сформировались дерновинки площадью 0.05 м<sup>2</sup>, в варианте без укрытия – 0.03 м<sup>2</sup>; за второй год – соответственно 0.33 и 0.27 м<sup>2</sup>; за третий год – 0.57 и 0.6 м<sup>2</sup>.

Установлено, что в первый год вегетации площадь дерновинок увеличилась в 2.0–5.0 раз, во второй – в 1.5–3.3 раза, в третий – в 1.5–4.0 раза. Результаты исследований достоверны на 5 %-м уровне значимости. За 3 года вегетации увеличение площади дерновинок в вариантах с первоначальным укрытием произошло в 27.5–50.0 раз, без укрытия – в 50.0–128.0 раз.

Определение динамики вегетативного возобновления флокса сибирского позволило выявить существенную разницу в площади дерновинок разных сроков посадки и в показателях летнего и осеннего периодов, которые достоверны на 5 %-м уровне значимости. Накопленный опыт по размножению флокса сибирского в засушливых условиях юга Средней Сибири свидетельству-

ет о том, что он перспективен для озеленения и ландшафтного строительства, так как образует хорошее вегетативное возобновление и не требует систематического полива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской автономной области.* Л.: Гидрометеониздат, 1961. 288 с.
- Алексеев Ю. Е., Вехов В. Н., Гапочка Г. П., Дундин Ю. К., Павлов В. Н., Тихомиров В. Н., Филлин В. Р. Травянистые растения СССР: справочники-определители. М.: Мысль, 1971. Т. 2. 309 с.
- Бутенкова А. Н. Биологические особенности видов и сортов рода флокс (*Phlox*, Polemoniaceae) в подзоне южной тайги Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01. Томск: Нац. иссл. Том. гос. ун-т, 2014. 185 с.
- Верещагина И. В., Рубцова В. В., Чигаева А. Ф., Хуторная Ю. И. Флоксы в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1969. 99 с.
- Долганова З. В. Биология и интродукция цветочно-декоративных корневищных многолетников в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 2002. 231 с.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Зубкус Л. П., Пятницкая Л. И. Интродукция однолетних цветочных растений в ЦСБС // Декоративные растения для лесостепной зоны Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. С. 3–39.
- Красная книга Иркутской области. Иркутск: Время странствий, 2010. 480 с.
- Красная книга Кемеровской области: Т. 1. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. 2-е изд-е, перераб. и доп. Кемерово: Азия принт, 2012. 208 с.
- Красная книга Красноярского края. В 2 т. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений и грибов. 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2012. 572 с.
- Красная книга Республики Тыва (животные, растения и грибы) 2-е изд., перераб. Воронеж, 2019. 560 с.
- Красная книга Республики Хакасия: Редкие и исчезающие виды растений и грибов. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Наука, 2012. 288 с.
- Красная книга Челябинской области. Челябинск: Мин-во по радиац. и экол. безопасности Челябинской обл.; Ильменский гос. заповедник им. В. И. Ленина УрО РАН, 2008. [http://igz.ilmeny.ac.ru/RED\\_BOOK/rast\\_pokritosemennye\\_siniuhovie\\_floks\\_sibirskii\\_01.html](http://igz.ilmeny.ac.ru/RED_BOOK/rast_pokritosemennye_siniuhovie_floks_sibirskii_01.html)
- Мазко Г. А. Ботанический сад в городе пенсионеров. Форма сохранения биоразнообразия растений // Медицина. Социология. Философия. Прикл. иссл. 2019. № 5. С. 17–21.
- Мартьянова М. А. Вегетативный способ размножения флокса сибирского в ранние сроки // Сиб. вестн. с.-х. науки. 2010. № 4 (208). С. 31–36.
- Приходько С. Н., Михайловская М. В. Приусадебное цветоводство. Киев: Урожай, 1991. 286 с.

- Растительный покров Хакасии / А. В. Куминова, Г. А. Зверева, Ю. М. Маскаев и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 423 с.
- Тельпуховская А. Г. Цветы нашего сада. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1991. 288 с.
- Фомина Т. И. Биологические особенности декоративных растений природной флоры в Западной Сибири. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. 179 с.
- Ханбабаева О. Е., Березкина И. В., Сорокопудов В. Н., Сорокопудова О. А. Ягодные кустарники в ландшафтной архитектуре городских мегаполисов // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 6 (159). С 105–115.
- Arends G. Mein Leben als Gartner und Zucter. Stuttgart. Verlag Eugen Ulmer, 1951.
- Gleason H. A., Cronquist A. Manual of vascular plants of northeastern United States and adjacent Canada. N. Y.: Bot. Garden, 1991. P. 414–415.
- Locklear J. H. Phlox: a natural history and gardener's guide. Portland, OR: Timber Press Inc., 2011. 340 p.

## EXPERIENCE OF REPRODUCTION AND DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF VEGETATIVE RESTORATION OF *Phlox sibirica* L. IN CROPS IN THE SOUTH OF CENTRAL SIBERIA

М. А. Martynova, А. И. Lobanov

Scientific Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

Sadovaya str. 5, Zelenoe Village, Ust'-Abakan District, Republic of Khakassia, 665132 Russian Federation

E-mail: artemisiadracun61@mail.ru, anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Attracting new species and varieties of ornamental plants is an urgent task of greening and landscape construction. The purpose of the study was to generalize the experience and investigate dynamics of the development of vegetative renewal of the Siberian phlox (*Phlox sibirica* L.) in crops in the south of Central Siberia. The objectives of the study were to study the dynamics of development of the vegetative renewal of the Siberian phlox, and to determine the area of turfs formed by the spreading material during the growing season in the years of observation. According to the method of B. A. Dospekhov, in the Khakass Botanical Garden, by the method of organized repetitions, pieces of young rhizomes of a plant with one above-ground shoot were planted in 3 terms with two options (with shelter and without shelter). In the process of observation, at the beginning of the growing season, the number of shoots and the area of vegetative renewal were recorded for three years (2006–2008). It was established that: an increase in the area of turfs in the 1st year of vegetation occurred by 2.0–5.0 times, in the 2nd year – by 1.5–3.3 times, in the 3rd year – by 1.5–4.0 times. The obtained research results are reliable at the 5 % significance level. Over 3 years of vegetation, the increase in the area of turfs in the variants with the initial shelter occurred by 27.5–50.0 times, without shelter – by 50.0–128.0 times. The most active vegetative renewal occurred in plants planted at the earliest time (in early April), where the maximum value of turfs with an area of  $1.1 \pm 0.02$  m<sup>2</sup> was obtained in the 3rd year of plant vegetation. On average, for the 1st year of vegetation in the variant with shelter, sods with an area of 0.05 m<sup>2</sup> were formed, and in the variant without shelter – 0.03 m<sup>2</sup>. During the 2nd year of vegetation, in the variant with shelter, sods with an area of 0.33 m<sup>2</sup> were formed, and in the variant without shelter, 0.27 m<sup>2</sup>. During the 3rd year of vegetation in the variant with shelter, sods with an area of 0.57 m<sup>2</sup> were formed, and in the variant without shelter – 0.6 m<sup>2</sup>. In the arid conditions of the south of Central Siberia, for the purposes of greening and landscape construction, it is promising to use the Siberian phlox, which forms a good vegetative renewal and does not require systematic watering.

**Keywords:** *Siberian phlox, greening landscape construction, Khakass botanical garden.*

**How to cite:** Martynova M. A., Lobanov A. I. Experience of reproduction and dynamics of development of vegetative restoration of *Phlox sibirica* L. in crops in the south of Central Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 50–56 (in Russian with English abstract).

## КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 581\*524\*442+581\*526\*425;582\*475\*2

### ВЫСОТНЫЙ ПРЕДЕЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ КАЯНДЕРА В ОТРОГАХ ЧУВАНСКОГО ХРЕБТА (БАССЕЙН РЕКИ ОЗЕРНОЕ ГОРЛО, ЧУКОТКА)

Е. Г. Николин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН  
677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, пр. Ленина, 41

E-mail: enikolin@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

Лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) – важная лесообразующая порода Чукотки, находящаяся на северо-восточной границе своего ареала. В процессе полевых исследований в августе 2021 г. были зафиксированы высотные пределы распространения этого вида в системе Чуванского хребта, в бассейне р. Озерное Горло. В приустьевой части долины реки имеется массив лиственничного леса. На участке между оз. Ледниковое и устьем реки при высоте тальвега реки 290–350 м параметры лиственничных сообществ существенно снижаются, а при 380 м лиственничные редины отмечены только мелкими фрагментами на склонах южной экспозиции либо одиночными деревьями. По левому борту котловины оз. Ледниковое с большим разрывом в расстоянии, на высоте 470–480 м, среди зарослей кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) встречаются одиночные лиственницы значительной возрастной категории. Эти деревья имеют высоту 4–5 м и широко раскидистую крону. Южнее, на удалении от озера около 8 км к юго-западу, на высоте около 660 м лиственница встречена нами лишь однажды. Здесь молодое одиночное деревце растет на небольшом фрагменте мелкозема среди каменной россыпи, покрытой эпилитными лишайниками (Lichenes). Ствол его имеет высоту 1.3 м. Рассматриваемый нами участок местности в бассейне р. Озерное Горло может служить эталоном для мониторинговых наблюдений за вековыми изменениями высотной границы лесной растительности.

**Ключевые слова:** *Larix cajanderi* Mayr; верхний предел распространения, северо-восточная граница ареала.

DOI: 10.15372/SJFS20220406

#### ВВЕДЕНИЕ

Лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) – важнейшее ценозообразующее и ресурсно значимое древесное растение на севере Азиатской России (Щербаков, 1975; Коропачинский, 1983; Абаимов, Коропачинский, 1984). Это хвойное дерево выдерживает суровые климатические условия полюса холода Северного полушария. Продвигаясь в Арктику, лиственница доходит до 72°11' с. ш. (единичные растения отмечались на северной широте 72°22'22") и при этом поднимается на горные склоны до 30–50 м над уровнем моря (в дальнейшем –

н. у. м.) (Николин, Якшина, 2019а, б). А в пределах горных систем Северо-Восточной Якутии, расположенных в экстремально холодной области, где зимние температуры опускаются до –68...–70 °С, лиственница Каяндера проявляет себя как активный и устойчивый криофит, формирует лесной пояс гор, поднимается на высоту до 1000–1300 м (Исаев, 2011; Николин, 2013, 2019, 2020, 2021). На Чукотке – это основной лесообразующий вид, находящийся на северо-восточной границе ареала (Реутт, 1970; Природа..., 1997; Коропачинский, Встовская, 2012).

В непосредственной близости от с. Чуванское в 1932 г. лесную растительность изучала

Л. Н. Тюлина (1936), маршрут которой проходил от с. Марково, до устья р. Бол. Пеледон (правый приток р. Анадырь, впадающий выше устья р. Еропол). В 1973 и 1976 гг. в этой местности работал А. Н. Полежаев. Его маршрут был связан с обследованием оленьих пастбищ и на ближайшей к нам местности проходил на участке между с. Чуванское и долиной р. Гытгыньпилыгын, впадающей в р. Еропол (правый приток) около 60 км выше устья р. Озерное Горло. По итогам этих работ опубликованы сводка флоры верховий р. Анадырь (Полежаев и др., 1979) и сведения о флоре и растительности верховий р. Еропол (Полежаев и др., 1981). Судя по схемам расположения полевых сборов, бассейн р. Озерное Горло остался за пределами полевых работ А. Н. Полежаева с соавт. (1979, 1981).

Характеризуя высотную поясность растительности исследованной территории, А. Н. Полежаев с соавт. (1981) отмечали, что лиственница обычно образует редколесья на высоте до 450–500 м, выше сменяющиеся кустарниковыми тундрами с кедровым стлаником (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). В верховьях рек участки лиственничных редколесий становятся менее значительными и не образуют ясно выраженного пояса. Высота древостоя в них снижается до 7–10 м, средний диаметр стволов – до 15–20 см, тогда как высота древостоя долинных лиственничников в среднем течении рек достигает 25–30 м, а диаметр стволов на высоте груди – 55 см. В долине верхнего течения р. Еропол произрастают единичные деревья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) и чозении толокнянколистной (*Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. K. Skvortsov), а на склонах изредка встречаются одиночные лиственницы 0.5–1.0 м высотой.

В процессе полевых исследований на территории Чукотского автономного округа зафиксированы высотные пределы распространения лиственницы Каяндера в системе Чуванского хребта, в бассейне р. Озерное Горло (правый приток р. Еропол), сведения о которых приводятся в данной публикации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения проводились в ходе наземного маршрута, выполненного на гусеничных вездеходах, на участке местности с. Чуванское – долина р. Озерное Горло, на расстоянии около 8 км южнее оз. Ледниковое. Период работ – 10–24 ав-

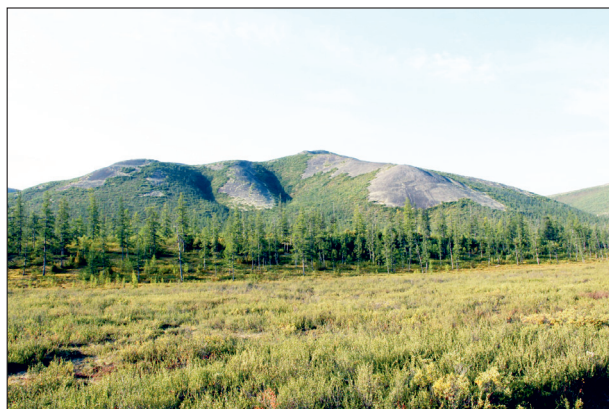
густа 2021 г. Основная цель исследований в конечном пункте назначения, где был организован полевой лагерь (южнее оз. Ледниковое), была связана с изучением экологии и распространения горных млекопитающих. Фиксация границ распространения лиственницы имела ботанико-географический характер и проводилась как сопутствующие наблюдения. Границы отмечались с помощью GPS-навигатора, ландшафтной фотосъемки, частично с помощью электронного ресурса Google Earth.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Село Чуванское расположено в правобережье нижнего течения р. Еропол, немного выше по течению от впадения в него р. Куйвиеем (географические координаты – 65°10'23" с. ш. 167°57'28" в. д.). В окрестностях этого населенного пункта лиственница Каяндера распространена в долине реки и на склонах. В долине она формирует лиственничные леса и редколесья, которые чередуется с тополево-чозениевыми лесами, ивняками, ерниками, болотами. При высоте долины около 190 м лиственница поднимается на склоны до 250–300 м. В долине реки, близ поселка, сомкнутость древостоя лиственницы местами составляет 0.4–0.5, деревья имеют сбежистый ствол с раскидистой, нередко обсохшей верхушкой и неровной цилиндрической кроной. Высота их обычно доходит до 10–12 м, но отдельные перестойные деревья превышают 15–18 м и имеют неровные, часто разветвленные или осушенные в верхней части стволы до 50 см диаметром на высоте 1.3 м от основания ствола ( $D_{1.3}$ ). Нередко встречаются разреженные молодняки с широкой пирамидальной кроной и высотой древостоя 4–5 м, но чаще лиственница растет разреженно на галечниках, среди ерников и ивняков. На горных склонах лиственничные сообщества перемежаются с зарослями кедрового стланика и каменными осыпями (рис. 1). Параметры древостоя здесь снижаются: сомкнутость – до 0.2–0.3, высота – до 7–8 м, диаметр стволов ( $D_{1.3}$ ) – до 15–20 см. Часто присутствуют следы воздействия огня от лесных пожаров.

В приустьевой части долины р. Озерное Горло находится массив лиственничного леса с сомкнутостью 0.3–0.4, высотой древостоя 13–15 м, с ровными слабо сбежистыми стволами диаметром ( $D_{1.3}$ ) 20–30 (40) см и пирамидальной цилиндрической кроной (рис. 2).

В подлеске присутствуют разреженные кусты кедрового стланика и кустарниковой березы



**Рис. 1.** Лиственничные сообщества на шлейфах гор в долине р. Еропол.



**Рис. 2.** Лиственничный лес в приустьевой части долины р. Озерное Горло.

(*Betula fruticosa* Pall.) – ерников. Встречаются единичные перестойные деревья с сильно сбежистым стволом, широко раскидистой кроной и часто с обломленной верхней частью ствола.

Местами имеются следы обширной выруб-ки. Площадь массива около 100 га. Его координаты  $65^{\circ}08'43''$  с. ш.  $167^{\circ}37'56''$  в. д., высота местности 230–240 м н. у. м.

На промежуточном участке между оз. Ледниково и устьем р. Озерное Горло, в интервале координат  $65^{\circ}03'00''$  с. ш.  $167^{\circ}40'00''$  в. д. и  $65^{\circ}00'00''$  с. ш.  $167^{\circ}39'00''$  в. д., при высоте тальвега реки 290–350 м параметры лиственничных сообществ существенно снижаются (рис. 3).

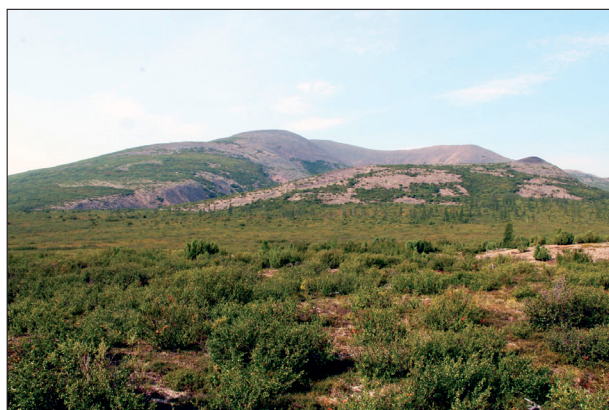
На горных склонах сомкнутость лиственницы редко превышает 0.1, высота деревьев 8–10 м. Здесь доминирует кедровый стланик. На шлейфах гор и заросших галечниках реки встречаются куртины лиственничного леса с невысокими (4–6 м) деревьями, имеющими широкопирами-

дальнюю крону со следами кормления каменного глухаря (*Tetrao urogalloides* Middendorff) на верхушке – зимние столовые или «глухаринные сады» (Андрянова, Мочалова, 2008) (рис. 4).

Следует отметить, что таких «глухаринных садов» встречается довольно много как в долине р. Озерное Горло, так и в долине р. Еропол, выше по течению от с. Чуванское, но сами глухари, их выводки или экскременты не обнаружены.

Выше по течению реки, от пункта с координатами  $65^{\circ}03'00''$  с. ш.  $167^{\circ}40'00''$  в. д., при высоте тальвега 380 м лиственничные редины отмечены только мелкими фрагментами на склонах южной экспозиции либо одиночными деревьями, часто имеющими разветвленные стволы и широко раскидистую крону (рис. 5, 6).

По левому борту котловины оз. Ледниково с большим разрывом в расстоянии, в интервале координат  $64^{\circ}56'25''$ – $64^{\circ}56'00''$  с. ш. и  $167^{\circ}30'30''$ – $167^{\circ}29'33''$  в. д., на высоте 470–480 м



**Рис. 3.** Лиственничные редколесья и редины на горных склонах в левобережье долины р. Озерное Горло (узкая полоса между ерниковыми тундрами внизу и зарослями кедрового стланика – выше). Промежуточный участок долины между устьем реки и оз. Ледниково.



**Рис. 4.** Лиственничный лес на горном шлейфе в левобережье долины р. Озерное Горло (промежуточный участок между устьем реки и оз. Ледниково).



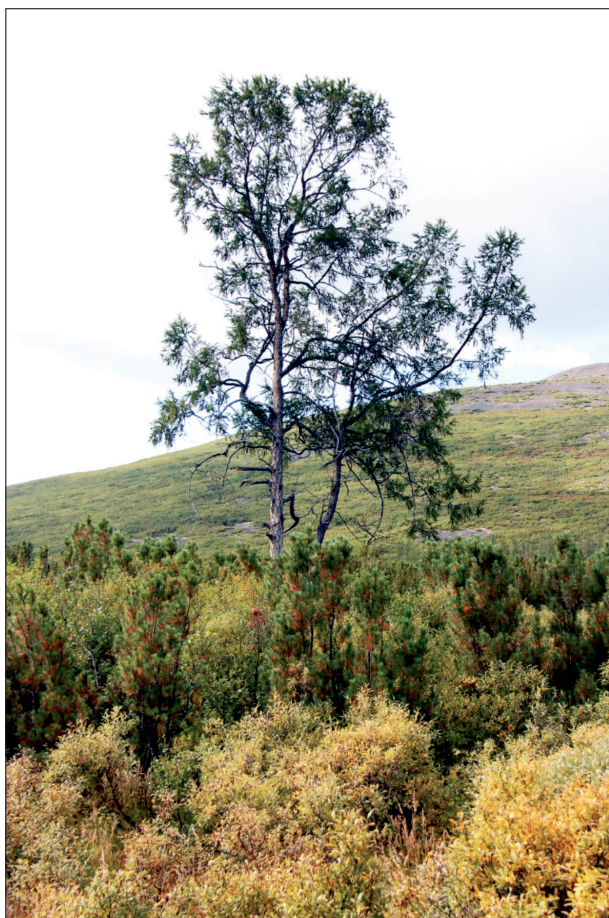
**Рис. 5.** Лиственничные куртины на верхнем пределе распространения в долине р. Озерное Горло.

среди зарослей кедрового стланика встречаются одиночные лиственницы значительной возрастной категории. Они превышают кусты кедрового стланика на 2–3 м и хорошо заметны на местности. Эти деревья имеют высоту 4–5 м, широко раскидистую крону, часть которой несколько смещена к югу. В большинстве случаев у них хо-

рошо выражен главный ствол, иногда имеются увеличенные нижние ветви, реже встречаются многоствольные куртинные лиственницы. Одно из встреченных деревьев около 6 м высотой выделялось особенно большим возрастом и находилось в стадии отмирания.

Южнее оз. Ледниковое, в долине р. Озерное Горло, лиственница встречена нами лишь однажды. Это шлейф горы в северо-восточной оконечности хр. Высокий, по левому борту реки, на удалении от озера примерно 8 км к юго-западу. Координаты этого пункта  $64^{\circ}51'38.2''$  с. ш.  $167^{\circ}25'42.2''$  в. д., высота местности над уровнем моря около 660 м. Здесь молодое одиночное деревце лиственницы растет на небольшом фрагменте мелкозема среди каменной россыпи, покрытой эпилитными лишайниками (Lichenes) (рис. 7).

У основания ствола лиственницы расположен кустик таволги Стевена (*Spiraea stevenii* (C. K. Schneid.) Rydb.), единичные дернинки зубровки альпийской (*Hierochloa alpina* (Sw.)



**Рис. 6.** Одиночные лиственницы на верхнем пределе распространения в долине р. Озерное Горло.



**Рис. 7.** Одиночная лиственница на шлейфе горы в северо-восточной оконечности хр. Высокий (на дальнем плане – долина р. Озерное Горло, главные отроги Чуванского хребта).

Roem. & Schult.) и кусты лишайников: флавоцетрарии снежной (*Flavocetraria nivalis* (L.) Kärnefelt et A. Thell), кладонии звездчатой (*Cladonia stellaris* (Opiz.) Pouzar et Vezda), к. лесной (*Cl. arbuscula* (Wallr.) Flot. s. l.), к. оленьей (*Cl. rangiferina* (L.) F. H. Wigg.), тамнолии червеобразной (*Thamnolia vermicularis* (Sw.) Schaer) и др.

Ствол дерева 1.3 м высотой, диаметром на высоте 20 см от основания ствола 2.5 см; на высоте до 70 см лишен ветвей, отшлифован снеговой коррозией. Крона имеет преимущественное смещение к северу, что, вероятно, связано с господствующим направлением зимних ветров на данном участке горной местности. Судя по молодому возрасту этой лиственницы (визуально, около 20–30 лет), а также по тому, что во время маршрутных работ на участках, прилежащих к месту ее нахождения, нами не встречено никаких следов предшествующего произрастания здесь представителей этого вида (живых или сухостойных деревьев, лиственничного валежа, пней, следов вырубki и т. п.), которые могли бы быть хорошо заметными в открытой местности среди тундры и низкорослых разреженных кустов кедрового стланика, можно полагать, что появление здесь молодого дерева является следствием современной инвазии лиственницы в горные системы. Наиболее вероятным пунктом распространения семян для такой инвазии могут быть горные склоны котловины оз. Ледникового, где встречаются перестойные генеративные деревья лиственницы.

Следует отметить, что предположение А. Н. Полежаева с соавт. (1981) о том, что генеративный материал лиственницы Каяндера проникает в бассейн р. Еропол через горные перевалы с юга, со стороны Корякии, маловероятно. Безусловно, в исторические периоды температурных максимумов, такой контакт был возможен, а местами лиственница могла осваивать горную местность сплошной полосой. Но в современный период не вызывает сомнений, что лиственница нередко продвигается в горы снизу вверх по долинам рек и с севера на юг. Этот процесс хорошо заметен и в горах Якутии.

На основании методики С. Г. Шиятова (2009) по применению ландшафтных фотоснимков для изучения динамики древесной растительности, можно рекомендовать крайний высотный пункт распространения лиственницы для мониторинговых наблюдений за изменениями верхней границы лиственничных сообществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах обследованной территории лиственничные леса и редколесья по долине р. Озерное Горло и склонам южной экспозиции поднимаются на высоту до 350 м н. у. м. Одиночные генеративные лиственницы встречаются на высоте до 450 м. Крайний высотный предел распространения лиственницы Каяндера в системе Чуванского хребта достигает 660 м. Судя по молодому возрасту лиственницы, встреченной в крайнем высотном пункте, и по отсутствию следов предшествующего вымирания здесь данного вида, – это результат успешной инвазии в горные системы, наблюдающейся в последние годы по всему ареалу лиственницы Каяндера.

Автор глубоко признателен родовой общине коренных малочисленных народов Чукотки «Иннекей» и лично В. А. Домрачеву, Э. В. Домрачеву, А. В. Домрачеву, а также сотруднику ИБПК СО РАН зоологу Н. В. Мамаеву за техническое обеспечение работ.

Работа выполнена в рамках темы проекта НИР «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий». Номер научной темы: 0297-2021-0044.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А. П., Коропачинский И. Ю. Лиственницы Гмелина и Каяндера. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 120 с.
- Андрянова Е. А., Мочалова О. А. Особенности морфоструктуры лиственницы (*Larix cajanderi*) в местах кормежек каменного глухаря // Чтения памяти А. П. Хохрякова: материалы Всерос. науч. конф. Магадан: ИБПС ДВО РАН, 2008. С. 217–220.
- Исаев А. П. Естественная и антропогенная динамика лиственничных лесов криолитозоны (на примере Якутии): дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Якутск: ИБПК СО РАН, 2011. 420 с.
- Коропачинский И. Ю. Древесные растения Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 383 с.
- Коропачинский И. Ю., Встовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России. 2-е изд. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. 706 с.
- Николин Е. Г. Конспект флоры Верхоянского хребта. Новосибирск: Наука, 2013. 245 с.
- Николин Е. Г. Локальная флора Нельканского перевала (хребет Тас-Кыстабыт, Северо-Восточная Якутия) // Бот. журн. 2019. Т. 104. № 3. С. 414–431.
- Николин Е. Г. Локальные флоры ресурсного резервата «Верхнеиндигирский» (Северо-Восточная Якутия) // Бот. журн. 2020. Т. 105. № 7. С. 627–645.

- Николин Е. Г. Высотно-зональное распределение сосудистых растений ресурсного резервата «Верхнеиндигирский» (Россия, Северо-Восточная Якутия) // Вестн. Бурят. гос. ун-та. Биол., геогр. 2021. № 1. С. 12–29.
- Николин Е. Г., Якишина И. А. Распространение некоторых древесных видов на северном пределе в Усть-Ленском заповеднике (Якутия). Сообщение I. Лиственница Каяндера *Larix cajanderi* Mayr // Сиб. лесн. журн. 2019а. № 2. С. 16–31.
- Николин Е. Г., Якишина И. А. Распространение лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) и ольховника (*Duschekia fruticosa*) в правобережье реки Лена, на участке «Сокол» Усть-Ленского Заповедника // Биоресурсы Усть-Ленского заповедника: грибы, водоросли, растительность, рыбы, птицы, овцебыки. Сер.: «Усть-Ленский Государственный природный заповедник: биологическое разнообразие». Вып. 2. Новосибирск: Наука. 2019б. С. 35–65.
- Полежаев А. Н., Хохряков А. П., Беркутенко А. Н. К флоре верховий р. Анадырь // Бот. журн. 1979. Т. 64. № 11. С. 1628–1632.
- Полежаев А. Н., Хохряков А. П., Беркутенко А. Н. О флоре и растительности верховий реки Еропол (на границе Корякии и Чукотки) // Бот. журн. 1981. Т. 66. № 3. С. 431–436.
- Природа и ресурсы Чукотки. Вып. 5 / А. В. Беликович, А. А. Галанин, А. В. Галанин и др. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1997. 236 с.
- Рейт А. Т. Растительность. Север Дальнего Востока // Природные условия и естественные ресурсы СССР. М.: Наука, 1970. С. 257–299.
- Толина Л. Н. О лесной растительности Анадырского края и ее взаимоотношении с тундрой // Тр. Аркт. ин-та. 1936. Т. 40. С. 7–212.
- Шиятов С. Г. Опыт использования ландшафтных фотоснимков для изучения динамики древесной растительности в высокогорьях Урала // Ботанические исследования на Урале: материалы науч. конф., посвящ. памяти П. Л. Горчаковского. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2009. С. 390–394.
- Щербаков И. П. Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 343 с.

## THE ALTITUDE LIMIT OF THE KAYANDER LARCH (*Larix cajanderi* Mayr) DISTRIBUTION IN THE SPURS OF THE CHUVANSKY RIDGE (BASIN OF RIVER OZERNOYE GORLO, CHUKOTKA)

E. G. Nikolin

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone Siberian Branch of RAS.  
Prospekt Lenina, 41, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677000 Russian Federation*

E-mail: enikolin@yandex.ru

The Kayander larch (*Larix cajanderi* Mayr) is the most important forest forming tree species of Chukotka, located on the northeastern border of its range. In the course of field studies in August 2021, the altitude limits of the larch distribution in the Chuvansky Ridge system, in the basin of the Ozernoe Gorlo River. In the estuary part of the valley of the Ozernoe Gorlo River has a significant array of larch forest. Between the Lednikovoe Lake and the mouth of the Ozernoe Gorlo River, at the height of the riverbed 290–350 m, the parameters of larch communities are significantly reduced. At a height of the riverbed 380 m, larch sparse woodlands are marked only by small fragments on the slopes of the southern exposure, or by single trees, often having branched stems and a widely spreading crown. On the left side of the Lednikovoe Lake basin, with a large gap in distance, at an altitude of 470–480 m, single larches of a significant age category are found among the thickets of dwarf pine (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). These trees have a height of 4–5 m and a widely spreading crown. South of Lednikovoe Lake, at a distance from the lake approx. 8 km to the south-west, at an altitude of about 660 m, we met larch only once. Here, a young solitary tree grows on a small fragment of fine earth among a stone placer covered with epilytic lichens (Lichenes). Its stem has a height of 1.3 m. The area we are considering is in the Ozernoe Gorlo River basin, can serve as a reference for monitoring observations of age-old changes in the altitude boundary of forest vegetation.

**Keywords:** *Larix cajanderi* Mayr, altitude limit of distribution, north-east limit of natural habitat.

**How to cite:** Nikolin E. G. The altitude limit of the Kayander larch (*Larix cajanderi* Mayr) distribution in the spurs of the Chuvansky Ridge (basin of river Ozernoye Gorlo, Chukotka) // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 4. P. 57–62 (in Russian with English abstract).

## CONTENTS

### ARESEARCH ARTICLES

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>L. V. Karpenko, A. V. Grenaderova, A. B. Mikhailova, O. V. Podobueva</i><br>Reconstruction of Holocene Local Fires According to the Macrocharcoals Content<br>from the Peat Deposits in the Dubches River Valley .....                   | 3  |
| <i>T. T. Efremova, O. A. Shapchenkova, S. P. Efremov, A. F. Avrova, M. V. Sedel'nikov</i><br>Ecological-Geochemical Assessment of Swamp Spruce Forests Peat Soils of Kuznetsk Alatau .....                                                  | 14 |
| <i>S. K. Farber, N. S. Kuz'mik, E. V. Goryaeva</i><br>Environmental Value of Forests of the Uchum Lake Resort Zone: Fire Damage Assessment .....                                                                                            | 26 |
| <i>E. A. Petrunina, S. R. Loskutov, T. V. Ryazanova, A. A. Aniskina, G. V. Permyakova, V. V. Stasova</i><br>Comparative Analysis of Physical-Chemical Properties of Larch and Pine Bark:<br>Thermal Analysis and Analytical Pyrolysis ..... | 35 |
| <i>M. A. Martynova, A. I. Lobanov</i><br>Experience of Reproduction and Development Dynamics of Vegetative Renewal<br>of <i>Phlox sibirica</i> L. in Crops in the South of Central Siberia .....                                            | 50 |

### SHORT COMMUNICATION

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>E. G. Nikolin</i><br>The Altitude Limit of the Kayander Larch ( <i>Larix cajanderi</i> Mayr) Distribution in the Spurs<br>of the Chuvanskiy Ridge (Basin of River Ozerne Gorlo, Chukotka) ..... | 57 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Л. В. Карпенко, А. В. Гренадерова, А. Б. Михайлова, О. В. Подобуева</i><br>Реконструкция локальных пожаров в голоцене по данным содержания макрочастиц угля<br>в торфяной залежи в долине реки Дубчес .....                         | 3  |
| <i>Т. Т. Ефремова, О. А. Шапченкова, С. П. Ефремов, А. Ф. Аврова, М. В. Седельников</i><br>Эколого-геохимическая оценка торфяных почв болотных ельников Кузнецкого Алатау .....                                                        | 14 |
| <i>С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, Е. В. Горяева</i><br>Экологическая значимость лесов курортной зоны озера Учум: оценка ущерба от пожара .....                                                                                           | 26 |
| <i>Е. А. Петрунина, С. Р. Лоскутов, Т. В. Рязанова, А. А. Анискина, Г. В. Пермякова, В. В. Стасова</i><br>Сравнительный анализ физико-химических свойств коры лиственницы и сосны:<br>термический анализ и аналитический пиролиз ..... | 35 |
| <i>М. А. Мартынова, А. И. Лобанов</i><br>Опыт размножения и динамика развития вегетативного возобновления <i>Phlox sibirica</i> L.<br>в культуре на юге Средней Сибири .....                                                           | 50 |

### КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Е. Г. Николин</i><br>Высотный предел распространения лиственницы Каяндера в отрогах Чуванского хребта<br>(бассейн реки Озерное Горло, Чукотка) ..... | 57 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|