

УДК 631.445.12:631.413.5

ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ ОСУШЕННЫХ БОЛОТНЫХ СОСНЯКОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, А. Ф. Аврова

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

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

Изучены слаборенрированные осоково-сфагновые сосняки (*Pinus sylvestris* L.) в южно-таежной подзоне Западной Сибири, осушенные сетью открытых мелких каналов 25 лет тому назад на момент исследования (географические координаты 56°23'71" с. ш., 84°34'04" в. д.). Глубина стояния болотных вод за 3 года исследований составила в среднем 23.2 ± 9.9 см за теплый период. Почвы – освоенные переходного (мезотрофного) типа на мощных осоково-сфагновых торфах, характеризуются кислой реакцией среды – pH 4.0, рыхлым сложением – 0.10 г/см^3 и зольностью 8.9–5.2 %, снижающейся с глубиной. Почвенный профиль в теплый период слабо дифференцирован на зону интенсивных окислительных процессов (0–10 см) – 570–660 мВ (медиана 610) и умеренно окислительных (10–30 см) – 430–640 мВ (медиана 590). Основная направленность (тренд) сезонных колебаний окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) характеризуется средним еженедельным ускорением на 7.2 мВ со средним еженедельным замедлением на 0.23 мВ с июня по октябрь. ОВП по типу линейной функции достоверно связан: положительно с уровнем стояния почвенно-грунтовых вод ($R^2 = 0.65$) и температурой почв ($R^2 = 0.56$), отрицательно – с объемной влажностью ($R^2 = 0.60$). Выявлена достоверная по типу параболы второго порядка связь ОВП: отрицательная – с Fe^{2+} ($R^2 = 0.48$) и аммонием ($R^2 = 0.57$), положительная с Fe^{3+} ($R^2 = 0.39$), разнонаправленная – с Fe_c ($R^2 = 0.55$) и водорастворимым органическим углеродом ($R^2 = 0.54$). Методом канонического анализа установлено, что ОВП определяется множеством гидротермических показателей на 81 %. Наибольший вес в обусловленный эффект вносит объемная влажность. Различные формы железа совокупно оценивают развитие ОВ-реакций на 52 %, доминантный вклад принадлежит Fe^{2+} . Множество углерод и NH_4^+ детерминирует ОВ-потенциал на 61 % с наибольшим весом углерода в совокупность признаков.

Ключевые слова: сезонный тренд, парные регрессионные модели, канонический анализ, гидротермические условия, система Fe^{3+} – Fe^{2+} , водорастворимый углерод, аммоний.

DOI: 10.15372/SJFS20240202

ВВЕДЕНИЕ

Предвидение хода трансформации болотных экосистем под влиянием осушения позволяет предотвращать неблагоприятные экологические последствия, только в Западной Сибири площадь болот составляет 79.1 млн га, вмещающих 81.9 млн т абсолютно сухого органического вещества (Ефремов и др., 1994). Поэтому вопросы антропогенного воздействия и оптимизация режимов хозяйственного освоения имеют актуальное значение. В основе ведущих почвообразовательных процессов лежат, как извест-

но, окислительно-восстановительные режимы, которые характеризуются высокой динамичностью. В последнее время исследования условий аэрации в болотах Западной Сибири выполнены в пределах стратиграфического профиля через каждые 0–25 (50) см, которые в большей мере важны для оценки окислительно-восстановительных процессов в ходе торфогенеза, а также смены природных условий в масштабе геологического времени (Порохина и др., 2015; Инишева и др., 2016, 2018; Inisheva et al., 2016, 2018). Для обоснования рациональной лесосушительной мелиорации болот более важно изучать со-

временные почвы (0–30 см) в пределах корнеобитаемой зоны и средневегетационного уровня стояния почвенно-грунтовых вод.

Цель настоящей работы – выявить в осушенных почвах сосновых древостоев:

а) основную тенденцию (тренд) и интенсивность сезонных колебаний окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в летний период;

б) оценить связь ОВП с условиями почвенной среды: уровнем стояния поверхностных вод, температурой, влажностью, водорастворимым углеродом, аммонием и системой ферро-ферри;

в) установить взаимообусловленный эффект экологических параметров и выявить доминантные факторы среды, регулирующие окислительно-восстановительные процессы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучали лесное болото, осушенное сетью открытых каналов 25 лет тому назад (географические координаты 56°23'71" с. ш., 84°34'04" в. д.). Исследовали наиболее распространенные слабоосушенные осоково-сфагновые сосняки (*Pinus sylvestris* L.), произрастающие на 47-метровой межканальной полосе. Глубина стояния болотных вод за теплый период составила в среднем 23.2 ± 9.9 см. Почвы – освоённые, мезотрофного типа, на мощных осоково-сфагновых торфах, характеризуются кислой реакцией среды – pH 4.0, рыхлым сложением – 0.10 г/см^3 и зольностью 8.9–5.2 %, снижающейся с глубиной. Окислительно-восстановительный потенциал, реакцию среды (pH) измеряли с помощью переносного pH-метра-милливольтметра ППМ-03М I по горизонтам в свежевыкопанном разрезе. Параллельно измеряли температуру почв и отбирали образцы на химический анализ компонентов в составе водной вытяжки, определяющих развитие ОВ-процессов: C, NH_4^+ , Fe_c , связанное с

органическим веществом, Fe^{2+} , Fe^{3+} . Ингредиенты определяли в свежееотобранных образцах: двухвалентное железо – с $\alpha\alpha$ -дипиридиллом, трехвалентное и Fe_c – (после озоления водной вытяжки) – сульфосалициловой кислотой, углерод – бихроматным методом по Тюрину, аммоний – с реактивом Несслера (Агрохимические методы..., 1975). Исследования выполнялись в теплый период с шагом наблюдений 5–8 (среднее 7) дней.

Статистический анализ экспериментальных данных выполнен по руководству А. А. Халафяна (2007), статистическая характеристика рядов распределения сезонной активности окислительно-восстановительного потенциала – по прописям Э. В. Чеботовского (2002).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Окислительно-восстановительный потенциал слабоосушенных лесных почв в течение июня–октября характеризует ОВ-режим с господством окислительных процессов согласно И. С. Кауричеву и Д. С. Орлову (1982) (табл. 1).

Почвенный профиль слабо дифференцирован на зону интенсивных окислительных процессов (0–10 см) – 570–660 мВ (медиана 610) и умеренно-окислительных (10–30 см) – 430–640 мВ (медиана 590). В пределах большей части почвенного профиля размах колебаний ОВП в теплый период имеет стабильный характер, в среднем – около 80 мВ, и только в горизонте 20–30 см повышается до 210.

Графоаналитические построения сезонной динамики ОВ-потенциала затрудняют оценку изучаемого явления (рис. 1).

С помощью математической функции от времени – регрессионного уравнения параболы второго порядка – получили объективные оценки хода сезонных колебаний. В параболической функции тренда ($y = -b_2x^2 + b_1x + a$) положительный знак параметра b_1 и отрицательный b_2 ото-

Таблица 1. Окислительно-восстановительный потенциал лесных торфяных почв слабого осушения за теплый период, мВ

Показатель	Глубина почвенного горизонта, см				
	0–5	5–10	10–20	20–30	0–30
Среднее	603	614	598	563	595
Медиана	600	610	590	590	595
Мода	600	600	570	580	630
Минимум–максимум	570–640	580–660	560–640	430–640	548–633
Размах	70	80	80	210	85
Коэффициент вариации, %	4	4	5	13	5

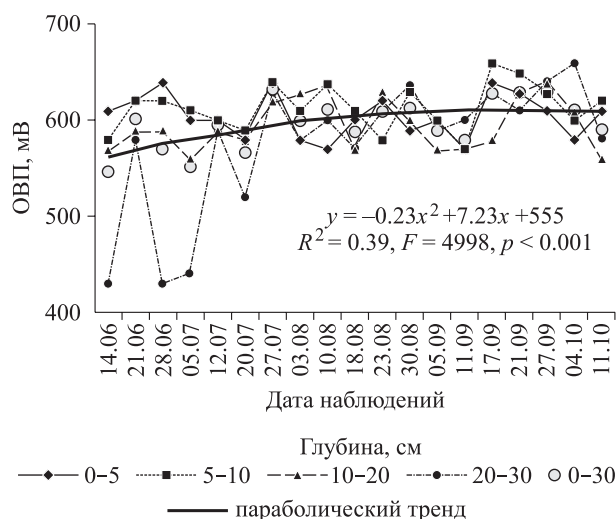


Рис. 1. Окислительно-восстановительный потенциал в лесных слабоосушенных торфяных почвах за период наблюдений.

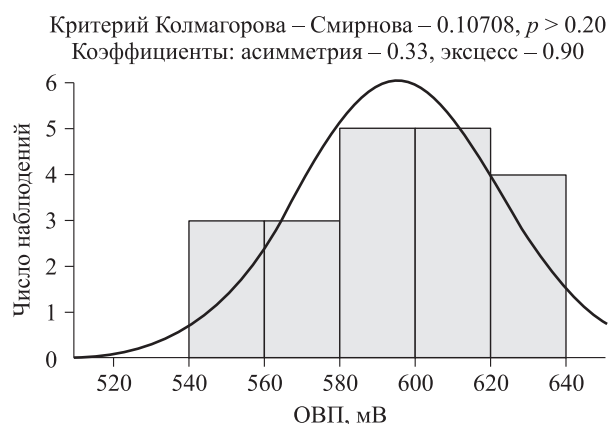


Рис. 2. Гистограмма и кривая распределения окислительно-восстановительного потенциала в слое 0–30 см осушенных торфяных почв.

бражают повышение выровненного ряда с замедлением – $2b_2$ (Чекотовский, 2002). Числовые значения и знаки параметров параболитического тренда показывают, что с июня по октябрь средняя интенсивность ОВ-процессов еженедельно повышалась на 7.2 мВ с еженедельным средним замедлением на 0.23 мВ.

Гистограмма частот, согласно критерию Колмагорова – Смирнова, значениям асимметрии и эксцесса, соответствуют закону нормального распределения, что обеспечивает корректное описание уравнений регрессии зависимости ОВП от заданных факторов почвенной среды (рис. 2).

Развитие ОВ-режимов в почвенной среде – экологически обусловленный процесс. Установлено, что окислительно-восстановительный потенциал (548–633 мВ) по типу линейной функции достоверно связан: положительно с уровнем стояния почвенно-грунтовых вод (8–36 см) – на 65 % и температурой почв (8–15 °С) – на 56 %, отрицательно – с объемной влажностью (56–82 %) – на 60 % (рис. 3, а–в).

К числу важнейших элементов, определяющих развитие ОВ-процессов, относится железо как элемент с переменной валентностью. В торфяных почвах присутствует чаще всего в виде свободных ионов двух- и трехвалентного железа, коллоидных форм в составе органических (гумусовых) веществ и различных гидрооксидов.

В осушенных лесных почвах выявлена достоверная по типу параболы второго порядка связь ОВП 553–633 мВ: отрицательная с Fe^{2+} (0.27–1.48 мг/100 г) на уровне 48 %, положительная с Fe^{3+} (0.07–0.75 мг/100 г) – 39 % (рис. 4, а, б).

Обусловленность ОВП железом, связанным с органическим веществом (Fe_c 0.42–1.63 мг/100 г) на 55 % носит неоднозначную направленность (рис. 4, в). Экстремум, рассчитанный по параметрам функции, характеризует отрицательную связь в случае Fe_c менее

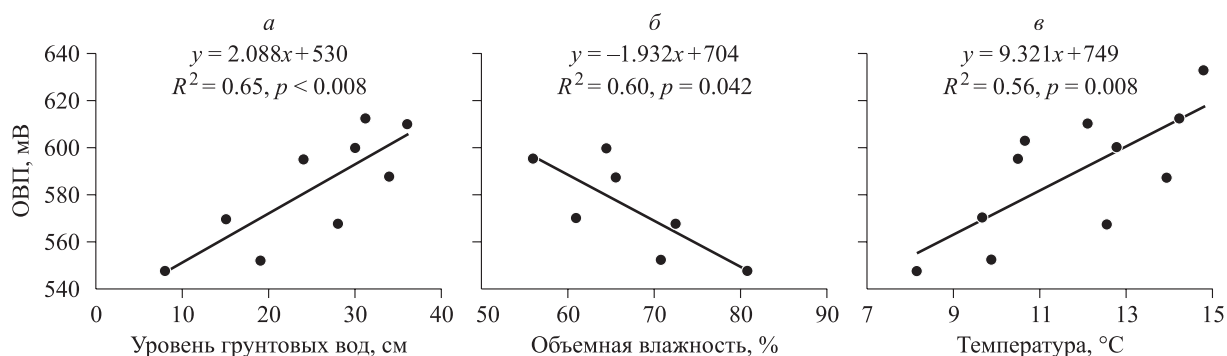


Рис. 3. Регрессионная связь окислительно-восстановительного потенциала и условий почвенной среды в лесных торфяных почвах слабого осушения.

а – уровень почвенно-грунтовых вод; б – объемная влажность; в – температура.

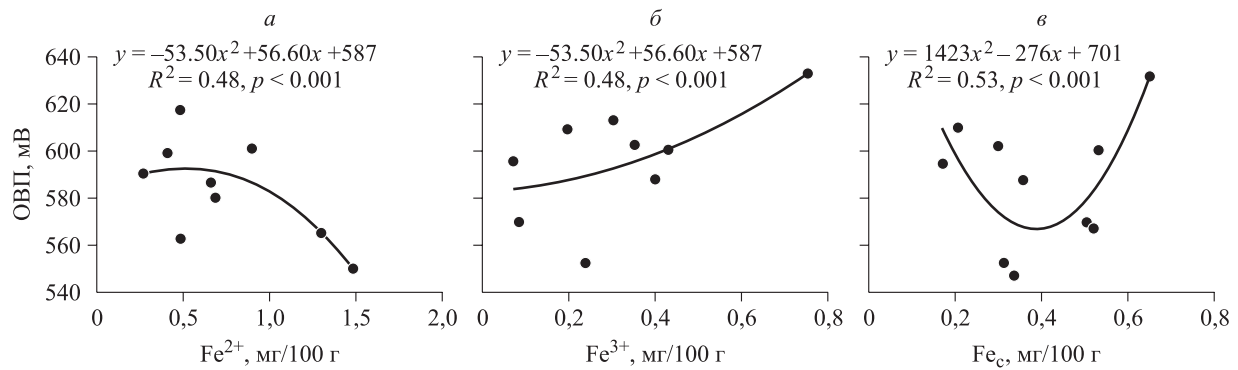


Рис. 4. Регрессионная связь окислительно-восстановительного потенциала с мобильными формами железа в лесных слабоосушенных торфяных почвах.
а – Fe²⁺; б – Fe³⁺; в – Fe_с (органическое).

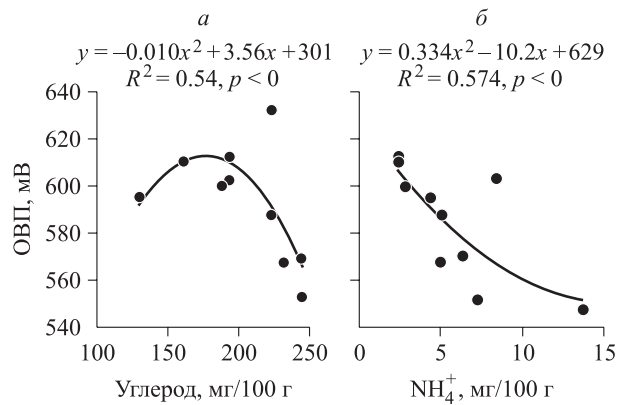


Рис. 5. Регрессионная связь окислительно-восстановительного потенциала с водорастворимыми продуктами разложения торфяного субстрата.
а – углерод; б – NH₄⁺.

1 мг/100 г и положительную при дальнейшем увеличении содержания.

Органическое вещество и азот характеризуют широкий спектр окислительно-восстановительных взаимодействий в условиях почвенной среды. Установлена связь окислительно-восстановительного потенциала (553–633 мВ) на уровне 54 % с водорастворимым углеродом положительной направленности при содержании менее 180 мг/100 г и отрицательной при после-

дующим повышение до 245 мг/100 г (рис. 5, а). Обусловленность ОВ-потенциала 548–613 мВ аммонием (2.4–13.7 мг/100 г) носит отрицательный характер и аппроксимируется нисходящей ветвью параболы на 57 % (рис. 5, б).

Эффект разобщенного влияния отдельного показателя на развитие ОВ-процессов качественно и количественно отличается от их совокупного воздействия, поэтому возникает необходимость в свертывании пространства признаков, выявлении наиболее информативных показателей и указания нагрузок, с которыми каждый признак входит в исследуемую совокупность. Был применен канонический анализ, который обобщает множественную корреляцию в качестве меры связи одной случайной величины с множеством других случайных величин.

Канонические индексы детерминации (R^2) показывают, что ОВП определяется множеством гидротермических показателей на 81 % (табл. 2).

Наибольший вес в обусловленный эффект вносит объемная влажность. Различные формы железа совокупно оценивают развитие ОВ-реакций на 52 %, доминантный вклад принадлежит Fe²⁺. Множество С и NH₄⁺ детерминирует ОВ-потенциал на 61 % с наибольшим весом углерода в совокупность признаков.

Таблица 2. Связь окислительно-восстановительного потенциала с факторами почвенной среды

Оценка канонического корня					
$R^2 - 0.81,$ p -уровень значимости – 0.045		$R^2 - 0.52,$ p -уровень значимости – 0.051		$R^2 - 0.61,$ p -уровень значимости – 0.056	
Переменные	Канонический вес	Переменные	Канонический вес	Переменные	Канонический вес
Температура	–0.30	Fe ³⁺	–0.28	С	0.77
Влажность	0.66	Fe ²⁺	0.79	NH ₄	0.37
УГВ	–0.26	*Fe _с	–0.20		

Примечание. УГВ – уровень грунтовых вод. * Fe_с – железо, связанное с органическим веществом.

ВЫВОДЫ

1. Слабо осушенные лесные почвы (УГВ 8–36 см) характеризуются в летний период стабильным преобладанием окислительных процессов.

2. Ход сезонных колебаний окислительно-восстановительного потенциала, детерминированный параболическим трендом, характеризует среднее еженедельное ускорение на 7.2 мВ со средним еженедельным замедлением на 0.23 мВ с июня по октябрь.

3. ОВП преимущественно со средней теснотой положительно связан с уровнем стояния поверхностных вод, температурой почв и содержанием в водной вытяжке Fe^{3+} , отрицательно – с объемной влажностью, NH_4^+ , Fe^{2+} и разнотравлено с углеродом и Fe_c .

4. Обсуждаемые множества: а) гидротермические условия, б) мобильные формы железа, в) биогенные показатели совокупно объясняют вариацию ОВП на 81, 52 и 61 % соответственно, наибольший вес в обусловленный эффект вносят объемная влажность, Fe^{2+} и водорастворимый углерод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.

- Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Мелентьева Н. В.* Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск, 1994. С. 128–139.
- Инишева Л. И., Шайдак Л., Сергеева М. А.* Динамика биохимических процессов и окислительно-восстановительное состояние в геохимически сопряженных ландшафтах олиготрофного болота // Почвоведение. 2016. № 4. С. 505–513.
- Инишева Л. И., Маслов С. Г., Щукина К. Е.* Биохимическая активность торфа Обского региона // Химия твердого топлива. 2018. № 6. С. 33–41.
- Кауричев И. С., Орлов Д. С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и географии почв. М.: Колос, 1982. 247 с.
- Порохина Е. В., Инишева Л. И., Дырин В. А.* Биологическая активность и сезонные изменения CO_2 и CH_4 в торфяных залежах эвтрофного болота // Вестн. Том. гос. ун-та. Биол. 2015. № 3 (31). С. 157–176.
- Халафян А. А.* Statistica 6. Статистический анализ данных: Учебник. 3-е изд. М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.
- Чекотовский Э. В.* Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. 464 с.
- Inisheva L. I., Maslov S. G., Shchukina K. E.* Biochemical activity of peat in the Ob region // Solid Fuel Chem. 2018. V. 52. N. 6. P. 373–381 (Original Rus. Text © L. I. Inisheva, S. G. Maslov, K. E. Shchukina, 2018, publ. in Khmiya Tverdogo Topliva. 2018. N. 6. P. 33–41).
- Inisheva L. I., Szajdak L., Sergeeva M. A.* Dynamics of biochemical processes and redox conditions in geochemically linked landscapes of oligotrophic bogs // Euras. Soil Sci. 2016. V. 49. N. 4. P. 466–474 (Original Rus. Text © L. I. Inisheva, L. Shaydak, M. A. Sergeeva, 2016, publ. in Pochvovedenie. 2016. N. 4. P. 505–513).

REDOX CONDITIONS OF PEAT SOILS OF DRAINED SWAMP PINE FORESTS OF WESTERN SIBERIA

T. T. Efremova, S. P. Efremov, A. F. Avrova

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

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru

We studied poorly drained sedge-sphagnum pine forests (*Pinus sylvestris* L.) in the southern taiga subzone of Western Siberia, drained by a network of open shallow channels 25 years ago at the time of the study (geographical coordinates 56°23'71" N, 84°34'04" E). The depth of standing swamp waters for three years of research averaged 23.2 ± 9.9 cm during the warm period. Soils – cultivated transitional (mesotrophic) type on powerful sedge-sphagnum peats. They are characterized by an acidic environment reaction – pH 4.0, a loose composition density of 0.10 g/cm³ and an ash content of 8.9–5.2%, decreasing with depth. The soil profile in the warm period is poorly differentiated into a zone of intense oxidative processes (0–10 cm) – 570–660 mV (median 610) and moderately oxidative (10–30 cm) – 430–640 mV (median 590). The main direction (trend) of seasonal fluctuations of the redox potential (RP) is characterized by an average weekly acceleration of 7.2 mV with an average weekly deceleration of 0.23 mV from June to October. RP by the type of linear function is significantly associated: positively with the groundwater level ($R^2 = 0.65$) and soil temperature ($R^2 = 0.56$), negatively with volumetric humidity ($R^2 = 0.60$). A significant second-order parabola-type relationship of RP was revealed: negative – with Fe²⁺ ($R^2 = 0.48$) and ammonium ($R^2 = 0.57$), positive with Fe³⁺ ($R^2 = 0.39$), multidirectional – with Fe_c ($R^2 = 0.55$) and water-soluble organic carbon ($R^2 = 0.54$). By the method of canonical analysis, it was found that the RP is determined by a set of hydrothermal indicators by 81 %. The volume humidity contributes the greatest weight to the conditioned effect. Various forms of iron cumulatively estimate the development of RP-reactions by 52 %, the dominant contribution belongs to Fe²⁺. The set of carbon and NH⁴⁺ determines the redox potential by 61 % with the largest weight of carbon in the set of characteristics.

Keywords: *seasonal trend, paired regression models, canonical analysis, hydrothermal conditions, Fe³⁺–Fe²⁺ system, water-soluble carbon, ammonium*

How to cite: Efremova T. T., Efremov S. P., Avrova A. F. Redox conditions of peat soils of drained swamp pine forests of Western Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 2. P. 15–20 (in Russian with English abstract and references).