

EDN: DQKWHI

УДК 630*114.3:582.475

Biological Activity of Soil in Scots Pine Stands with Varying Degrees of Crown Closure

Nataliya A. Makeeva*,
Elena Yu. Kolmogorova and Vladimir I. Ufimtsev
*Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS
Kemerovo, Russian Federation*

Received 21.03.2022, received in revised form 18.04.2023, accepted 17.05.2023

Abstract. The biological activity of soil is influenced by numerous factors, such as hydrothermal regime, acidity, physical and agrochemical properties of the soil, etc. In tree stands, such factors can also include the degree of crown closure. The present study reports data on indicators of biological activity of the soil: the abundance of microorganisms and the activity of soil enzymes in stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with various degrees of crown closure. The research was carried out in the Kuzbass Botanical Garden, located in the left-bank part of the city of Kemerovo, along the riverside of the Tom River (near Lake Sukhovskiy), east of the existing and future ensembles of the developing city center. The material of the study was soil in *P. sylvestris* stands of age class 2 (28–35 years) with different degrees of closure of the crown canopy: sparsely closed (20–30 %), medium–closed (50–60 %), and highly closed (80–90 %). Under-crown and inter-crown zones were established on each site, and an external zone was additionally established on sparsely closed study site. The soil was not polluted, had a neutral reaction of the medium, and contained average amounts of mobile phosphorus and potassium compounds. The study showed that the abundance of soil microorganisms was determined by soil moisture content. The following trends were revealed in the relationship between biological activity and the degree of closure of pine stands: the highest content of invertase and protease was observed in the under-crown zone of the sparsely and medium-closed pine stands. The soil in the inter-crown zone of highly closed stands was the most abundant in microorganisms that utilize organic forms of nitrogen and microorganisms that decompose mineral forms of nitrogen.

Keywords: crown closure, phytogenic zone, biological activity, soil microorganisms, micromycetes, invertase, protease, phosphatase.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: natykor@bk.ru

ORCID: 0000-0002-1971-4068 (Makeeva N.); 0000-0002-5703-7168 (Kolmogorova E.); 0000-0001-5854-5802 (Ufimtsev V.)

Acknowledgements. The work was carried out according to the state task No. 0286–2021–0010 “Development of scientific bases for assessing the state and restoration of floral diversity in situ and ex situ in regions with a high degree of ecosystem degradation as a result of anthropogenic and technogenic impacts”.

Citation: Makeeva N. A., Kolmogorova E. Yu., Ufimtsev V. I. Biological activity of soil in Scots pine stands with varying degrees of crown closure. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2023, 16(2), 178–192. EDN: DQKWHI



Особенности биологической активности почвы в насаждениях сосны обыкновенной различной степени сомкнутости крон

Н. А. Макеева, Е. Ю. Колмогорова, В. И. Уфимцев
*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
Российская Федерация, Кемерово*

Аннотация. На биологическую активность почвы оказывают влияние многочисленные факторы, такие как гидротермический режим, кислотность, физические и агрохимические свойства почвы и др. В древесных насаждениях к таким факторам можно также отнести степень сомкнутости крон. В статье представлены данные о показателях биологической активности почвы (количество микроорганизмов и активность почвенных ферментов) в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) различной степени сомкнутости крон. Исследования проводили на территории Кузбасского ботанического сада, расположенного в левобережной части города Кемерово, в прибрежной части реки Томи (район озера Суховского) к востоку от существующих и проектируемых ансамблей развивающегося общегородского центра. Объект исследования – почва в насаждениях *P. sylvestris* II класса возраста (28–35 лет) разной степени сомкнутости лесного полога: редкосомкнутые (20–30 %), среднесомкнутые (50–60 %) и высокосомкнутые (80–90 %). На каждом участке установлены подкروновые и прикroновые (межкroновые) зоны, на редкосомкнутых площадках наблюдения также установлена внешняя зона. Исследуемая почва не относится к загрязненной, имеет нейтральную реакцию среды и среднее содержание подвижных соединений фосфора и калия. Проведенные исследования показали, что численность почвенных микроорганизмов зависит от влажности почвы. Выявлены отдельные тенденции зависимости биологической активности от степени сомкнутости сосновых насаждений: наибольшее содержание инвертазы и протеазы наблюдалось в редко- и среднесомкнутых насаждениях сосны в подкroновой зоне. Почва высокосомкнутых насаждений в прикroновой зоне наиболее богата микроорганизмами, утилизирующими органические формы азота, и микроорганизмами, разлагающими минеральные формы азота.

Ключевые слова: сомкнутость крон, фитогенная зона, биологическая активность, почвенные микроорганизмы, микромицеты, инвертаза, протеаза, фосфатаза.

Благодарности. Работа выполнена по государственному заданию № 0286–2021–0010 «Разработка научных основ оценки состояния и восстановления флористического разнообразия *in situ* и *ex situ* в регионах с высокой степенью деградации экосистем в результате антропогенного и техногенного воздействий».

Цитирование: Makeeva, N. A. Особенности биологической активности почвы в насаждениях сосны обыкновенной различной степени сомкнутости крон / Н. А. Makeeva, Е. Ю. Колмогорова, В. И. Уфимцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2023. 16(2). С. 178–192. EDN: DQKWHI

Введение

В современных исследованиях под биологической активностью почв принято понимать интенсивность всех протекающих в ней биологических процессов (Вальков и др., 2004). В качестве показателей биологической активности почвы могут применяться: биомасса и численность различных групп почвенных микроорганизмов, ферментативная активность почв, количество и скорость накопления продуктов жизнедеятельности почвенных организмов, интенсивность основных процессов, связанных с круговоротом элементов, некоторые энергетические данные (Нетрусов и др., 2004). Почвенные микроорганизмы (бактерии и грибы) и гидролитические ферменты (протеаза, инвертаза и фосфатаза) регулируют интенсивность процессов переработки органических веществ, участвуют в процессах превращения энергии и вещества в наземных экосистемах, тем самым осуществляют функциональные связи между почвой и населяющими ее живыми организмами, а также способствуют поддержанию целостности биогеоценоза (Казеев и др., 2003; Хазиев, 2015; Albiach et al., 2001; Li et al., 2018).

Известно, что на биологическую активность почв оказывают влияние такие факторы, как гидротермический режим, кислотность, физические и агрохимические свойства почвы и др. Изменение водного, воздушного и питательного режимов почвы сказывается, прежде всего, на почвенной микрофлоре, а в результа-

те изменяется не только соотношение отдельных групп микроорганизмов, но и динамика и интенсивность микробиологических процессов превращения органических и минеральных соединений в почве (Хазиев, 2018; Li et al., 2018). Многими авторами отмечена сезонная динамика активности и численности микроорганизмов, обусловленная влажностью и температурой почвы (Henry, 2012; Hashimoto, Suzuki, 2004; Антонов и др., 2014). Несмотря на то что данные показатели, прежде всего, определяются климатическими условиями конкретной территории, в древесных насаждениях гидротермические условия почвы зависят от степени сомкнутости древостоев, поскольку значительная часть атмосферных осадков и солнечного света задерживается кронами деревьев (Рогозин, 2019).

В литературе имеются сведения об изменении экологических условий окружающего пространства древесных растений, причем как в сомкнутых насаждениях, так и вокруг отдельных деревьев (Лашинский, 1981; Горелов, 2013). Такие пространства называют фитогенными полями (Уранов, 1965), которые условно подразделяют на зоны: подкروновая, прикroновая и внешняя, отличающиеся почвенным составом, условиями освещенности и увлажнения (Уфимцев и др., 2015).

Таким образом, целью данной работы является изучение особенностей биологической активности почвы в насаждениях сосны обыкновенной различной степени сомкнутости крон.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования взяты почвы в насаждениях сосны обыкновенной II класса возраста (28–35 лет), произрастающей на территории Кузбасского ботанического сада (КузБС). Территория КузБС находится в левобережной части города Кемерово (рис. 1), в прибрежной части реки Томи (район озера Суховского) к востоку от существующих и проектируемых ансамблей развивающегося общегородского центра (Кузбасский ботанический..., 2022).

Геоморфологически КузБС расположен в пойме и первой надпойменной террасе реки Томи. Верхняя часть разреза представлена верхнечетвертично-современными аллювиально-делювиальными бурыми лёссовидными суглинками. На пониженных участках рельефа, в логах и западинах возможно распространение торфов и заторфованных суглинков. Согласно почвенно-географическому районированию Кемеровской области по С.С. Трофимову (1975), почва ботанического сада относится к лугово-черноземной (Gleyic CHERNOZEMS), для которой характерно по-

вышенное содержание гумуса, нейтральная реакция почвенного раствора, насыщенность кальцием и магнием (Шишов и др., 2004). Ранее проведённые исследования показали, что содержание большинства химических элементов (кроме мышьяка) находится в пределах ПДК (Загурская и др., 2015).

Климат района характеризуется как резко континентальный. Среднегодовая температура составляет $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя температура наиболее холодного месяца $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, наиболее жаркого $+24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков составляет 450–500 мм. Преобладающее направление ветра – юго-западное. Наибольшая глубина снежного покрова равна 29 см (Кузбасский..., 2022). Погодные условия в период исследований (май–сентябрь 2020 г.), по данным Кемеровского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Доклад..., 2021), представлены в табл. 1. В мае преобладала очень теплая погода, в первой и третьей декадах с ливневыми дождями, во второй половине месяца – с суховейными явлениями.



Рис. 1. Расположение Кузбасского ботанического сада в г. Кемерово

Fig. 1. Location of the Kuzbass Botanical Garden in Kemerovo

Таблица 1. Погодные условия в г. Кемерово в течение вегетационного периода 2020 г.

Table 1. Weather conditions in Kemerovo during the growing season of 2020

Месяц	Среднемесячная температура, °С	Количество осадков, мм
Май	10,1	67
Июнь	16,0	22
Июль	18,8	145
Август	18,3	46
Сентябрь	10,0	57

В июне наблюдалась умеренно прохладная сухая погода. В июле обильные ливневые дожди преобладали в первой и третьей декадах. Август характеризовался недобором осадков. В сентябре преобладала неустойчивая погода, с резкими колебаниями температуры, частыми ливневыми дождями, в конце месяца – с мокрым снегом.

Площадки наблюдения (ПН) заложены согласно грациям сомкнутости лесного полога: редкосомкнутые (20–30 %), среднесомкнутые (50–60 %) и высокосомкнутые (80–90 %). На каждом участке установлены подкروновые и прикroновые (межкroновые) зоны, на редкосомкнутых ПН также установлена внешняя зона (табл. 2). Отбор почвенных проб проводился трижды за период вегетации (третья декада мая, июля и сентября 2020 г.) в 5 точках на каждой из семи ПН. Полученные почвенные образцы тщательно перемешивали для получения смешанной пробы.

Учет численности микроорганизмов проводился из смешанной пробы методом посева почвенной суспензии на агаризованные среды в трехкратной повторности из разведений 10^{-2} – 10^{-3} : мясопептонный агар (МПА) – для определения микроорганизмов, использующих органический азот, крахмало-аммиачный агар (КАА) – для определения микроорганизмов, использующих минеральный азот, среду Сабуро – для определения микроскопических грибов (Нетрусов, Котова, 2005). Коэффициент минерализации рассчитывали как отношение численности микроорганизмов, выросших на КАА, к микроорганизмам, выросшим на МПА (Нетрусов, Котова, 2005).

Почвенные ферменты выделяли общепринятыми методами из смешанной пробы в трехкратной повторности. Определение инвертазной активности проводили методом Купревича и Щербаковой, протеазной – по Галстяну и Арутюнян (Титова, Козлов,

Таблица 2. Схема расположения площадок наблюдения

Table 2. Scheme of observation sites

Сосновые насаждения	Координаты	Фитогенная зона		
		Подкroновая	Прикroновая	Внешняя
Редкосомкнутые	55,3668° с.ш., 86,1903° в.д.	30 П	30 Пк	30 В
Среднесомкнутые	55,3668° с.ш., 86,1907° в.д.	60 П	60 Пк	–
Высокосомкнутые	55,3638° с.ш., 86,1871° в.д.	90 П	90 Пк	–

2012), общую фосфатазную активность определяли на фенолфталеин-фосфатном субстрате (Минеев, 2001). Для оценки биологической активности почв использовали общепринятые шкалы биохимической активности (Титова, Козлов, 2012).

Данные о количестве осадков и температуре воздуха за исследуемый период были получены на сайте rp5.ru (URL: https://rp5.ru/Погода_в_Кемерове). Влажность почвы определялась весовым методом (Нетрусов, Котова, 2005).

Математическую и статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием стандартного пакета MS Excel (Бараз, Пегашкин, 2014). На рисунках и в таблицах показаны средние и стандартные ошибки. Различия между средними значениями оценивали при помощи критерия Пирсона.

Агрохимический анализ проводили для почвы редкосомкнутых насаждений сосны в Испытательном центре ФГБУ центр агрохимической службы «Кемеровский» в соответствии с ГОСТ 26423–85, ГОСТ 26204–91, ГОСТ 27821–88, ГОСТ 26951–86, ГОСТ 26489–85 (Протокол лабораторных испытаний № 1613 от 18.12.2020).

Результаты и обсуждение

Агрохимический анализ почвы показал, что массовая доля нитратов изменяется в пределах от 11,8 до 22,4 мг/кг с максимальным содержанием в прикромовой зоне (табл. 3). Известно, что оптимальными условиями интенсивной нитрификации являются хорошая аэрация почвы, влажность 60–70 % от полной влагоемкости, температура 25–35 °С, pH 6–8. При этих условиях и высоком содержании органики в почве может накапливаться большое количество нитратов (Беляев, 2012). Однако содержание аммонийного и нитратного азота в почве очень динамично и во многом зависит от микробиологической деятельности. Лишь многократное определение этих форм в течение вегетационного периода дает представление об азотном режиме почв.

По уровню кислотности исследуемые образцы относятся к слабокислым или близким к нейтральным (pH находится в пределах 5,8–6,3). Исследуемые образцы почвы содержат 38,9–40,5 ммоль/100 г поглощенных оснований, что определяется как высокое. Как правило, лугово-черноземные почвы имеют достаточно высокую емкость катионного обмена (Национальный..., 2011), что обуслов-

Таблица 3. Агрохимический анализ почвы редкосомкнутых сосновых насаждений Кузбасского ботанического сада

Table 3. Agrochemical analysis of the soil of sparsely closed pine stands of the Kuzbass Botanical Garden

Наименование показателей	Единицы измерения	Результаты испытаний		
		1	2	3
pH водной вытяжки	ед. pH	6,2 ± 0,1	5,8 ± 0,1	6,3 ± 0,1
Массовая доля подвижных соединений фосфора (P ₂ O ₅)	мг/кг	Более 80	Более 80	Более 80
Массовая доля подвижных соединений калия (K ₂ O)	мг/кг	Более 80	Более 80	Более 80
Сумма поглощенных оснований	ммоль/100 г	38,9 ± 5,8	40,5 ± 6,1	40,1 ± 6,0
Массовая доля нитратов	мг/кг	11,8 ± 2,4	22,4 ± 4,5	15,9 ± 3,2
Обменный аммоний	мг/кг	12,0 ± 1,2	10,0 ± 1,0	10,2 ± 1,0

Примечание: 1 – подкромовая зона, 2 – прикромовая зона, 3 – внешняя зона

лено содержанием в почве гумуса, который обладает гораздо более высокой поглотительной способностью, чем глинистые материалы. Обеспеченность почвы фосфором и калием по Чирикову оценивается как средняя (ГОСТ Р 54650–2011). Агрохимические показатели в почве подкрановой, прикрановой и внешней зон существенно не отличаются.

Численность микроорганизмов является важным показателем, характеризующим биологическую активность почв, поскольку именно они синтезируют и выделяют большинство почвенных ферментов (Заварзин, 2004; Мотузова, Безуглова, 2007). В начале периода вегетации преобладают микроорганизмы, утилизирующие минеральный азот, к концу периода исследования наблюдается увеличение микроорганизмов, использующих органический азот (рис. 2 и 3). Максимальное содержание микроорганизмов, усваивающих минеральные и органические формы азота,

наблюдалось в III декаде мая при сочетании теплой погоды и предшествующих дождей, а минимальное – в июле, когда высокая температура воздуха на протяжении нескольких дней привела к снижению влажности почвы. Это подтверждает, что для почвенных микроорганизмов характерна сильная зависимость от температуры воздуха и почвы, а также от количества атмосферных осадков и запасов воды в почве. Статистический анализ показал положительную зависимость количества данных микроорганизмов от влажности почвы в мае ($r = 0,26$ и $0,25$, при $p < 0,05$) и июле ($r = 0,29$ и $0,19$, при $p < 0,05$). Широкая вариабельность численности микроорганизмов, как в течение вегетации, так и на разных участках, может быть обусловлена их неравномерным распределением (Забелина, 2014).

Микроорганизмы, утилизирующие органические формы азота, осуществляют процессы минерализации органических соедине-

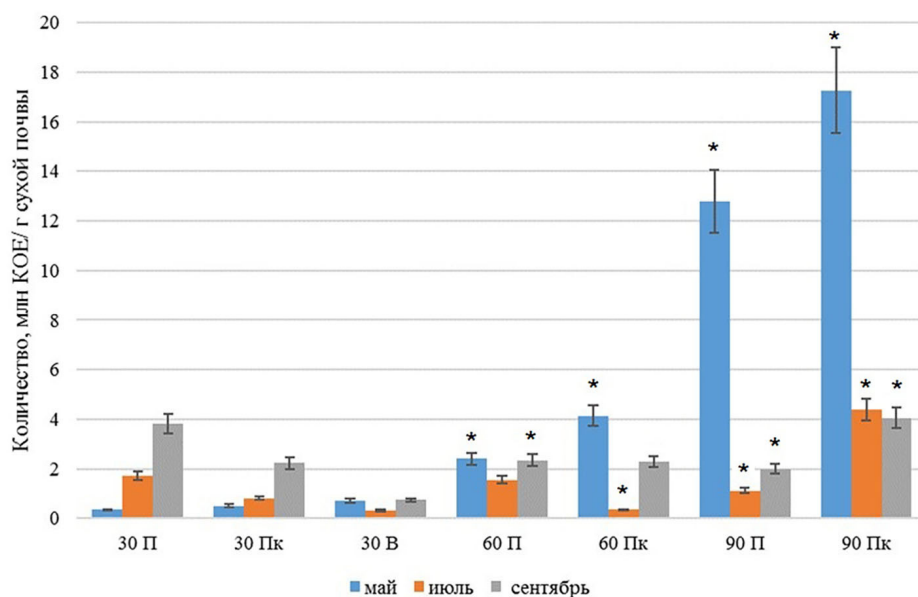


Рис. 2. Количество микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота в почве сосновых насаждений Кузбасского ботанического сада. Звездочкой отмечены достоверные ($p < 0,05$) отличия от редкосомкнутых насаждений соответствующей зоны

Fig. 2. The abundance of microorganisms that utilize organic forms of nitrogen in the soil of pine stands of the Kuzbass Botanical Garden. Asterisk marks significant difference from sparsely closed plantings of the corresponding zone

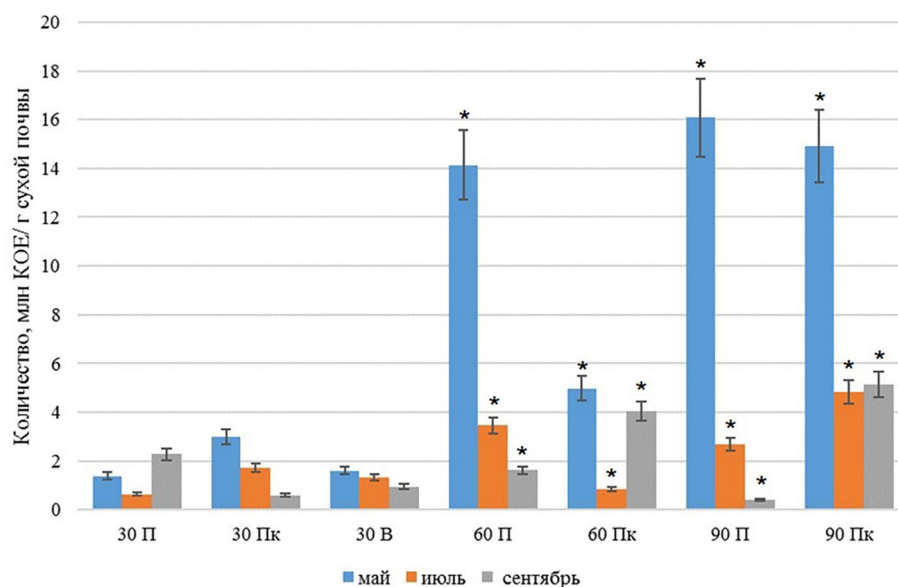


Рис. 3. Количество микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота в почве сосновых насаждений Кузбасского ботанического сада. Звездочкой отмечены достоверные ($p < 0,05$) отличия от редкосомкнутых насаждений соответствующей зоны

Fig. 3. The abundance of microorganisms that utilize mineral forms of nitrogen in the soil of pine stands of the Kuzbass Botanical Garden. Asterisk marks significant difference from sparsely closed plantings of the corresponding zone

ний в почве, вследствие чего высвобождаются минеральные формы азота. Поэтому наличие микроорганизмов, усваивающих минеральный азот и выявляемых на КАА, указывает на интенсивность процессов минерализации органического вещества и наличие минеральных форм азота. Максимальное количество микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота, наблюдалось на площадках с высокой степенью сомкнутости крон преимущественно в прикрановой зоне (4,1–17,3 млн КОЕ/ г сухой почвы). На тех же площадках зафиксированы наиболее высокие значения численности микроорганизмов, усваивающих минеральный азот (до 16,1 млн КОЕ/ г сухой почвы). Установлено, что численность микроорганизмов, использующих минеральный азот в течение вегетации, как правило, больше, чем количество микроорганизмов, трансформирующих его органи-

ческие формы, что служит показателем интенсификации мобилизационных процессов в почве. К концу периода вегетации наблюдалось уменьшение коэффициента минерализации: в мае он находился в пределах от 0,86 до 5,87, в июле – 0,37–4,25, в сентябре – 0,21–1,77 (табл. 4).

Гетеротрофное питание микроскопических грибов обуславливает их участие в начальных стадиях разложения органических соединений, именно им принадлежит главная роль в разложении лигнина (Polyanskaya, Zvyagintsev, 2005). Максимальное количество микроскопических грибов (рис. 4) наблюдалось в июле (736–4051 тыс. КОЕ/ г сухой почвы), когда для других групп микроорганизмов было отмечено снижение численности. При этом наблюдается зависимость численности микромицетов от степени сомкнутости крон: в мае их численность в под-

Таблица 4. Коэффициенты минерализации (Кмин) почвы сосновых насаждений разной степени сомкнутости

Table 4. Mineralization coefficients of the soil of pine stands with different degrees of closure

Площадка наблюдения	Коэффициенты минерализации (Кмин)		
	Май	Июль	Сентябрь
30 П	4,01	0,37	0,60
30 Пк	5,84	2,10	0,27
30 В	2,25	4,25	1,29
60 П	5,87	2,21	0,69
60 Пк	1,20	2,44	1,77
90 П	1,26	2,41	0,21
90 Пк	0,86	1,11	1,27

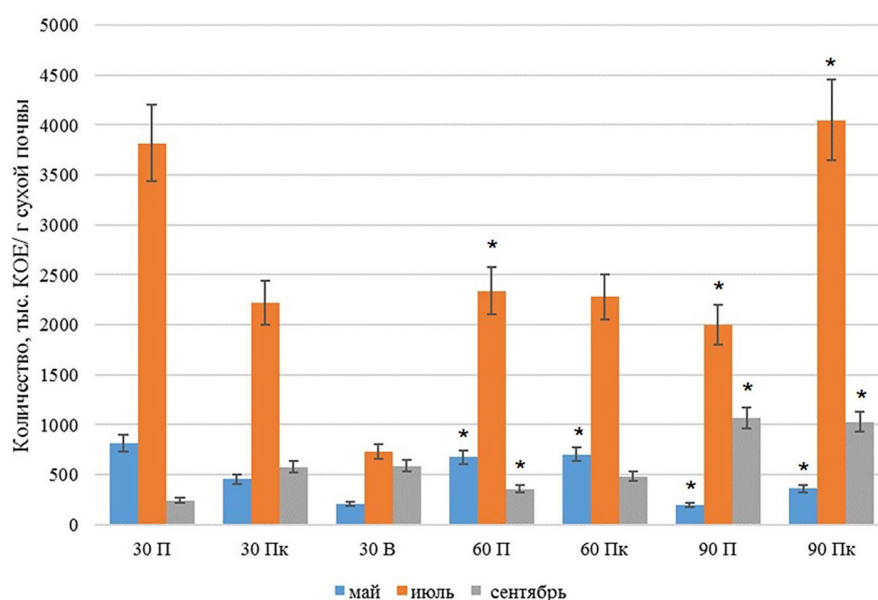
Рис. 4. Количество микроскопических грибов в почве сосновых насаждений Кузбасского ботанического сада. Звездочкой отмечены достоверные ($p < 0,05$) отличия от редкосомкнутых насаждений соответствующей зоны

Fig. 4. The abundance of microscopic fungi in the soil of pine stands of the Kuzbass Botanical Garden. Asterisk marks significant difference from sparsely closed plantings of the corresponding zone

кроновой зоне редкосомкнутых насаждений выше по сравнению с высокосомкнутыми в 4 раза ($p=0,004$), в июле – в 2 раза ($p=0,0002$). Мицелиальное строение микроскопических грибов делает их более устойчивыми к кратковременным изменениям гидротермического режима почвы. Однако зависимости их

количества от влажности почвы и температуры воздуха нами не установлены.

Как отмечалось выше, на численность микроорганизмов, утилизирующих органический азот, и микроорганизмов, усваивающих минеральный азот, оказывает значительное влияние влажность почвы,

которая в основном зависит от количества выпавших осадков и температур воздуха. Количество микроскопических грибов выше в редкосомкнутых насаждениях по сравнению с высокосомкнутыми в мае, и наоборот – в сентябре, что, вероятно, может быть связано с накоплением органического вещества в почве к концу периода вегетации. Для микроорганизмов, разлагающих минеральные формы азота, также установлена зависимость от степени сомкнутости крон: наиболее существенные отличия в течение вегетации отмечены в прикрановой зоне в высокосомкнутых насаждениях по сравнению с редкосомкнутыми ($p=0,02$).

Поскольку доказано, что биохимические методы имеют относительно низкие коэффициенты вариации по сравнению с микробиологическими (посев и определение биомассы) (Zvyagintsev et al., 1997; Колесников и др., 2000), активность почвенных ферментов является одним из основных показателей биологической активности почвы. Основными источниками ферментов в почве являются внеклеточные ферменты микроорганизмов и корней растений и внутриклеточные ферменты, поступающие в почву после отмирания почвенных организмов и растений. Ферментативная активность почвы определяется ее генетическими особенностями, гранулометрическим составом, физико-химическими свойствами, агрохимическим составом и гидротермическим режимом (Хазиев, 2018). Ферментативная активность почв тесно связана с изменениями общего климатического режима (Henry, 2012). В активные фазы роста растений при высокой температуре почвы и достаточной влажности в летние месяцы ферментативная активность почв максимальна.

Согласно шкале биологической активности почвы (Титова, Козлов, 2012) активность фосфатазы в почве сосновых насаждений

определяется как слабая и очень слабая и находится в пределах 0,04–1,33 мг P_2O_5 /г почвы за 30 мин. (табл. 5). Выделение ферментов в почву микроорганизмами и корнями растений обычно носит адаптивный характер в форме ответной реакции на присутствие или отсутствие субстрата для действия фермента или продукта реакции, что особенно четко проявляется с фосфатазами (Хазиев, 2005). Поэтому при недостатке в среде подвижного фосфора микроорганизмы и растения резко усиливают выделение ферментов, т.е. активность фосфатазы тем выше, чем меньше в почве подвижных форм фосфора. При этом активность фосфатазы, как большинства почвенных ферментов, динамична в течение вегетационного периода. К концу периода вегетации отмечен рост активности фосфатазы, вызванный, скорее всего, накоплением гумуса в результате разложения подстилки. В сентябре в вариантах с редко- и среднесомкнутыми кронами наблюдается увеличение активности фосфатазы в прикрановой зоне по сравнению с подкрановой, однако данные отличия статистически не достоверны, поэтому говорить о зависимости активности данного фермента от зоны фитогенного поля мы не можем.

Одним из наиболее устойчивых показателей зависимости биологической активности почв от внешних факторов является активность инвертазы, которая катализирует гидролитическое расщепление дисахаридов (сахароза и близкие к ней углеводы) на моносахара (глюкоза, фруктоза). Активность инвертазы также зависит от содержания гумуса в почвах, количества почвенных микроорганизмов, гранулометрического состава. Увеличению инвертазной активности способствует образование мощной дернины под травянистым покровом (Галстян, 1974).

Активность инвертазы во всех образцах почвы была выше, чем у протеазы и фосфа-

Таблица 5. Ферментативная активность почвы сосновых насаждений разной степени сомкнутости

Table 5. Enzymatic activity of the soil of pine stands with varying degrees of closure

Площадка наблюдения	Май	Июль	Сентябрь
Инвертазная активность, мг глюкозы / г почвы за 24 часа			
30 П	45,76±2,19	37,30±0,89	52,48±2,16
30 Пк	38,28±0,89	53,41±2,67	16,58±0,94
30 В	46,55±2,51	44,57±2,08	24,86±1,11
60 П	38,60±1,10 *	68,80±3,01 *	49,31±2,12 *
60 Пк	44,57±1,92 *	53,41±1,14	32,83±0,89 *
90 П	60,49± 3,11 *	30,20±1,21 *	32,04±0,78 *
90 Пк	45,76±1,87 *	69,39±3,05	24,26±0,65 *
Протеолитическая активность, мг глицина/г почвы за 24 часа			
30 П	3,91±0,09	2,89±0,14	5,36±0,33
30 Пк	2,46±0,08	2,93±0,12	5,96±0,29
30 В	1,83±0,01	3,01±0,09	4,08±0,11
60 П	3,12±0,20 *	3,25±0,30 *	7,79±0,22 *
60 Пк	1,88±0,11 *	3,56±0,31 *	5,06±0,19 *
90 П	1,93±0,05 *	2,93±0,22	6,70±0,41 *
90 Пк	2,63±0,07 *	3,26±0,15	4,32±0,35 *
Активность фосфатазы, мг P ₂ O ₅ /г почвы за 30 мин			
30 П	0,27±0,008	0,17±0,008	0,66±0,003
30 Пк	0,33±0,008	0,17±0,006	1,13±0,04
30 В	0,19±0,005	0,25±0,004	1,33±0,02
60 П	0,09± 0,003 *	0,21±0,006 *	1,16±0,02 *
60 Пк	0,09±0,003 *	0,21±0,006 *	1,33±0,03 *
90 П	0,13±0,005 *	0,23±0,006 *	1,04±0,02 *
90 Пк	0,08±0,002 *	0,11±0,005 *	0,44±0,01 *

* отмечены достоверные отличия от редкосомкнутых насаждений соответствующей зоны при P<0,05

тазы. Во всех образцах уровень содержания инвертазы варьировал от 16,58 до 69,39 мг глюкозы / г за 24 ч, что соответствует средней и высокой активности почвы. Сравнительный анализ показал, что за период исследований максимальное накопление фермента в почве отмечено в июле, меньше всего инвертазы наблюдалось в сентябре.

Протеолитическая активность почв характеризует первый этап минерализации сложных азотсодержащих соединений (гуминовых, фульвокислот, белков) до аминокислот и амидов (Минеев, 2001). Протеолитическая

активность в течение вегетационного периода на участках с разной степенью сомкнутости крон изменялась от слабой в мае (1,83–3,91 мг глицина/г почвы за 24 часа) до высокой степени активности в сентябре (4,08–7,79 мг глицина/г почвы за 24 часа). Наиболее интенсивные процессы протеолиза в конце периода вегетации можно объяснить накоплением органических остатков в почве (табл. 5).

В среднем за период вегетации наибольшее содержание инвертазы и протеазы наблюдалось в редко- и среднесомкнутых насаждениях сосны в подкрановой зоне (при

$p < 0,05$). Для значений активности фосфатазы достоверных отличий в зависимости от зоны фитогенного поля не выявлено. В результате статистического анализа полученных данных установлена достоверная положительная корреляция между активностью протеазы и фосфатазы ($r = 0,70$, при $p < 0,05$) и отрицательная между инвертазой и фосфатазой ($r = -0,50$, при $p < 0,05$).

Заключение

Проведенные исследования показали, что существует положительная корреляция между влажностью почвы и численностью микроорганизмов, усваивающих минеральный азот, и микроорганизмов, утилизирующих органические формы азота в мае ($r = 0,26$ и $0,25$, при $p < 0,05$) и июле ($r = 0,29$ и $0,19$, при $p < 0,05$). Микроскопические грибы менее чувствительны к кратковременным изменениям влажности почвы.

Нами установлено, что численность микроорганизмов, использующих минеральный азот в течение вегетации, как правило, больше, чем количество микроорганизмов, трансформирующих его органические фор-

мы, что служит показателем преобладания процессов иммобилизации азота в почве. В почве КузБС уровень инвертазы выше, чем протеазы и фосфатазы; активность инвертазы характеризуется как средняя, фосфатазная активность – слабая, протеолитическая активность изменялась в течение периода вегетации от слабой до высокой. Установлена достоверная положительная корреляция между активностью протеазы и фосфатазы ($r = 0,70$, при $p < 0,05$) и отрицательная между инвертазой и фосфатазой ($r = -0,50$, при $p < 0,05$).

Выявлены отдельные тенденции зависимости биологической активности от степени сомкнутости сосновых насаждений: в среднем за период вегетации наибольшее содержание инвертазы и протеазы наблюдалось в редко- и среднесомкнутых насаждениях сосны в подкороновой зоне (достоверные отличия при $p < 0,05$). Почва в высокосомкнутых насаждениях в прикороновой зоне наиболее богата микроорганизмами, утилизирующими органические формы азота, и микроорганизмами, разлагающими минеральные формы азота.

Список литературы / References

Антонов Г.И., Кондакова О.Э., Семенякин Д.А. (2014) Влияние несплошных рубок на почвенный микробный комплекс сосняков Красноярской лесостепи. *Живые и биокосные системы*, 7; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-7/article-6> [Antonov G.I., Kondakova O.E., Semenyakin D.A. (2014) Effects of partial cutting on soil microbial complex in pinewoods of Krasnoyarsk forest-steppe region. *Live and Bio-Abiotic Systems* [Zhivye i biokosnye sistemy], 7; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-7/article-6> (in Russian)]

Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф. (2014) *Использование MS Excel для анализа статистических данных: учебное пособие*. Нижний Тагил, НТИ (филиал) УрФУ, 181 с. [Baraz V.R., Pegashkin V.F. (2014) *Using MS Excel for statistical data analysis: textbook manual*. Nizhny Tagil, NTI (branch) of UrFU, 181 p. (in Russian)]

Беляев А.Б. (2012) *Элементы минерального питания в почвах*. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 29 с. [Belyaev A.B. (2012) *Elements of mineral nutrition in soils*. Publishing and Printing Center of Voronezh State University, 29 p. (in Russian)]

Вальков В. Ф., Казеев К. Ш., Колесников С. И. (2004) *Почвоведение: учебник для вузов*. Москва, ИКЦ «Март», 496 с. [Valkov V. F., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. (2004) *Soil science: textbook for universities*. Moscow, ICC «Mart», 496 p. (in Russian)]

Галстян А. Ш. (1974) *Ферментативная активность почв Армении*. Ереван, Айастан, 273 с. [Galstyan A. Sh. (1974) *Enzymatic activity of Armenian soils*. Yerevan, Ayastan, 273 p. (in Russian)]

Горелов А. М. (2013) Фитогенное поле и его структура. *Вестник Московского государственного областного университета*, 1: 5 [Gorelov A. M. (2013) Phytogenic field and its structure. *Bulletin of Moscow Region State University* [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta], 1: 5 (in Russian)]

ГОСТ Р 54650–2011 (2019) *Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Курсанова в модификации ЦИНАО. Технические требования: дата введения 2013–01–01*. Москва, Стандартинформ, 8 с. [GOST R 54650–2011 (2019) *Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method in the modification of the TSINAO. Technical requirements: date of introduction 2013–01–01*. Moscow, Standartinform, 8 p. (in Russian)]

Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2020 году (2021) Администрация правительства Кузбасса, Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса, Кемерово, 239 с. [Report on the state and environmental protection of the Kemerovo region – Kuzbass in 2020 (2021) Administration of the Government of Kuzbass, Ministry of Natural Resources and Ecology of Kuzbass, Kemerovo, 239 p. (in Russian)]

Забелина О. Н. (2014) *Оценка экологического состояния почвы городских рекреационных территорий на основании показателей биологической активности (на примере г. Владимира)*. Дисс. ...канд. биол. наук. Владимир, 146 с. [Zabelina O. N. (2014) *Assessment of the ecological state of the soil of urban recreational areas based on indicators of biological activity (a case study of the city of Vladimir)*. Dissertation ... candidate of Biological Sciences. Vladimir, 146 p. (in Russian)]

Заварзин Г. А. (2004) *Лекции по природоведческой микробиологии*. Москва, Наука, 348 с. [Zavarzin G. A. (2004) *Lectures on natural microbiology*. Moscow, Nauka, 348 p. (in Russian)]

Загурская Ю. В., Сиромля Т. И., Сысо А. И. (2015) Химические элементы в почвах ботанических садов юга Западной Сибири. *Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов: материалы IV Международной конференции*. Кемерово, с. 41–44 [Zagurskaya Yu. V., Siromlya T. I., Syso A. I. (2015) Chemical elements in soils of botanical gardens of the South of Western Siberia. *Problems of industrial botany of industrially developed regions: Proceedings of the IV International Conference*. Kemerovo, p. 41–44 (in Russian)]

Казеев К. Ш., Колесников С. И., Вальков В. Ф. (2003) *Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований*. Ростов-на-Дону, РГУ, 216 с. [Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Valkov V. F. (2003) *Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods*. Rostov-on-Don, Rostov State University, 216 p. (in Russian)]

Колесников С. И., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф. (2000) *Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами*. Ростов-на-Дону, СКНЦ ВШ, 232 с. [Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Valkov V. F. (2000) *Environmental consequences of soil pollution by heavy metals*. Rostov-on-Don, North Caucasian Scientific Center of Higher Education, 232 p. (in Russian)]

Кузбасский ботанический сад [Электронный ресурс], URL: <http://kuzbs.ru/index.php/> (дата обращения 25.02.22) [Kuzbass Botanical Garden [Electronic resource], URL: <http://kuzbs.ru/index.php/> (accessed 25.02.22) (in Russian)]

Лашинский Н. Н. (1981) *Структура и динамика сосновых лесов Нижнего Приангарья*. Новосибирск, Наука, 274 с. [Laschinsky N. N. (1981) *Structure and dynamics of pine forests of the Lower Angara Region*. Novosibirsk, Nauka, 274 p. (in Russian)]

Минеев В. Г. (2001) *Практикум по агрохимии: учебное пособие*. Москва, Издательство Московского университета, 689 с. [Mineev V. G. (2001) *Practical course in agrochemistry: textbook manual*. Moscow, Moscow University, 689 p. (in Russian)]

Мотузова Г. В., Безуглова О. С. (2007) *Экологический мониторинг почв*. Москва, Академический проект, 237 с. [Motuzova G. V., Bezuglova O. S. (2007) *Ecological monitoring of soils*. Moscow, Akademicheskii proekt, 237 p. (in Russian)]

Национальный атлас почв Российской Федерации (2011) Москва, Астрель, 632 с. [National Atlas of Soils of the Russian Federation (2011) Moscow, Astrel, 632 p. (in Russian)]

Нетрусов А. И., Бонч-Осмоловская Е. А., Горленко В. М. (2004) *Экология микроорганизмов: учебник для студентов вузов*. Москва, Издательский центр «Академия», 272 с. [Netrusov A. I., Bonch-Osmolovskaya E. A., Gorlenko V. M. (2004) *Ecology of microorganisms: textbook for university students*. Moscow, Publishing Center «Akademiya», 272 p. (in Russian)]

Нетрусов А. И., Котова И. Б. (2005) *Микробиология: учебник*. Москва, Академия, 52 с. [Netrusov A. I., Kotova I. B. (2005) *Microbiology: textbook*. Moscow, Akademiya, 52 p. (in Russian)]

Рогозин М. В. (2019) *Структура древостоев: конкуренция или партнерство?* Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 223 с. [Rogozin M. V. (2019) *The structure of tree stands: competition or partnership?* Perm, Perm State National Research University, 223 p. (in Russian)]

Титова В. И., Козлов А. В. (2012) *Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: научно-методическое пособие*. Нижний Новгород, Нижегородская сельскохозяйственная академия, 64 с. [Titova V. I., Kozlov A. V. (2012) *Methods for assessing the functioning of soil microbial community involved in the transformation of organic matter: a scientific and methodological guide*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Agricultural Academy, 64 p. (in Russian)]

Трофимов С. С. (1975) *Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области*. Новосибирск, Наука, 299 с. [Trofimov S. S. (1975) *Soil ecology and soil resources of the Kemerovo Region*. Novosibirsk, Nauka, 299 p. (in Russian)]

Уранов А. А. (1965) Фитогенное поле. *Проблемы современной ботаники. Том 1*. Москва, Ленинград, Наука, с. 251–254 [Uranov A. A. (1965) Phytogenic field. *Problems of modern botany. Vol. 1*. Moscow, Leningrad, Nauka, p. 251–254 (in Russian)]

Уфимцев В. И., Беланов И. П., Бочаров Д. А. (2015) Зонирование фитогенных полей деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на участках лесной рекультивации Кедровского угольного разреза. *Вестник Кемеровского государственного университета*, 1–2: 44–48 [Ufimtsev V. I., Belanov I. P., Bocharov D. A. (2015) Zoning of phytogeneous fields of the common pine (*Pinus sylvestris* L.) trees growing on reforestation sites of Kedrovsky coal mine. *Bulletin of Kemerovo State University* [Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta], 1–2: 44–48 (in Russian)]

Хазиев Ф. Х. (2005) *Методы почвенной энзимологии*. Москва, Наука, 252 с. [Khaziev F. Kh. (2005) *Methods of soil enzymology*. Moscow, Nauka, 252 p. (in Russian)]

Хазиев Ф. Х. (2015) Функциональная роль ферментов в почвенных процессах. *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*, 20(2): 14–24 [Khaziev F. Kh. (2015) Functional role of enzymes in soil processes. *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan* [Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan], 20(2): 14–24 (in Russian)]

Хазиев Ф. Х. (2018) Экологические связи ферментативной активности почв. *Экобиотех*, 1(2): 80–92 [Khaziev F. Kh. (2018) Ecological relations of the enzymatic activity of soil. *Ecobiotech* [Ekobiotech], 1(2): 80–92 (in Russian)]

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И. (2004) *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск, Ойкумена, 342 с. [Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I. (2004) *Classification and diagnostics of soils of Russia*. Smolensk, Oykumena, 342 p. (in Russian)]

Albiach R., Canet R., Pomares F., Ingelmo F. (2001) Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years. *Bioresource Technology*, 77(2): 109–114

Hashimoto S., Suzuki M. (2004) The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites. *Journal of Forest Research*, 9(2): 125–132

Henry H. A. L. (2012) Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate. *Soil Biology & Biochemistry*, 47: 53–59

Li J., Tong X., Awasthi M. K., Wu F., Ha S., Ma J., Sun X., He C. (2018) Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities along a chronosequence of desertified land revegetation. *Ecological Engineering*, 111: 22–30

Polyanskaya L. M., Zvyagintsev D. G. (2005) The content and composition of microbial biomass as an index of the ecological status of soil. *Eurasian Soil Science*, 38(6): 625–633

Zvyagintsev D. G., Kurakov A. V., Umarov M. M., Philip Z. (1997) Microbiological and biochemical indicators of lead pollution in soddy-podzolic soil. *Eurasian Soil Science*, 30(9): 1003–1009