

УДК 631.42:631.46:631.445:632.111.7

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАХОТНЫХ ПОЧВ ПРИ РАЗНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА ПРОМЕРЗАНИЯ¹

© 2023 г. В. Н. Пинской^{1,*}, Н. Н. Каширская¹, А. О. Алексеев¹,
В. В. Мальшев¹, А. В. Борисов¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, корп. 2, Россия

*E-mail: pinskoy@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Представлены результаты 2-летнего вегетационного опыта по изучению влияния длительности безморозного периода на химические свойства и биологическую активность агрокаштановых почв и агрочернозема. В задачу эксперимента входила оценка изменения почвенных свойств, которые могут происходить при дальнейшем потеплении климата и сокращении времени пребывания почв в замерзшем состоянии. Первый вариант опыта предусматривал инкубацию почв в замерзшем состоянии в зимний период на протяжении 160 сут, второй – 56 сут, в третьем варианте почву инкубировали весь зимний период при температуре $>0^{\circ}\text{C}$. Перед зимним инкубированием почву увлажняли до 60% ПВ, вносили минеральные удобрения и солому. Весной в почву сеяли яровую пшеницу сорта Злата селекции Московского НИИСХ “Немчиновка”. На протяжении всего вегетационного периода образцы почв находились в вегетационном павильоне в условиях естественной увлажненности и освещенности. Отбор образцов и измерения биологических свойств проводили в весенний период через 10 сут после того, как образцы переносили из холодильника в вегетационный павильон. Установлено, что в зависимости от длительности периода промерзания исследованных почв наиболее чувствительными показателями на изменение температуры оказались микробная биомасса (С-СИД), скорость базального дыхания (V-БАЗ) микробного сообщества и численность микроорганизмов (КОЕ), растущих на почвенном агаре и на богатой среде. В почвах, которые инкубировали без замораживания, были самые низкие показатели С-СИД и V-БАЗ. Увеличение периода промерзания почвы отразилось на кислотности почв. В вариантах с длительным замораживанием во 2-й год исследования величина рН увеличилась. Для агрочернозема отмечено снижение содержания P_2O_5 по мере увеличения периода промерзания. Для агрокаштановых почв эта закономерность была менее выраженной. В этих почвах была выявлена тенденция к снижению соотношения С : N при увеличении времени пребывания в замерзшем состоянии. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$, а также макро- и микроэлементов во всех вариантах практически не изменялось за 2 года эксперимента.

Ключевые слова: биологическая активность, пашня, безморозный период почв, агрокаштановые почвы, агрочерноземы.

DOI: 10.31857/S0002188123040105, EDN: DJINTK

ВВЕДЕНИЕ

Влиянию современного повышения температуры на почвенные свойства посвящено множество работ. Известно, что повышение температуры в зимний период способствует уменьшению глубины промерзания почвы, в связи с чем изменяются условия поглощения талых вод. Это приводит к более глубокому промачиванию почв в

весенний период и сокращению величины весеннего стока. На примере уплотненной пашни объекта, исследования которого проводили с 1973 г., показано, что смыв уменьшился в 6.2 раза [1].

Весьма значительные изменения, связанные с современным потеплением климата, затрагивают и биологические свойства почв. Актуальным исследованием и сегодня остается определение дыхательной активности почв во время оттаивания после зимнего периода. В среднем эмиссия углекислого газа из таких почв составляет 19–70% от их начальной дыхательной активности при 10°C .

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 19-29-05178 мк “Ретроспективный анализ и сценарий возможных изменений почв и экосистем степной зоны Европейской части России в условиях глобальных изменений климата”.

В дальнейшем наблюдали резкий рост почвенного дыхания, что связывали с ассимиляцией оставшихся клетками легкодоступного пула углерода, образовавшегося в результате отмирания части микробного сообщества при замерзании почв [2].

Потепление климата зачастую связывают с парниковым эффектом. Увеличение температуры напрямую зависит от повышающихся концентраций CO_2 , N_2O , CH_4 в атмосфере. За последние 100 лет отмечено возрастание температуры воздуха на всех континентах на $0.3\text{--}1.5^\circ\text{C}$ [3], а в месте с ней и увеличивается концентрации CO_2 в атмосфере. Повышение концентрации углекислого газа в данном случае может рассматриваться как своего рода дополнительный фактор атмосферного удобрения, который способствует увеличению продуктивности растений и активности почвенных микроорганизмов [4]. Показано, что повышение температуры привело к увеличению урожая зерновых культур в южных регионах России (Поволжье, Южном ФО) в период с 1975 по 2010 г. Возможно, это также связано с большим накоплением атмосферной влаги в почвах в зимне-весенний период. В то же время потепление климата негативно сказалось на урожае ранних яровых и озимых культур в Центрально-Черноземном регионе, что, по-видимому, связано с сокращением влагообеспеченности летнего периода и образованием почвенных засух [5].

В среднем, для европейской части России за последние 100 лет отмечено возрастание температуры на $1.2\text{--}1.3^\circ\text{C}$. Подобные изменения климата отражаются и на зональном ряде почв, а именно на смещении почвенно-климатических зон в северном направлении. Например, в лесных почвах северной и средней тайги с повышением температуры будет уменьшаться подзолистый процесс и усиливаться дерновый. В сухостепных зонах по мере увеличения аридизации, вероятно, усилятся процессы засоления почв [3].

Следует отметить, что в большинстве публикаций влияние потепления климата на почвенные свойства рассматривают в контексте изменений условий летнего периода, либо в целом за год. Слабоизученным вопросом остается влияние повышения зимних температур на химические и микробиологические свойства почв. В то же время вполне вероятно, что дальнейшие изменения климата будут сопровождаться повышением зимних температур. В этом случае могут происходить качественные изменения состояния почв: почвы ряда регионов нашей страны могут перейти из фации умеренно- или кратковременно промерзающих в непромерзающие. В связи с этим цель ра-

боты – изучение изменений микробиологических и химических свойств почв в условиях разной длительности пребывания в замерзшем состоянии в зимний период.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны 2 типа пахотных почв: агрокаштановые почвы и агрочерноземы. Отбор образцов осуществляли в однотипных геоморфологических и литологических условиях.

Агрокаштановые почвы отбирали на территории Ремонтненского р-на Ростовской обл. Территория расположена в зоне сухих степей. Климат сухой и жаркий, длительность периода без мороза – 170–180 сут. Сумма осадков в течение года – 340–415 мм, из них в летнее время года – 175–240 мм. Испарение влаги за год равно 975 мм. Почвообразующие породы представлены лессовидными карбонатными суглинками, подстилаемые неогеновыми глинами. В почвенном покрове преобладают каштановые почвы и солонцы восточно-европейской фации, теплые, промерзающие (2–3 мес.) [6]. Разделенность территорий овражно-балочной сети доходит до 0.27 км/км^2 , что обеспечивает хорошие условия дренированности.

Образцы агрочернозема были отобраны в Богучарском р-не Воронежской обл. (центральная часть Русской равнины). Климат умеренно-континентальный с хорошо выраженными сезонами года: зима – холодная, лето – теплое. На территории преобладают западные, северо-западные и юго-восточные ветра. Осадки распределяются неравномерно: максимальное количество осадков выпадает в июне – 60.6 мм, минимальное – в марте (28.6 мм). Среднее количество осадков – от 450 до 550 мм. Нестабильность и низкая толщина снежного покрова вызывает глубокое, до 70 см, промерзание почвы (в течении 3–4 мес.) [7].

В июле 2019 г. было отобрано по 100 кг агрокаштановой и агрочерноземной почвы из пахотного горизонта в полевой влажности. В лабораторных условиях почву высушивали и просеивали через сито 5 мм.

В каждую почву осенью вносили солому (из расчета 50 ц/га) и нитрофоску (из расчета N90P90K90). Солому перед внесением мелко измельчали до фрагментов $\approx 1\text{--}2 \text{ см}$. После ее тщательно перемешивали с почвой и рассыпали смесь по контейнерам объемом 5 кг, что позволило сделать по 6 повторностей для каждого варианта опыта.

Таблица 1. Некоторые химические и биологические свойства инкубационных почв с разной продолжительностью периода промерзания

Вариант (длительность периода промерзания, сут)	Номер образца	C _{орг}	N	S	Коэффициент дыхательной активности (Q _г)	Индекс олиготрофности	
		%				БС : ПА	
Агрокаштановая почва, 1-й год эксперимента							
Фон	0	1	1.2	0.10	0.017	0.28 ± 0.02	354 ± 8
		2	1.0	0.09	0.015	0.35 ± 0.01	271 ± 5
		3	1.0	0.09	0.013	0.41 ± 0.03	249 ± 5
	56	4	1.1	0.10	0.014	0.24 ± 0.02	270 ± 4
		5	1.1	0.10	0.015	0.61 ± 0.02	310 ± 7
		6	1.1	0.10	0.014	0.10 ± 0.02	333 ± 7
	160	7	1.0	0.09	0.013	0.20 ± 0.01	270 ± 6
		8	1.1	0.10	0.016	0.22 ± 0.02	330 ± 9
		9	1.1	0.10	0.014	0.43 ± 0.03	290 ± 10
Агрокаштановая почва, 2-й год эксперимента							
Фон	0	1	1.0	0.09	0.013	0.39 ± 0.02	259 ± 16
		2	1.0	0.09	0.022	0.38 ± 0.03	272 ± 15
		3	1.1	0.10	0.016	0.46 ± 0.01	290 ± 18
	56	4	1.0	0.10	0.013	0.38 ± 0.06	453 ± 15
		5	1.0	0.10	0.013	0.37 ± 0.04	508 ± 8
		6	1.1	0.10	0.015	0.42 ± 0.03	745 ± 59
	160	7	1.0	0.10	0.012	0.34 ± 0.06	230 ± 9
		8	1.0	0.10	0.012	0.44 ± 0.02	264 ± 11
		9	1.1	0.10	0.013	0.43 ± 0.07	279 ± 9
Агрочернозем, 1-й год эксперимента							
Фон	0	1	5.3	0.42	0.074	0.23 ± 0.04	311 ± 33
		2	4.9	0.39	0.043	0.13 ± 0.02	230 ± 9
		3	5.1	0.41	0.044	0.17 ± 0.03	264 ± 12
	56	4	5.0	0.39	0.043	0.15 ± 0.01	279 ± 10
		5	5.1	0.41	0.048	0.12 ± 0.01	239 ± 16
		6	5.1	0.40	0.045	0.16 ± 0.02	274 ± 14
	160	7	5.1	0.41	0.046	0.20 ± 0.03	309 ± 8
		8	5.0	0.40	0.053	0.25 ± 0.02	296 ± 7
		9	5.0	0.40	0.052	0.20 ± 0.02	291 ± 7
Агрочернозем, 2-й год эксперимента							
Фон	0	1	4.9	0.40	0.050	0.45 ± 0.04	193 ± 16
		2	4.9	0.40	0.043	0.46 ± 0.03	278 ± 18
		3	5.1	0.40	0.042	0.50 ± 0.01	268 ± 14
	56	4	5.0	0.40	0.044	0.51 ± 0.02	252 ± 11
		5	4.9	0.40	0.042	0.51 ± 0.02	291 ± 12
		6	5.1	0.40	0.043	0.56 ± 0.06	303 ± 13
	160	7	4.9	0.40	0.044	0.52 ± 0.01	203 ± 12
		8	4.9	0.40	0.045	0.55 ± 0.01	180 ± 11
		9	4.9	0.40	0.043	0.48 ± 0.02	226 ± 13

Перед зимним инкубированием почву увлажняли до 60% ПВ и помещали в пластиковые контейнеры. Для обмена почвенных газов были проделаны технологические отверстия в верхней части контейнеров (6 шт. диаметром 5 мм). До наступления морозов почву инкубировали в вегетационном павильоне при естественных температурных условиях. После первых заморозков (20 ноября) контейнеры с почвой инкубировали согласно схеме опыта. Первый вариант опыта помещали в морозильную камеру при температуре -12°C на 160 сут. Второй вариант опыта помещали в морозильник при температуре -12°C на 56 сут, после чего переносили в холодильник и инкубировали до весны при температуре $6-8^{\circ}\text{C}$. Третий вариант опыта поместили в холодильник и инкубировали на протяжении всего зимнего периода при температуре $6-8^{\circ}\text{C}$.

Через 160 сут контейнеры с почвой переносили в вегетационный павильон. Отбор образцов почв на анализы проводили через 10 сут инкубации в естественных условиях. Из каждого контейнера отбирали по 50 г почвы. Образцы доводили до воздушно-сухого состояния и усредняли. В середине мая проводили посев пшеницы яровой сорта Злата (*Triticum aestivum* L.) селекции Московского НИИСХ “Немчиновка” (всхожесть пшеницы – 95%). В каждом контейнере площадью 27×27 см оставляли по 9 растений. Растения развивались в условиях атмосферного увлажнения и освещенности.

В конце вегетационного периода определяли урожай и величину наземной фитомассы. После этого в почву вносили удобрения и солому, увлажняли до 60% ПВ и инкубировали в вегетационном павильоне до наступления морозов. Далее образцы переносили в морозильник и холодильник в соответствии со схемой опыта.

На следующий год проводили все описанные выше действия в аналогичном порядке.

Отбор почвенных образцов на анализы проводили после зимнего инкубирования. Из каждого контейнера отбирали по 50 г почвы. Образцы доводили до воздушно-сухого состояния и усредняли.

В образцах определяли такие биологические показатели как: скорость базального дыхания (**V-BA3**) [8], содержание микробной биомассы по скорости субстрат-индуцированного дыхания (**C-СИД**) [9], расчет коэффициента устойчивости микробных сообществ (**Qr**) [10]. Также проводили оценку активности фермента уреазы [11] и фосфатазы [12].

Для оценки индекса олиготрофности микробного сообщества [13] проводили посеы на твердые питательные среды. Учет олиготрофных мик-

роорганизмов, использующих элементы питания из рассеянного состояния, производили на почвенном агаре (**ПА**) следующего состава (г/л): почва – 200, агар – 20.

Для учета микроорганизмов, разлагающих растительные остатки, использовали богатую органическую среду (**БС**) следующего состава (г/л): сухой питательный агар – 3, пептон – 3, триптон – 1, дрожжевой экстракт – 1, глюкоза – 1, агар – 20. Индекс олиготрофности рассчитывали по формуле $\text{ПА/БС} \times 100$, где ПА – численность микроорганизмов (**КОЭ**), растущих на почвенном агаре, БС – численность микроорганизмов (**КОЭ**), растущих на богатой среде.

В исследованных почвах определяли следующие химические свойства: содержание углерода, азота и серы на (C/H/N)-анализаторе [14], K_2O и P_2O_5 определяли по Мачигину, pH – традиционными методами [15]. Концентрацию макро- (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , Na_2O) и микроэлементов (Ba, Co, Cr, Cu, Cs, Ga, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn, Sr, Y, V, Zn, Zr) выполняли по методике измерения массовой доли элементов и оксидов в порошковых пробах методом рентгенофлюоресцентного анализа (M049-П/04) с помощью настольного WD-XRF кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра “BRUKER JAGUAR S6”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета наиболее точного среднего показателя каждого варианта опыта использовали достаточно репрезентативную выборку. Каждый вариант опыта состоял из 3-х повторностей, в свою очередь каждая повторность была разделена на 2 контейнера. В лабораторных условиях каждый отобранный образец анализировали в трехкратной повторности (для выявления ошибки в эксперименте), таким образом, вычисления среднего показателя одного параметра осуществляли по 18-ти результатам. На графиках бокс-плот показано варьирование химических свойств и биологической активности в агрокаштановых и агрочерноземных почвах в зависимости от длительности периода промерзания в зимний период (рис. 1, 2).

Влияние длительности периода промерзания на урожай. В 1-й год минимальный урожай пшеницы был зафиксирован для чернозема в варианте с 160 сут промерзания. Различия между вариантами 56 и 0 сут промерзания были примерно одинаковыми (средняя наземная фитомасса для каждого контейнера была равна ≈ 15 г) (рис. 3).

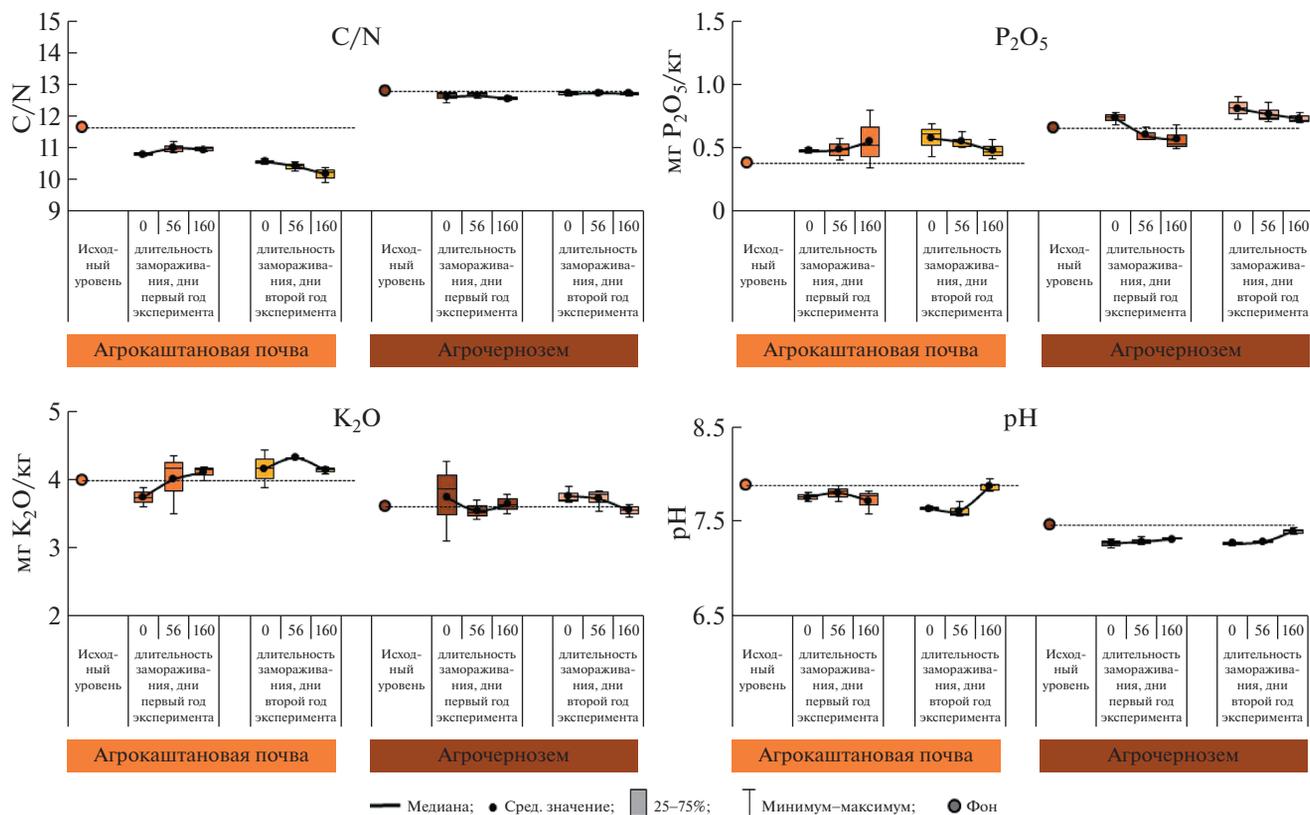


Рис. 1. Изменения некоторых химических свойств почв за 1-й и 2-й год эксперимента с разной длительностью периода промерзания.

Для агрокаштановой почвы минимальная урожайность в 1-й год была в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут (≈ 15 г/контейнер), максимальная – при инкубировании почвы при положительных температурах на протяжении всего зимнего периода (≈ 18 г/контейнер). Обратная закономерность для агрокаштановых почв была выявлена во 2-й год эксперимента, где общая фитомасса и урожай были больше в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут.

В вариантах с агрочерноземом во 2-й год эксперимента наблюдали закономерное возрастание наземной фитомассы по мере уменьшения периода промерзания. Также во 2-й год эксперимента относительно 1-го увеличилась фитомасса в образцах, которые промерзли 160 сут, – на 2 г, 56 сут – на 4 г, без промерзания – на 6 г.

Варьирование химических свойств агрокаштановых и агрочерноземных почв. Содержание $C_{орг}$ в фоновых почвах было на уровне 1.15% в агрокаштановой и 5.34% – в агрочерноземе. После 2-х лет эксперимента наблюдали общее незначительное снижение содержания углерода в 1-й и 2-й год

эксперимента (на $\approx 0.1\%$). Между вариантами опыта особых различий выявлено не было.

Содержание азота в исследованных агрокаштановых почвах менялось в пределах 0.09–0.1%, в агрочерноземах – 0.38–0.41% за 1-й и 2-й период эксперимента. Содержание азота в фоновых почвах было приблизительно равным почвам эксперимента.

Отношение углерода к азоту (C : N) в агрочерноземной почве практически не различалось в вариантах с разной длительностью промерзания как в 1-й, так и во 2-й год эксперимента (рис. 1).

Иная закономерность была выявлена для агрокаштановых почв. В первый год эксперимента наименьшее отношение C : N было в вариантах без промерзания. На 2-й год эксперимента в этом же варианте опыта величина C : N осталась на прежнем уровне. В то же время наблюдали характерное уменьшение величины C : N по мере увеличения времени промерзания агрокаштановых почв.

Как правило, внесение минеральных удобрений благоприятно сказывается на увеличении урожая сельхозкультур [16]. Внесение аммофоски

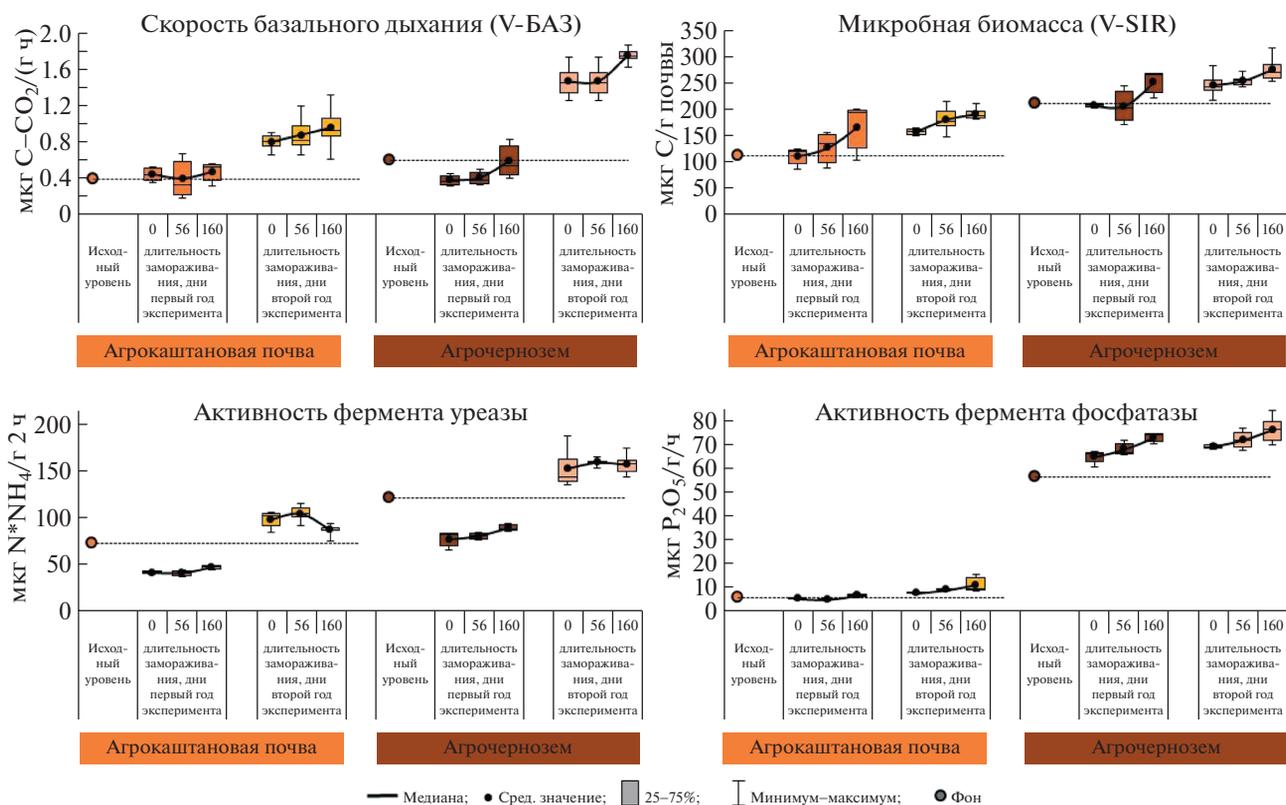


Рис. 2. Изменения биологической активности почв за 1-й и 2-й год эксперимента с разной длительностью периода промерзания.

из расчета N90P90K90 в нашем случае является, по-видимому, завышенной дозой. Среднему содержанию P_2O_5 в агрокаштановых почвах и агрочерноземах, как правило, должно соответствовать 0.25 мг P_2O_5 /кг, K_2O – 2.5 мг/кг [17, 18]. Также стоит обратить внимание на содержание этих элементов в фоновой почве (рис. 1), где показано, что вклад P_2O_5 и K_2O изначально был высоким. В работе [19] указано, что потребность во внесении дополнительных фосфорных и калийных удобрений в такие почвы очень низкая.

Содержание P_2O_5 в агрокаштановых почвах в 1-й и 2-й год эксперимента несколько повысилось относительно фона (рис. 1). По мере возрастания продолжительности промерзания во 2-й год эксперимента отмечена тенденция к снижению содержания P_2O_5 в агрокаштановых почвах. Схожая тенденция прослежена в агрочерноземах как в 1-й, так и во 2-й год опыта. Варьирование содержания K_2O было менее заметным, в агрокаштановых почвах этот показатель изменялся в пределах 3.5–4.4, в агрочерноземах – 3.1–4.3 мг K_2O /кг.

Известно, что внесение минеральных удобрений вызывает некоторое смещение величины pH в кислую область [20]. На рис. 1 видно, что относительно фона в образцах эксперимента почва была более кислой. При этом эффект подкисления был минимальным в варианте с длительным периодом промерзания почвы. Подкислению почвы в нашем случае могла способствовать и высокая влажность (60% ПВ) – использование дистиллированной воды, внесение соломы и связанное с этим развитие грибной микрофлоры, а также разные гидротермические условия [21].

Исключением были почвы с периодом промерзания 160 сут, в этом случае во 2-й год эксперимента величина pH была близка к фоновому варианту, как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе. В этих образцах происходило значительно меньшее выделение CO_2 микроорганизмами, который, растворяясь в почвенном растворе, образовывал H_2CO_3 [20]. Можно предположить, что длительность промерзания косвенно влияла на изменение pH через активность микроорганизмов.

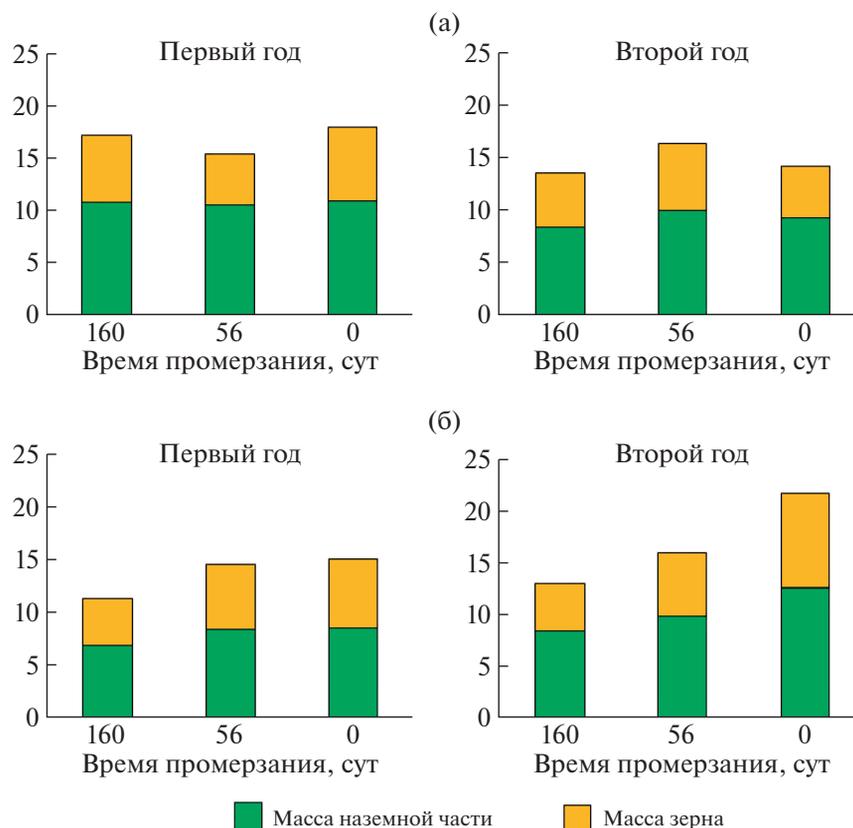


Рис. 3. Величина урожая и наземной фитомассы яровой пшеницы (г) при выращивании на агрокаштановой почвы (а) и агрочерноземе (б).

В ходе эксперимента отмечено снижение содержания серы в почве, особенно это было заметно в вариантах с агрочерноземом. Известно, что потребность культурных растений в сере высока, этот показатель не должен опускаться $<0.065\%$ г [22]. Максимальное содержание S в исследованных почвах было в агрочерноземе – 0.07% . Во всех вариантах опыта с агрочерноземной почвой содержание S было значительно меньше ($0.05\text{--}0.04\%$), чем в фоновой почве. Наиболее заметное снижение ее содержания было отмечено во 2-й год в варианте промерзания в течение 160 сут. Вероятно, некое увеличение количества серы в непромерзающих образцах 2-го года эксперимента было связано с более кислой средой и менее быстрым выщелачиванием, чем при промерзании [23]. Содержание S в агрокаштановой почве изначально было не высоким (0.017%) и практически не изменялось в вариантах опыта.

В это же время анализ валового химического состава показал, что в ходе 2-летнего эксперимента концентрации макро- (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , Na_2O) и микроэлементов (Ba, Co, Cr, Cu, Cs, Ga, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn,

Sr, Y, V, Zn, Zr) в почвах эксперимента не изменялись и не зависели от продолжительности периода промерзания.

Изменения биологической активности почв. В 1-й год эксперимента различный период промерзания повлиял незначительно на скорость базального дыхания (V-БАЗ) агрокаштановой почвы (рис. 2), средние величины которой были на одном уровне с фоновой почвой. Скорость дыхания (V-БАЗ) микроорганизмов агрочерноземной почвы в образцах при наибольшем периоде промерзания была аналогична V-БАЗ микроорганизмов фоновой почвы и существенно больше, чем в образцах с меньшим периодом промерзания.

Во 2-й год эксперимента интенсивность базального дыхания агрокаштановой почвы увеличилась в 2 раза ($1.0\text{--}0.8$ мкг C-CO₂/г/ч), агрочернозема – в 3 раза ($1.75\text{--}1.4$ мкг C-CO₂/г/ч). Выявлена тенденция к усилению интенсивности базального дыхания в зависимости от увеличения периода промерзания почвы в зимний период.

Длительность периода промерзания существенным образом отразилась на величине мик-

робной биомассы (МБ) как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе (рис. 2). В целом величина МБ в агрочерноземе была больше на ≈ 100 мкг С/г, чем в агрокаштановой. Выявлена закономерность для почв, которые инкубировали при плюсовых температурах и почв с малым периодом промерзания (56 сут). В этих вариантах микробная биомасса была схожей с фоновой почвой (агрокаштановая – 110, агрочернозем – 210 мкг С/г).

Во 2-й год эксперимента отмечено увеличение показателя микробной биомассы во всех вариантах опыта, но в меньшей степени. Максимальная МБ как в агрокаштановой почве (190 мкг С/г), так и агрочерноземе (275 мкг С/г), была отмечена в варианте с максимальной длительностью периода промерзания (160 сут). С уменьшением периода промерзания почвы закономерно снижалась интенсивность субстрат-индуцированного дыхания. Возможной причиной этого было отмирание части микробного сообщества и формирование пула доступного углерода для оставшейся части микробиоты почв.

Коэффициент дыхательной активности Q_t , рассчитанный по отношению скоростей базального и субстрат-индуцированного дыхания, дает представление об устойчивости микробных сообществ почв в условиях разной длительности периода промерзания. В стрессовых условиях отмечено увеличение этого показателя [10]. Исследования, проведенные в 1-й год, показали, что наиболее устойчивые микробные сообщества были в агрокаштановых почвах в условиях наибольшего периода промерзания – 160 сут. В агрочерноземах ситуация была обратной: величина Q_t была минимальной в варианте без промерзания. Сравнение устойчивости микробных сообществ 1-го и 2-го года эксперимента существенно различались как в агрокаштановой (в 1.5 раза), так и в агрочерноземной (2.5 раза) почве. Нарушение устойчивости микробных сообществ по сравнению с предыдущим годом указывало на перестройку микробиоты почв.

Активность фермента уреазы (УА), осуществляющей гидролитическое расщепление мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, показана на рис. 1. Относительно почв фона УА была меньше в 1-й год эксперимента как в агрокаштановой почве, так и в агрочерноземе. В варианте с максимальной длительностью периода промерзания (160 сут) как в агрокаштановой почве (46.5 мкг N-NH₄/г/2 ч), так и в агрочерноземе (89 мкг N-NH₄/г/2 ч) УА была незначительно больше, чем в вариантах с длительностью про-

мерзания почвы 56 сут, и в вариантах, инкубированных при плюсовых температурах.

Значительное возрастание УА наблюдали в почвах 2-го года эксперимента, что вероятно свидетельствовало об интенсификации процесса минерализации сложных органических азотсодержащих соединений в почве. Относительно 1-го года эксперимента активность фермента уреазы в агрокаштановой почве и в агрочерноземе в среднем возросла более чем в 2 раза.

В отличие от показателей МБ и интенсивности базального дыхания максимальная активность фермента уреазы зафиксирована в агрокаштановых почвах, период промерзания которых составлял 56 сут – 115 мкг N-NH₄/г/2 ч. В агрочерноземе наибольшая активность уреазы была в варианте без промерзания – 187 мкг N-NH₄/г/2 ч, но величины средних были примерно одинаковыми во всех вариантах опыта.

Численность бактерий, растущих на богатой среде (БС), в агрочерноземной почве 1-го года эксперимента была больше, чем в фоновой почве. Численность бактерий, растущих на БС, в этом же году в эксперименте с агрокаштановой почвой также была больше относительно фона, но это различие было менее существенным. В 1-й год эксперимента в агрочерноземе наблюдали снижение численности микроорганизмов, растущих на БС по мере увеличения периода промерзания относительно непромерзающих почв (в 1.3–1.5 раза). Аналогично это проявлялось и во 2-й год эксперимента (в 2.7–2.5 раза). В этих же образцах соответственно снизилась и способность микроорганизмов разлагать растительные остатки. Численность микроорганизмов (КОЕ), растущих на БС, в почвах, период промерзания которых составил 56 и 160 сут, на 2-й год эксперимента стала меньше, чем в фоновой почве.

В агрокаштановой почве численность микроорганизмов, растущих на БС, была одинаковой в образцах безморозного периода и в образцах с продолжительностью промерзания 160 сут, в варианте с продолжительностью промерзания 56 сут численность микроорганизмов, растущих на БС, была незначительно меньше. Интересная закономерность выявлена во 2-й год эксперимента в этих вариантах. В агрокаштановых почвах наблюдали противоположную тенденцию, чем в агрочерноземах: численность микроорганизмов, растущих на богатой среде, возрастала при увеличении продолжительности периода промерзания.

Численность микроорганизмов, растущих на почвенном агаре, в агрочерноземных почвах (в

1-й и 2-й год) и фоновой варьировала аналогичным образом с численностью микроорганизмов, растущих на БС. Иная закономерность была выявлена для агрокаштановых почв. В 1-й год эксперимента в вариантах опыта с непромерзавшей почвой и промерзавшей 56 сут основная масса выборки данных была меньше фоновых показателей. Тогда как в варианте с продолжительностью промерзания 160 сут в половине случаев численность олиготрофных микроорганизмов была больше, чем в фоновой почве. Второй год эксперимента привел к уменьшению численности олиготрофных микроорганизмов в образцах агрокаштановой почвы, не подвергшихся замораживанию (в 1.3–4.0 раза по отношению к фону). В образцах почвы в вариантах с продолжительностью промерзания 56 и 160 сут во 2-й год наблюдали значительное увеличение данного показателя.

По результатам оценки общей численности олиготрофных микроорганизмов и бактерий, способных использовать растительные остатки, был рассчитан индекс олиготрофности (ИО) микробных сообществ. Как правило, в естественных условиях увеличение индекса олиготрофности обычно происходит при недостатке доступного органического вещества в почве и часто связано с аридизацией климата [13, 24]. В 1-й год эксперимента с агрочерноземом отмечено увеличение ИО по мере увеличения периода промерзания почвы. Эти величины находились в пределах фона. Во 2-й год эксперимента доля олиготрофных микроорганизмов, растущих на ПА, снижалась в вариантах без промерзания и в вариантах с промерзанием в течение 160 сут. Вероятно, аэрация и внесение удобрений и соломы обусловили снижение ИО, что привело к созданию благоприятных условий для роста микроорганизмов, растущих на БС. Соотношение ПА : БС в варианте с периодом промерзания 56 сут не изменилось во 2-й год опыта.

В агрокаштановой почве, как в 1-й год эксперимента, так и во 2-й, величина ИО была больше в вариантах с периодом промерзания 56 сут. Интересен также тот факт, что в этом варианте опыта в 1-й год ИО был меньше фона, тогда как во 2-й год, наоборот, значительно больше.

В целом в вариантах без промерзания и в вариантах с промерзанием в течение 160 сут численность микроорганизмов, растущих на богатой среде, была больше. Эта было особенно заметно во 2-й год в образцах с максимальной длительностью промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продолжительность пребывания почвы в замерзшем состоянии в зимний период оказывала заметное влияние на некоторые химические свойства и биологическую активность почв.

В большей мере увеличение продолжительности периода промерзания почвы отразилось на величине рН. В вариантах промерзания 160 сут во 2-й год исследования величина рН возросла. Содержание P_2O_5 в агрочерноземе в 1-й и во 2-й год опыта снижалось по мере увеличения продолжительности промерзания почв. В меньшей мере это было выражено для агрокаштановых почв во 2-й год эксперимента. Как в агрокаштановой, так и в агрочерноземной почве содержание $C_{орг}$, макро- и микроэлементов практически не изменялось от влияния разных температур в зимний период.

Влияние длительности безморозного периода в большей мере отразилось на микробиологических показателях почв. Величина микробной биомассы, рассчитанная по величине показателя С-СИД, закономерно снижалась при уменьшении продолжительности периода промерзания как агрокаштановых почв, так и агрочернозема. Схожая тенденция была выявлена для скорости базального дыхания (V-БАЗ) почвенного микробного сообщества. Эта тенденция изменения показателя была обусловлена отсутствием отмирания части микробного сообщества в морозный период, что формировало дополнительный пул легкодоступного углерода для питания оставшейся части микробного сообщества.

Уровень фосфатазной активности также снижался по мере уменьшения длительности периода промерзания, но в меньшей степени.

Активность фермента уреазы и дыхательный коэффициент Q_г в вариантах опыта в исследованных как агрокаштановых, так и агрочерноземных почвах практически не изменялась и варьировала в пределах погрешности.

Индекс олиготрофности (ИО) во 2-й год эксперимента во всех типах почв был больше в вариантах, с длительностью промерзания 56 сут. В почвах, которые инкубировали при положительных температурах, а также в варианте с длительностью промерзания 160 сут величина ИО была меньше фоновых показателей, что указывало на увеличение численности микроорганизмов, растущих на богатой среде и разлагающих растительные остатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев И.Ф., Левицкая Н.Г., Стрижков Н.И.* Современная оценка и тенденции климатических изменений поверхностного стока на черноземных почвах // Аграрн. научн. журн. Саратов, 2016. № 4. С. 19–24.
2. *Курганова И.Н., Типе Р.* Влияние процессов заморзания–оттаивания на дыхательную активность почв // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1095–1105.
3. *Худяков О.И., Решоткин О.В.* Эволюция почв в связи с современным потеплением климата // Теор. и прикл. экол. 2017. № 2. С. 38–43.
4. *Кудряков В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А.* Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
5. *Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семдяев А.К.* Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. 2011. Т. 3. С. 31–39.
6. *Фетюхин И.В., Авдеенко А.П., Черненко В.В., Рябцева Н.А.* Системы земледелия: научные основы и региональный аспект. Учеб. пособ. Пос. Персиановский: Донской ГАУ, 2016. 172 с.
7. *Агроклиматический справочник по Воронежской области.* Л.: Гидрометеиздат, 1958. 166 с.
8. *Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякина Т.Н.* Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1993. № 11. С. 72–77.
9. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* Physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
10. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д.* Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346.
11. *Kandeler E., Gerber H.* Short-term assay of urease activity using colorimetric determination of ammonium // Biol. Fertil. Soil. 1988. V. 6 № 1. P. 68–72.
12. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии / Под ред. Киреевой Н.А., Мелентьева А.И. М.: Наука, 2005. 252 с.
13. *Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Стретович И.В., Демкин В.А.* Характеристика микробных сообществ степных подкуранных палеопочв Сарматского времени (I–IV вв. н.э.) // Почвоведение. 2009. № 7. С. 836–846.
14. *Holmes F.L.* Elementary analysis and the origins of physiological chemistry. Isis. 1963. V. 54(1). P. 50–81.
15. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 490 с.
16. *Смирнов П.М., Муравин Э.А.* Агрохимия. Учеб. пособ. для высш. с.-х. учеб. заведений. М.: Колос, 1997. 240 с.
17. *Основы агрохимии: Метод. указания к выполнению самостоятельной работы для студентов II курса лесохоз. факультета по направлению подготовки бакалавров “Лесное дело” по теме “Расчеты доз минеральных удобрений” / Сост. З.Н. Маркина.* Брянск: БГИТА, 2012. 35 с.
18. *Цвей Я.П., Бондарь С.А., Сенчук С.М.* Формирование агрохимических показателей чернозема в зависимости от систем удобрения пшеницы озимой в севообороте // Збалансирована природокористування. 2016. № 3. С. 191–194.
19. *Агрохимия / Под ред. В.Г. Минеева.* М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
20. *Михайлова Л.А.* Агрохимия. Научные основы применения удобрений под основные полевые культуры. Пермь: ИПЦ “Прокрость”, 2015. 127 с.
21. *Лукалов В.В., Савич В.И., Панова П.Ю.* Интегральная оценка кислотно-основного состояния почв // Международ. сел.-хоз. журн. 2019. № 3. С. 65–68.
22. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международ. сел.-хоз. журн. 2016. № 5. С. 39–47.
23. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
24. *Demkina T.S., Popova I.V., Demkin V.A.* Characterization of the microbial communities in the modern and buried under kurgans soils of solonchic complexes in the dry steppes of the Lower Volga Region // Euras. Soil Sci. 2013. V. 7. P. 768–777.
<https://doi.org/10.1134/S106422931307003X>

Changes in the Chemical and Biological Properties of Arable Soils with Different Duration of the Freezing Period

V. N. Pinskoy^{a,#}, N. N. Kashirskaya^a, A. O. Alekseev^a, V. V. Malyshev^a, and A.V. Borisov^a

^a*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS
Institutskaya ul. 2, bld. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[#]*E-mail: pinskoy@inbox.ru*

The results of a 2-year vegetation experiment to study the effect of the duration of the frost-free period on the chemical properties and biological activity of agrokashan soils and agrochernozem are presented. The task of the experiment was to assess changes in soil properties that may occur with further warming of the climate and a reduction in the time of stay of soils in the frozen state. The first variant of the experiment provided for incubation of soils in a frozen state in winter for 160 days, the second – 56 days, in the third variant, the soil

was incubated throughout the winter period at a temperature of $>0^{\circ}\text{C}$. Before winter incubation, the soil was moistened to 60% of FMC, mineral fertilizers and straw were applied. In the spring, spring wheat of the Zlata variety of the selection of the Moscow NIISH "Nemchinovka" was sown in the soil. Throughout the growing season, soil samples were kept in the vegetation pavilion in conditions of natural moisture and illumination. Sampling and measurements of biological properties were carried out in the spring period 10 days after the samples were transferred from the refrigerator to the vegetation pavilion. It was found that, depending on the duration of the freezing period of the studied soils, the most sensitive indicators for temperature changes were microbial biomass (C-LED), basal respiration rate (V-BASRR) of the microbial community and the number of microorganisms (NMO) growing on soil agar and on a rich medium. The soils that were incubated without freezing had the lowest values of C-LED and V-BASRR. The increase in the freezing period of the soil affected the acidity of the soils. In the variants with prolonged freezing in the 2nd year of the study, the pH value increased. For agrochernozem, a decrease in the content of P_2O_5 was noted as the freezing period increased. For agrokashan soils, this pattern was less pronounced. In these soils, a tendency to decrease the C : N ratio was revealed with an increase in the time spent in the frozen state. The content of C_{org} , as well as macro- and microelements in all variants practically did not change during the 2 years of the experiment.

Key words: biological activity, arable land, frost-free period of soils, agrokashan soils, agrochernozems.