

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВЛАЖНОСТИ И ВНЕСЕНИЯ СОЛОМЫ НА ДИНАМИКУ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ПОЧВЕННЫЕ ПУЛЫ УГЛЕРОДА И АЗОТА

© 2019 г. А. С. Тулина

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия*

E-mail: atulina@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.09.2018 г.

После доработки 01.10.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2018 г.

Изучено влияние температуры (8, 18 и 28°C), влажности (10, 25 и 40 вес. %) и внесения зрелой пшеничной соломы (1% от массы почвы) на динамику продуцирования С-СО₂ образцами 3-х пахотных почв в течение 150-суточной инкубации. Наиболее значимым фактором, определяющим изменчивость пулов общего органического, потенциально-минерализуемого и микробного углерода и общего азота являлось внесение соломы. Изменчивость пула минерального азота определялась температурой. К концу эксперимента при 18 и 28°C в почвах накапливалось в среднем в 2 раза больше минерального азота, чем при 8°C, а при 25%-ном увлажнении – в 1.5 раза больше, чем при увлажнении 10 и 40 вес.%. В почвах с соломой при 8°C обнаружена нетто-иммобилизация, а при 18 и 28°C – нетто-минерализация азота.

Ключевые слова: температура, влажность, внесение соломы, динамика минерализации органического вещества, почвенные пулы углерода и азота.

DOI: 10.1134/S0002188119030141

ВВЕДЕНИЕ

Минерализация органического вещества в почве определяется количеством, качеством и защищенностью его составляющих, а также природными и антропогенными факторами [1]. Важнейшими природными абиотическими факторами являются температура и влажность: они влияют на скорость процессов в почве и преобразование содержащихся в почве и поступающих в нее веществ и материалов, и, как следствие, на эмиссию парниковых газов и содержание минеральных форм азота, необходимых для роста и развития растений. Для прогнозирования влияния температуры и влажности на почвенные процессы и пулы различных элементов необходимы специальные исследования, проводимые при разных гидротермических условиях, что особенно актуально при наблюдающихся климатических изменениях последних десятилетий.

Распространенной практикой современного земледелия является возвращение в почву побочной продукции сельскохозяйственных культур, основная доля в которой принадлежит соломе [2]. Солома становится значимым удобрительным

ресурсом в связи с переходом на бесподстилочное содержание скота, ее внесение в почву менее затратно по сравнению с уборкой с поля. Систематическое применение соломы обеспечивает улучшение структуры и водно-физических свойств почвы, способствует оптимизации гумусного статуса пахотных почв и повышению содержания в них питательных элементов [3–7]. Солома является эффективным источником формирования активного пула почвенного азота, стимулируя функциональную активность почвенного микробного сообщества [8, 9]. Усиление иммобилизации азота при внесении соломы способствует уменьшению газообразных и инфильтрационных потерь азота [10–13], что особенно важно в отсутствие вегетирующих растений в безморозный период года.

Внесение соломы изменяет азотный режим почвы. С одной стороны, с соломой в почву поступает дополнительное количество азота, также возможно усиление несимбиотической азотфиксации, связанное с применением соломы [6, 14]. С другой стороны, широкое соотношение углерода и азота (С : N), свойственное соломе, способ-

ствуется поглощению микроорганизмами минерального азота, содержащегося в почве, и преобладанию иммобилизации над минерализацией органических соединений азота [15, 16]. В этой связи важным представляется выявление условий, способствующих минерализации органических азотсодержащих соединений.

Цель работы – изучить влияние температуры, влажности и внесения соломы на динамику минерализации органического вещества (*ОВ*) и оценить воздействие этих факторов на общий органический ($C_{орг}$), потенциально-минерализуемый ($C_{пм}$), микробный ($C_{мб}$) пулы углерода, а также общий ($N_{общ}$) и минеральный ($N_{мин}$) пулы азота в пахотных почвах 3-х типов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика почв. Исследования проводили с образцами серой лесной среднесуглинистой почвы (Московская обл.), оподзоленного тяжелосуглинистого чернозема (Тульская обл.) и темно-каштановой легкосуглинистой почвы (Оренбургская обл.), отобранными на пахотных участках из 0–20 см слоя. Почвы имели следующие исходные показатели: серая лесная почва: pH_{H_2O} – 6,7, содержание $C_{орг}$ – 0,92%, $N_{общ}$ – 1170, обменного аммония ($N-NH_4$) – 7, нитратов ($N-NO_3$) – 13 мг/кг; оподзоленный чернозем: pH_{H_2O} – 7,2, $C_{орг}$ – 2,5%, $N_{общ}$ – 2190, $N-NH_4$ – 13, $N-NO_3$ – 4 мг/кг; темно-каштановая почва: pH_{H_2O} – 7,6, $C_{орг}$ – 1,12%, $N_{общ}$ – 1390, $N-NH_4$ – 22, $N-NO_3$ – 12 мг/кг.

Основная инкубация. Зрелую пшеничную солому, содержащую 40,5% $C_{орг}$ и 0,86% $N_{общ}$, размалывали и смешивали с почвой в дозе 1% от массы почвы. Образцы почв без соломы и с соломой помещали в стеклянные флаконы, увлажняли и инкубировали в термостатах при постоянной температуре (8, 18 и 28°C) и влажности (10, 25, 40 вес. %) в течение 150 сут. Образцы соломы инкубировали также в течение 150 сут при температуре 8, 18 и 28°C и влажности 10, 40, 80, 120 и 160 вес. %. Опыт провели в трехкратной повторности.

Повторная инкубация. Образцы почв с соломой и без соломы, ранее проинкубированные при разных гидротермических условиях, подвергали повторной инкубации при одинаковой температуре (22°C) и влажности (25 вес. %) в течение 14 сут.

Измерение CO_2 . В течение инкубации образцов почвы, соломы и почвы с соломой ежедневно в течение первой недели эксперимента, затем 3, 2 и 1 раз в неделю определяли количество продуци-

руемого диоксида углерода (CO_2). Измерения концентрации CO_2 проводили на хроматографе “Кристалл Люкс 4000М”.

Для оценки воздействия температуры и влажности на размер фактической минерализации органического вещества ($C_{фм}$), оцениваемой по продуцированию углерода, входящего в состав диоксида ($C-CO_2$), были использованы температурные (Q_{10}) и влажностные (W_{10}) коэффициенты, которые вычисляли по уравнениям (1) и (2) соответственно [17]:

$$Q_{10} = (X_2/X_1)^{10/(T_2-T_1)}, \quad (1)$$

где X_1 и X_2 – $C_{фм}$ при меньшей (T_1) и большей (T_2) температуре.

$$W_{10} = (X_2/X_1)^{10/(W_2-W_1)}, \quad (2)$$

где X_1 и X_2 – $C_{фм}$ при меньшей (W_1) и большей (W_2) влажности.

Температурный коэффициент показывает, во сколько раз изменяется кумулятивное количество $C-CO_2$, выделившееся из образцов почвы, соломы и почвы с соломой при минерализации *ОВ* за определенный период времени при увеличении температуры на 10°C, а влажностный коэффициент – при увеличении влажности на 10 вес. %.

Минерализацию соломы в почвах оценивали по разности кумулятивного продуцирования $C-CO_2$ образцами почвы с соломой и почвы без соломы за 150 сут инкубации.

Оценка минерализуемого пула органического вещества и микробной биомассы биокинетическим методом. Величину пула потенциально-минерализуемого углерода рассчитывали по кумулятивному продуцированию $C-CO_2$ за 150 сут инкубации в соответствии с методом биокинетического фракционирования органического вещества [18]. Кумулятивные кривые продуцирования $C-CO_2$ рассчитывали по кинетике первого порядка:

$$C_t = C_{пм}(1 - \exp(kt)), \quad (3)$$

где C_t – кумулятивное количество выделившегося $C-CO_2$ за время t , мг C /кг почвы. $C_{пм}$ – пул потенциально-минерализуемого углерода, мг C /кг почвы, k – константа скорости минерализации $C_{пм}$, сут⁻¹.

Среднее время оборачиваемости $C_{пм}$ (*ТТ*) рассчитывали как $ТТ = 1/k$, а интенсивность минерализации (*ИМ*) – как $ИМ = C_{пм}k$.

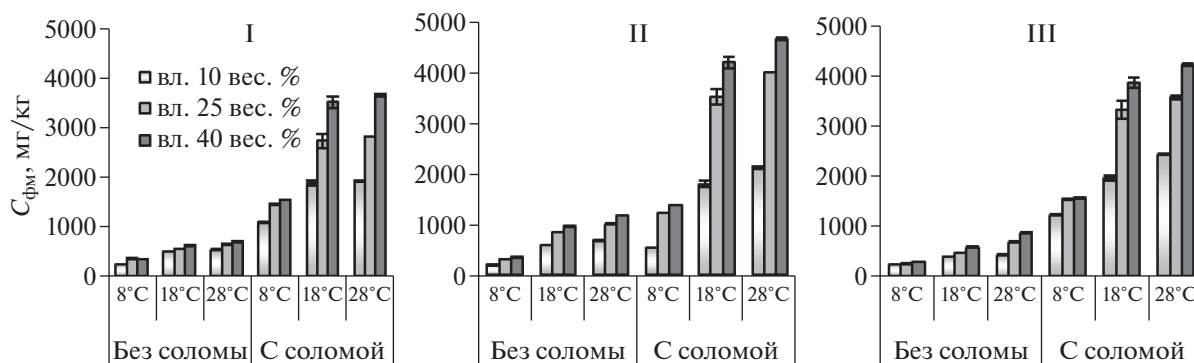


Рис. 1. Количество фактически минерализованного углерода органического вещества до $C-CO_2$ ($C_{фм}$, мг/кг) в течение 150-суточной инкубации серой лесной почвы (I), оподзоленного чернозема (II) и темно-каштановой почвы (III) без соломы и с соломой при разных гидротермических условиях. На гистограммах приведены средние величины и стандартные отклонения. То же на рис. 2–4.

Содержание микробной биомассы определяли по количеству $C-CO_2$, выделившемуся за 14 сут повторной инкубации (уравнение (4)):

$$C_t = 0.45C_{мб}(1 - \exp(kt)) + Bt, \quad (4)$$

где C_t – кумулятивное количество $C-CO_2$ (мг/кг), выделившегося за время t (сут), $C_{мб}$ – содержание углерода микробной биомассы (мг/кг), k – константа скорости, $сут^{-1}$, 0.45 – доля углерода почвенного субстрата, минерализованного микроорганизмами до $C-CO_2$, B – константа, показывающая скорость продукции $C-CO_2$ при равновесном состоянии прироста и отмирания биомассы после полной утилизации начального запаса субстрата [18].

Вычисления проводили методом нелинейной оценки с использованием программы Statistica 6.0. Коэффициенты с уровнем значимости $P > 0.05$ отвергали.

Микробный метаболический или дыхательный коэффициент (qCO_2) рассчитывали как отношение скорости дыхания микроорганизмов к их биомассе [19].

Определение содержания углерода и азота в почве. После окончания инкубации образцы почвы и

почвы с соломой высушивали в течение 1 сут при $65^\circ C$, определяли содержание в них $C_{орг}$ и $N_{общ}$ на CHNS-анализаторе “Elementar Vario”, $N-NH_4$, $N-NO_3$, суммы нитратов и обменного аммония ($N_{мин}$) – по методу Кудеярова. Величину нетто-минерализации и нетто-иммобилизации минерального азота рассчитывали как разницу содержания $N_{мин}$ в почве после 150 сут инкубации и в исходных образцах.

Математическая обработка результатов. Вклад изученных факторов (температуры, влажности и внесения соломы) в изменчивость пулов углерода и азота в почвах рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка фактической минерализации органического вещества. Минерализация *ОВ* больше зависела от гидротермических условий, при которых проходила инкубация, и от внесения соломы, чем от свойств почв. Содержание $C_{орг}$ в черноземе было в 2.2 и 2.7 раза больше, чем в темно-каштановой и серой лесной почвах, соответственно, а количество органического вещества, фактически

Таблица 1. Температурные коэффициенты (Q_{10}) фактической минерализации органического вещества в почвах без соломы и с соломой за первые и последние две недели инкубации и за весь период инкубации, рассчитанные для температурного диапазона 8–28°C

Почва	Без соломы			С соломой		
	период оценки продуцирования $C-CO_2$, сут					
	0–14	137–150	0–150	0–14	137–150	0–150
Серая лесная	1.18	1.86	1.40	1.95	1.68	1.42
Чернозем оподзоленный	1.33	2.73	1.85	2.46	1.96	1.88
Темно-каштановая	1.28	2.07	1.57	2.42	1.50	1.52

Примечание. Приведены средние данные для 3-х уровней увлажнения.

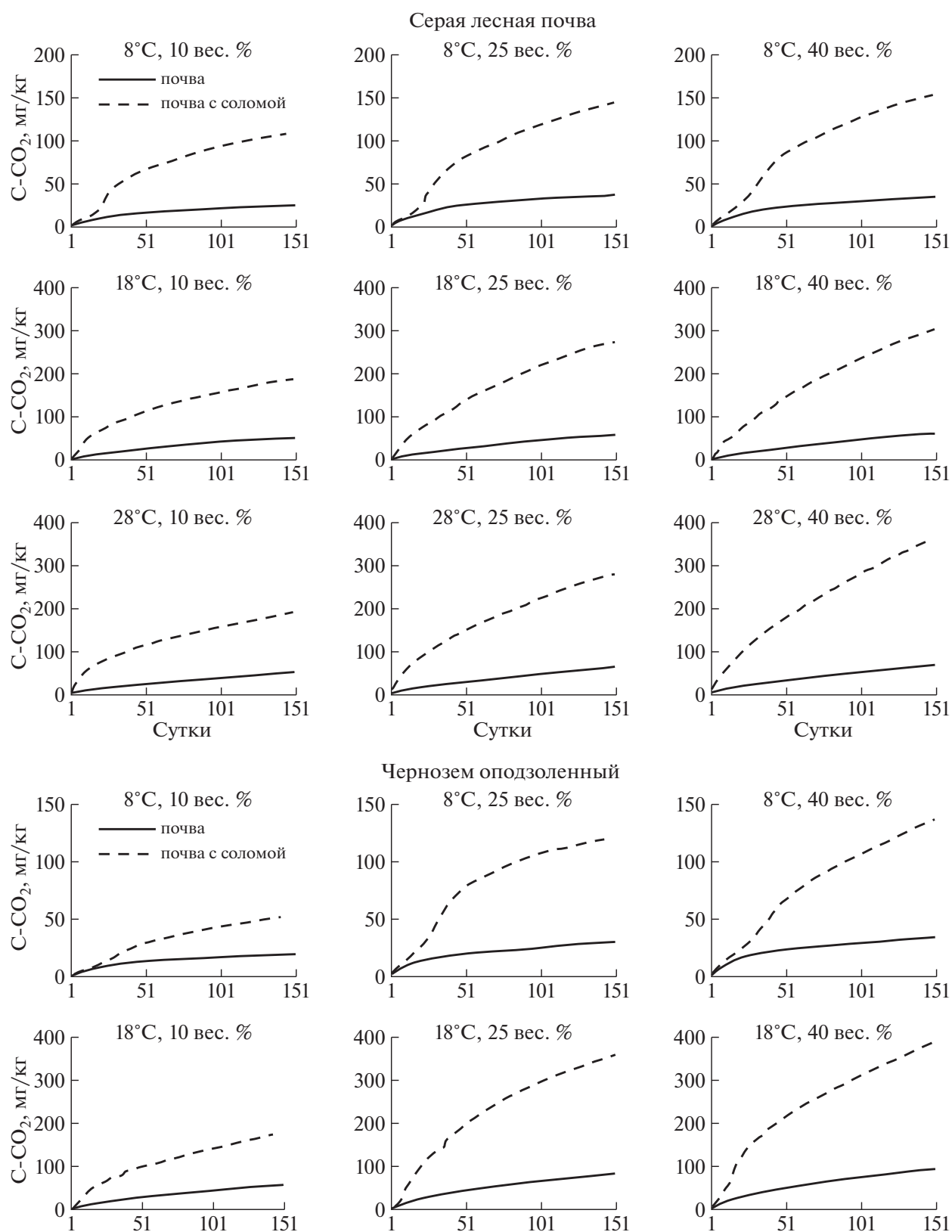


Рис. 2. Динамика кумулятивного продуцирования C-CO₂ в течение 150-суточной инкубации серой лесной почвы, чернозема оподзоленного и темно-каштановой почвы без соломы и с соломой в разных гидротермических условиях: 8, 18 и 28°C – температура, 10, 25 и 40 вес. % – влажность.

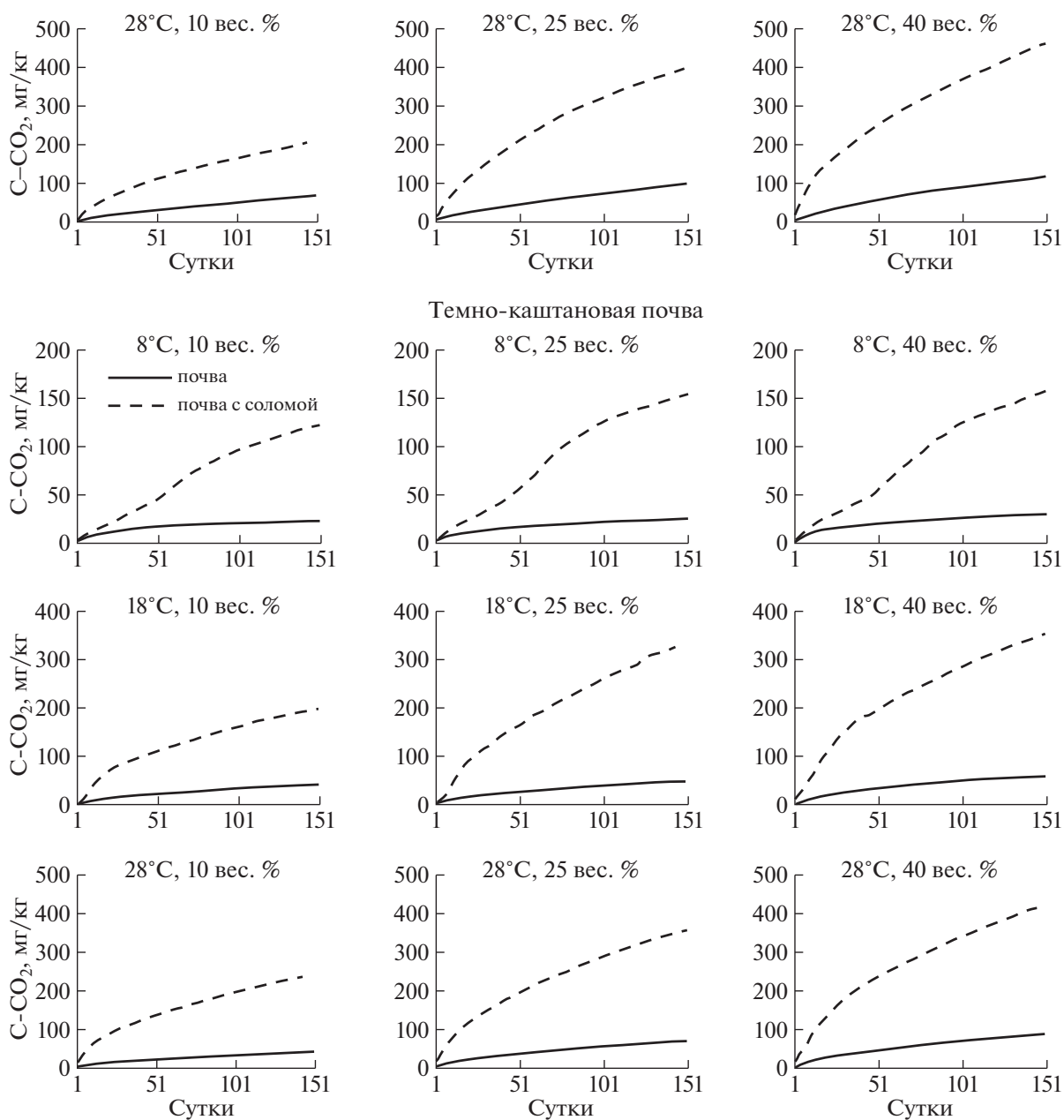


Рис. 2. Окончание.

минерализованного до $C-CO_2$ за 150 сут инкубации – лишь в 1.2 раза больше (рис. 1), тогда как при повышении увлажнения с 10 до 40 вес. % размер $C_{фм}$ увеличился в 1.8 раза, при повышении температуры с 8 до 28°C – в 2.6 раза, а при внесении соломы – в 4.4 раза в среднем в эксперименте.

Чувствительность минерализации органического вещества к изменению температуры на разных этапах инкубации значительно различалась. В почвах без соломы в первые 14 сут эксперимента коэффициент Q_{10} в интервале 8–28°C составил

1.26, в последние 14 сут – 2.22 в среднем для 3-х почв (табл. 1). В начале эксперимента преимущественно минерализовались наиболее доступные микроорганизмам и наименее термочувствительные соединения легко минерализуемой фракции минерализуемого пула почвенного органического вещества (**ПОВ**), тогда как в конце – менее доступные и более термочувствительные вещества трудно минерализуемой фракции. При внесении соломы, напротив, чувствительность минерализации к изменению температуры в начале эксперимента была больше ($Q_{10} = 2.28$), чем в конце

Таблица 2. Влажностные коэффициенты (W_{10}) фактической минерализации органического вещества в почвах без соломы и с соломой за первые и последние 2 нед инкубации и за весь период инкубации, рассчитанные для диапазона увлажнения 10–40 вес. %

Почва	Без соломы			С соломой		
	период оценки продуцирования С-СО ₂ , сут					
	0–14	137–150	0–150	0–14	137–150	0–150
Серая лесная	1.09	1.11	1.09	1.03	1.30	1.20
Чернозем оподзоленный	1.22	1.17	1.20	1.29	1.29	1.34
Темно-каштановая	1.17	1.16	1.17	1.11	1.19	1.18

Примечание. Приведены средние данные для 3-х температур.

($Q_{10} = 1.71$). Это объясняется наличием лаг-фаз (lag – задержка, запаздывание), обнаруженных в ходе минерализации при 8°C в почвах с соломой при анализе динамики продуцирования С-СО₂ (рис. 2). В среднем за 150 сут инкубации различий термочувствительности минерализации в почвах с соломой и без соломы выявить не удалось: коэффициенты Q_{10} составили 1.61 в среднем для 3-х почв.

Чувствительность минерализации к изменению влажности в почвах с соломой и без соломы в начале инкубации различалась несущественно, а с течением времени эти различия проявились (табл. 2). Величины влажностных коэффициентов W_{10} для интервала увлажнения 10–40 вес. % за весь период инкубации в почвах без соломы составили в среднем 1.15, а в почвах с соломой – 1.24, т.е. для обеспечения эффективной минерализации при внесении соломы возросла потребность в увлажнении.

Характеристика потенциально-минерализуемого органического вещества почв и соломы. Размер фактической минерализации указывал на суммарное количество углерода в составе СО₂, образовавшегося при минерализации органического вещества за определенное время. Вычисления, произведенные по методу биокинетического фракционирования, позволили определить размер пула потенциально-минерализуемого углерода и установить характеризующие его параметры: константу скорости минерализации, среднее время оборачиваемости и интенсивность минерализации. При оценке минерализации *ОВ* значение имеет не только размер минерализуемого пула, но и скорость, с которой минерализация происходит. Минерализуемый пул может быть “большим и медленным” или “небольшим, но быстрым”. Размеры потерь углерода из почв в виде СО₂ за время инкубации, определенные на газовом хроматографе, соотносились с расчетными

величинами пула $C_{\text{пм}}$, который был в среднем в 1.2 раза больше, чем $C_{\text{фм}}$.

В изученных почвах без соломы содержание $C_{\text{пм}}$ при 8°C практически не различалось, а повышение температуры инкубации выявило различия в пуле потенциально-минерализуемого углерода в почвах разных типов (табл. 3). В почвах с соломой, напротив, существенные различия наблюдали при 8°C: пул $C_{\text{пм}}$ темно-каштановой почвы был в 2–3 раза больше, а *ТТ* – в 3 раза продолжительнее, чем в серой лесной почве и черноземе, что объясняется наличием лаг-фаз различной продолжительности, тогда как повышение температуры эти различия нивелировало.

Влагоемкость соломы была в 2–3 раза больше влагоемкости почв, поэтому при 10%-м увлажнении минерализация соломы лимитировалась влажностью (табл. 4). При влажности 10 вес. % и 8°C $C_{\text{пм}}$ практически отсутствовал, а минерализация проходила с крайне низкой скоростью. При 18 и 28°C минерализуемый пул углерода соломы также был крайне мал, и фактически был представлен лишь легко минерализуемой фракцией, время оборачиваемости которой не превышало 10 сут. Коэффициент W_{10} в интервале увлажнения 10–40 вес. % составил в среднем 2.91. Для сравнения, W_{10} для легко- и трудно минерализуемых фракций изученных почв в этом диапазоне были равны в среднем 1.22 и 1.03 соответственно [17]. Дальнейшее повышение влажности не привело к значительным изменениям минерализации. В отсутствии лимитирования минерализации соломы влажностью (при 40, 80, 120 и 160%-ном увлажнении) ее скорость примерно соответствовала скорости разложения целлюлозного пула [11]. При 40%-ном увлажнении коэффициент Q_{10} в интервале 8–28°C был равен 1.80.

По доступности микроорганизмам фракции органического вещества изученных почв [17] и вносимой соломы можно расположить в ряд по

Таблица 3. Характеристика минерализуемого пула ($C_{\text{пм}}$) почв с соломой и без соломы при разных гидротермических условиях

Почва	Влажность, весовые %	8°C			18°C			28°C		
		мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$	ТТ, сут.	мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$	ТТ, сут.	мг/кг	% от $C_{\text{орг}}$	ТТ, сут.
Почва без соломы										
Серая лесная почва	10	251 ± 4	2.7	48	653 ± 11	7.1	99	731 ± 59	7.9	124
	25	357 ± 6	3.9	40	803 ± 20	8.7	122	820 ± 28	8.9	112
	40	333 ± 7	3.6	41	965 ± 22	10.5	150	883 ± 10	9.6	105
	Среднее	314	3.4	43	807	8.8	124	811	8.8	114
Чернозем оподзоленный	10	184 ± 1	0.7	38	731 ± 8	2.9	106	988 ± 43	4.0	141
	25	287 ± 3	1.1	39	953 ± 11	3.8	82	1360 ± 20	5.4	124
	40	321 ± 5	1.3	34	1070 ± 20	4.3	79	1480 ± 1	5.9	104
	Среднее	264	1.0	37	917	3.7	89	1270	5.1	123
Темно-каштановая почва	10	217 ± 1	1.9	32	480 ± 6	4.3	88	489 ± 3	4.4	86
	25	241 ± 2	2.2	41	533 ± 9	4.8	76	747 ± 31	6.7	72
	40	285 ± 3	2.5	38	648 ± 5	5.8	71	982 ± 2	8.8	78
	Среднее	248	2.2	37	554	4.9	78	739	6.6	79
Среднее		275 ± 57	2.2 ± 1.1	39 ± 5	759 ± 203	5.8 ± 2.5	97 ± 26	942 ± 310	6.8 ± 2.1	105 ± 23
Почва с соломой										
Серая лесная почва	10	1230 ± 20	9.3	68	1940 ± 50	14.7	57	1880 ± 10	14.3	51
	25	1690 ± 20	12.8	81	3520 ± 180	26.6	101	3160 ± 2	24.0	78
	40	1960 ± 50	14.9	96	4080 ± 150	30.9	115	4570 ± 100	34.6	101
	Среднее	1630	12.3	82	3180	24.1	91	3210	24.3	77
Чернозем оподзоленный	10	650 ± 13	2.2	93	1910 ± 80	6.6	70	2330 ± 30	8.0	78
	25	1390 ± 10	4.7	66	4140 ± 200	14.3	79	4560 ± 60	15.7	80
	40	1980 ± 3	6.8	129	4231 ± 190	14.6	71	4950 ± 40	17.1	69
	Среднее	1340	4.6	96	3430	11.8	73	3950	13.6	76
Темно-каштановая почва	10	2770 ± 50	18.2	246	2110 ± 50	13.9	67	2500 ± 10	16.4	61
	25	3700 ± 130	24.4	260	4180 ± 250	27.5	101	3880 ± 70	25.6	70
	40	4500 ± 330	29.6	330	3810 ± 110	25.0	69	4520 ± 40	29.7	68
	Среднее	3660	24.1	279	3370	22.2	79	3630	23.9	66
Среднее		2210 ± 1240	13.7 ± 9.2	152 ± 99	3320 ± 1030	19.4 ± 8.3	81 ± 20	3600 ± 1150	20.6 ± 8.4	73 ± 14

Примечание. ± — здесь и далее стандартное отклонение.

Таблица 4. Потенциально-минерализуемый углерод ($C_{\text{пм}}$) соломы без смешивания ее с почвами и время оборачиваемости (TT) в зависимости от температуры и влажности

Влажность, вес. %	8°C		18°C		28°C	
	$C_{\text{пм}}$, % от исходного	TT , сут	$C_{\text{пм}}$, % от исходного	TT , сут	$C_{\text{пм}}$, % от исходного	TT , сут
10	0.04 ± 0.02	184	0.43 ± 0.15	9	0.62 ± 0.07	7
40	4.98 ± 0.04	51	10.51 ± 0.39	27	16.05 ± 0.61	27
80	5.57 ± 0.07	49	11.47 ± 0.28	29	17.40 ± 0.77	29
120	5.87 ± 0.30	45	11.09 ± 0.51	33	16.29 ± 1.06	26
160	5.63 ± 0.39	48	10.07 ± 0.40	31	14.51 ± 1.14	23

убыванию: легко минерализуемая фракция ($TT < 10$ сут) > солома ($TT \approx 30$ сут) > трудно минерализуемая фракция ($TT = 100-1000$ сут), по чувствительности к повышению температуры в ряд по возрастанию: легко минерализуемая фракция ($Q_{10} = 0.91$) < солома ($Q_{10} = 1.80$) < трудно минерализуемая фракция ($Q_{10} = 2.40$), т.е., чем пул углерода доступнее микроорганизмам, тем он менее термочувствителен, и, наоборот, чем углеродный пул устойчивее к микробному разложению, тем его термочувствительность выше. Солома характеризовалась средней термочувствительностью и средней доступностью микроорганизмам.

Продуцирование CO_2 характеризует минерализацию всех органических соединений, присутствующих в почве, а их вклад в общий поток диоксида углерода может меняться с течением времени и зависит от факторов, лимитирующих минерализацию. Запаздывание минерализации, проявившееся в обнаруженных лаг-фазах, в почвах с соломой при температуре 8°C могло происходить из-за того, что в начале инкубации минерализовалась преимущественно легко минерализуемая фракция ПОВ, наименее чувствительная к температуре и наиболее доступная для микробного разложения, а активизация минерализации соломы запаздывала тем значительнее, чем больше в почве содержалось легко минерализуемой фракции, данные о размере которой приведены в нашей предыдущей работе [20]. Следует отметить, что при сравнении интенсивности минерализации ($C_{\text{пм}}k$) существенных различий между почвами разных типов не выявлено.

Внесение соломы увеличивало исходное содержание $C_{\text{орг}}$ в серой лесной почве на 44%, в черноземе – на 16%, в темно-каштановой почве – на 36% и увеличило долю потенциально-минерализуемого углерода в общем органическом углероде этих почв в среднем в эксперименте с 7 до 20, с 3 до 10, с 5 до 23% соответственно. К концу инкубации солома минерализовалась на 21–74% в серой

лесной почве, на 9–87% – в черноземе и на 25–84% – в темно-каштановой почве. Минерализация соломы вне почв не превышала 17%, поскольку она лимитировалась минеральным азотом, количество которого в соломе с течением времени инкубации истощалось, тогда как при минерализации соломы в почвах микроорганизмам были доступны почвенные источники азота.

При внесении соломы не только многократно увеличивался минерализуемый пул органического вещества в почвах, но и изменялась скорость минерализации, что отчетливо проявилось в разных условиях инкубации. Если в почвах без соломы при 8°C минерализовались наиболее доступные и наименее термочувствительные соединения, на что указывало короткое TT (39 ± 5 сут), то по мере увеличения температуры TT становилось почти в 3 раза продолжительнее, что свидетельствовало о включении в процесс минерализации менее доступных микроорганизмам и более термочувствительных органических веществ в составе ПОВ. При внесении соломы, напротив, при 8°C TT в среднем составило 152 ± 99 сут, а при повышении температуры инкубации среднее время оборачиваемости сокращалось в 2 раза. В почве без соломы минерализовались вещества различного генезиса, защищенности, доступности микроорганизмам, обладающие разной термочувствительностью. В почве с соломой основной вклад в минерализацию принадлежал свежесенной соломе, представляющей собой незащищенный, относительно гомогенный углеродсодержащий субстрат со средней доступностью микроорганизмам и средней термочувствительностью, поэтому повышение температуры вполне закономерно увеличило скорость ее минерализации. Весьма продолжительные TT , отмеченные в ходе инкубации почв с соломой при 8°C, были связаны с вышеописанными лаг-фазами, которые составили от 2–3 нед в серой лесной почве и

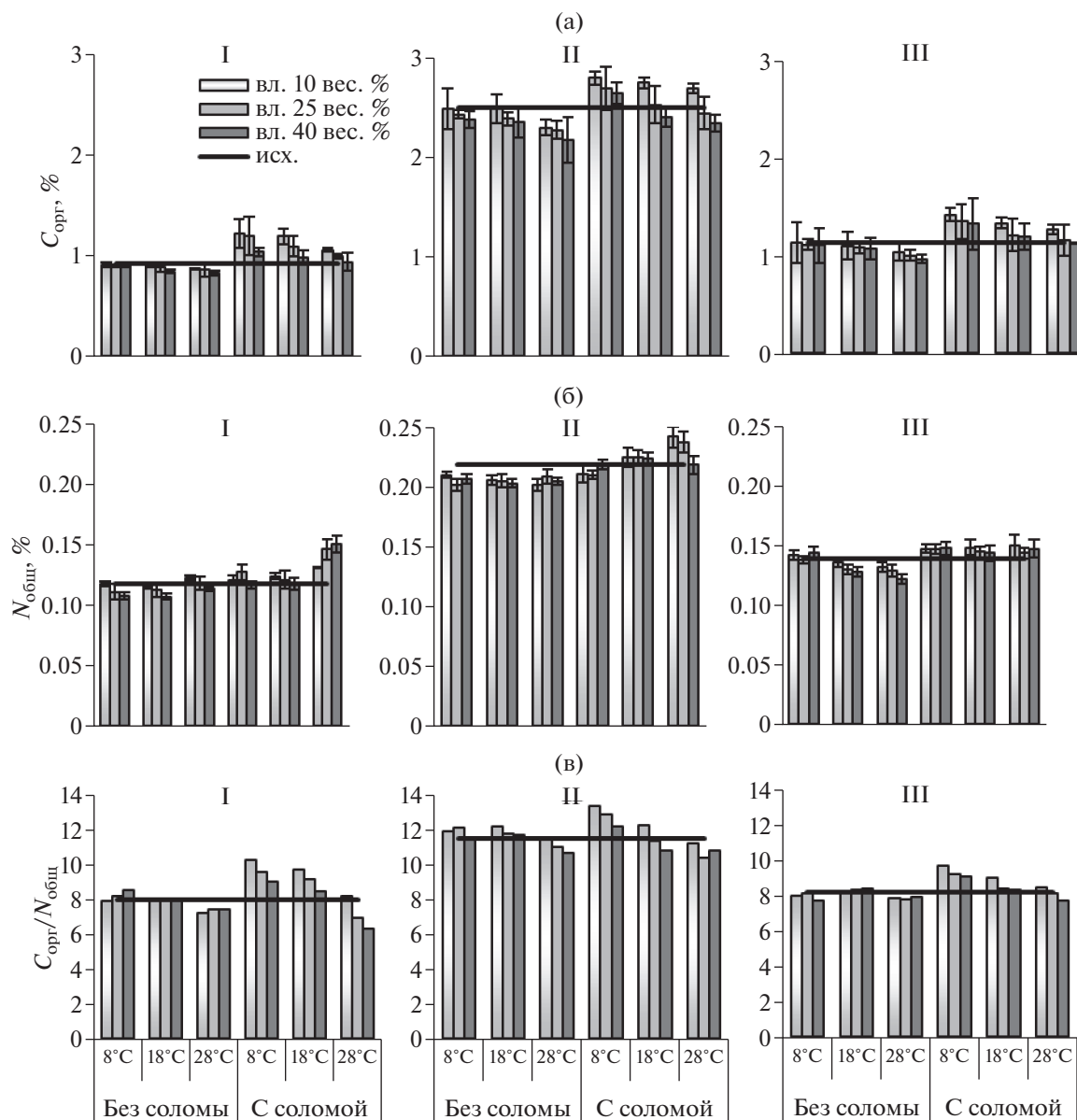


Рис 3. Содержание: (а) — общего органического углерода ($C_{орг}$), (б) — общего азота ($N_{общ}$), (в) — их соотношение ($C_{орг} : N_{общ}$) в исходных образцах (исх.) серой лесной почвы (I), оподзоленного чернозема (II), темно-каштановой почвы (III) и после 150 сут инкубации без соломы и с соломой при разных гидротермических условиях.

оподзоленном черноземе до 6 нед в темно-каштановой почве.

Содержание $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в почве. Чем интенсивнее проходила минерализация *ОВ*, тем меньше содержалось в почвах общего органического углерода через 150 сут, как показали данные, полученные на CHNS-анализаторе (рис. 3). В вариантах без внесения соломы убыль содержания $C_{орг}$ в разных гидротермических условиях составила в среднем для 3-х почв от 2 до 11% от исходного его количества. Внесение соломы, не смотря на большие газообразные потери углерода при ее мине-

рализации, позволило компенсировать потери $C_{орг}$ в течение инкубации при температуре 28°C и увеличить его содержание на конец инкубации при температуре 18°C и 8°C по сравнению с исходным его количеством в почвах.

Содержание общего азота в почвах в результате инкубации изменялось в меньшей степени, чем содержание общего органического углерода. Применение соломы увеличило пул $N_{общ}$ в среднем на 5%, а повышение температуры и влажности сказалось на содержании $N_{общ}$ не столь существенно. Соотношение $C_{орг} : N_{общ}$ в почвах при

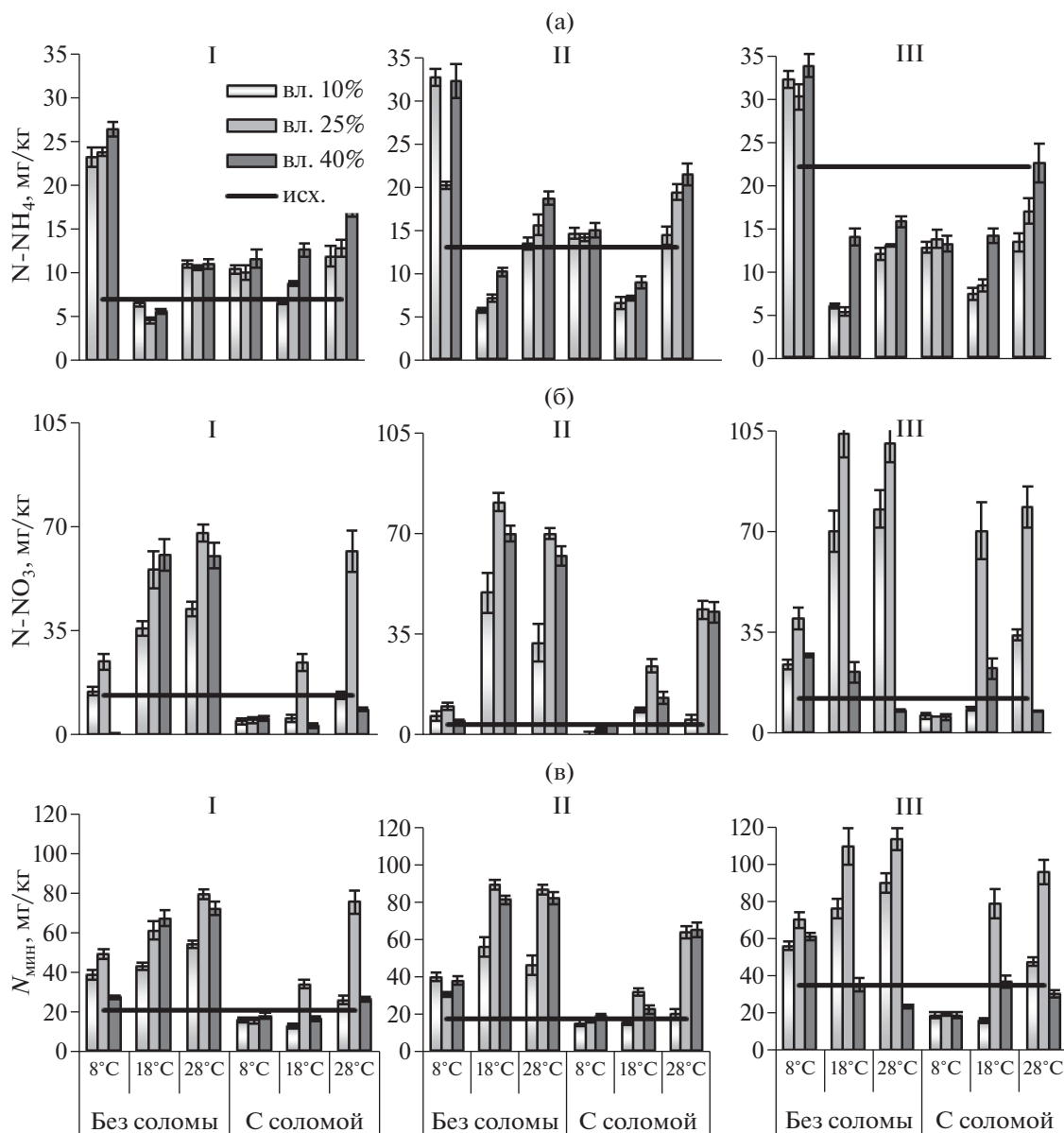


Рис. 4. Содержание: (а) – обменного аммония ($N-NH_4$), (б) – нитратного азота ($N-NO_3$), (в) – их суммы ($N_{мин}$) в исходных образцах (исх.) серой лесной почвы (I), оподзоленного чернозема (II), темно-каштановой почвы (III) и после 150 сут инкубации без соломы и с соломой при разных гидротермических условиях.

повышении температуры и влажности инкубации значительно уменьшалось, внесение соломы расширяло это соотношение, причем гидротермические условия оказывали большее влияние на изменение соотношения $C_{орг} : N_{общ}$, чем внесение соломы. О преобладании потерь углерода над потерями азота в результате продолжительной инкубации в разных гидротермических условиях также свидетельствовали результаты других авторов [21].

Минеральный азот в почве. В отличие от $N_{общ}$, содержание $N_{мин}$ в почвах к концу эксперимента

изменялось весьма значительно (рис. 4). Доля минерального азота в пуле общего азота через 150 сут составила в вариантах без внесения соломы: в серой лесной почве – 3–6%, в оподзоленном черноземе – 2–4%, темно-каштановой почве – 4–8%, при внесении соломы: 1–2, 1–3, 1–6% соответственно.

Изменение содержания минерального азота в почвах зависело от одновременно проходящих разнонаправленных процессов – минерализации и иммобилизации. Если минерализация шла быстрее, чем иммобилизация, то наблюдали уве-

личение содержания $N_{\text{мин}}$ по сравнению с исходным содержанием минерального азота в почве, или нетто-минерализацию, если иммобилизация проходила быстрее, чем минерализация, то отмечали убыль содержания $N_{\text{мин}}$ в почве по сравнению с его исходным содержанием, или нетто-иммобилизацию. Следует подчеркнуть, что в настоящей статье оценили результирующую величину процессов минерализации и иммобилизации, каковой является нетто-величина изменения $N_{\text{мин}}$, а реальную интенсивность этих 2-х процессов можно оценить лишь при помощи изотопной индикации. Размер нетто-минерализации (накопления в почве $N_{\text{мин}}$ в отсутствие растений) характеризует потенциальную доступность растениям азота почвы [22, 23], поэтому накопление в почвах $N_{\text{мин}}$ оценивали за время, сопоставимое с продолжительностью вегетационного периода.

Накопление минерального азота в почвах больше зависело от температуры, при которой осуществлялась инкубация, чем от влажности и внесения соломы. Прямая зависимость нетто-минерализации азота от температуры почвы установлена также в полевых условиях [24]. Нетто-минерализация в почвах без соломы при 8 и 28°C составила в среднем в серой лесной почве 90 и 230% от исходного содержания $N_{\text{мин}}$, в черноземе – 100 и 330%, в темно-каштановой почве – 70 и 110%, т.е. в результате минерализации при 8°C высвободилось в 2 раза больше доступного растениям азота, чем можно судить по его содержанию в исходных образцах почвы, а при 28°C – до 4-х раз больше.

Накопление в почве $N_{\text{мин}}$ при увеличении влажности изменялось нелинейно. При оптимальном увлажнении (25 вес. %) в почвах накапливалось в среднем в 1.5 раза больше $N_{\text{мин}}$, чем при недостаточном (10 вес. %) и избыточном (40 вес. %) увлажнении. Недостаточное увлажнение могло подавлять микробные процессы в почве, избыточное – усиливать газообразные потери минерального азота, что подтверждено убылью пула общего азота.

Уменьшение активности минерализации органических азотсодержащих соединений почвы может быть одной из причин снижения урожайности сельскохозяйственных культур в холодные и (или) засушливые годы из-за ухудшения условий азотного питания растений. Применение азотных удобрений уменьшает климатические риски при возделывании зерновых культур [25], что может быть связано с восполнением дефицита азота, минерализуемого из почвенного органического

вещества с меньшей скоростью при неблагоприятных гидротермических условиях.

В почвах с соломой при 8°C наблюдали нетто-иммобилизацию азота, которая в серой лесной почве составила 30, черноземе – 10, темно-каштановой почве – 50% от исходного $N_{\text{мин}}$, тогда как при 18 и 28°C имела место нетто-минерализация, которая была наибольшей при увлажнении 25 вес. %, достигая соответственно 70 и 270% в серой лесной почве, 90 и 280% – в черноземе, 130 и 170% – в темно-каштановой почве. Иммобилизованный на ранних этапах инкубации азот подвергался повторной минерализации (реминерализации), а минерализация азота более чувствительна к температуре, чем иммобилизация. В среднем в опыте, в вариантах с применением соломы в почвах накапливалось $N_{\text{мин}}$ на 30 мг/кг меньше, чем в почвах без соломы.

Микробная иммобилизация содержащегося в почве минерального азота при применении соломы может привести к снижению урожайности культур, что наиболее вероятно при ее внесении незадолго перед началом активной вегетации растений. Максимальная иммобилизация, как правило, происходит в первый месяц после внесения соломы, а затем возможна его повторная минерализация [14]. Чтобы синхронизировать превращения азота в почве и его потребление растениями, важно не столько ограничить иммобилизацию азота, сколько обеспечить его реминерализацию [2]. Повторной минерализации азота способствует повышение температуры. Как показали результаты, полученные в полевых опытах, внесение соломы осенью после уборки урожая не привело к снижению урожайности культур, выращенных на следующий год на черноземах [26, 27], и повышало ее на дерново-подзолистой почве [28], что можно отчасти объяснить реминерализацией ранее иммобилизованного азота.

Известно, что чем больше в почве содержится нитратов, тем выше риск потерь азота из почвы, как газообразных, так и инфильтрационных. Наши результаты показали, что соотношение нитратов и обменного аммония зависело от гидротермических условий, при этом содержание аммонийного азота изменялось менее значительно, чем содержание нитратного. В результате инкубации при 8°C в пуле минерального азота преобладал аммонийный азот, а при 18 и 28°C – нитратный. Содержание $N\text{-NO}_3$ в почвах увеличилось в диапазоне увлажнения 10–25 вес. % и уменьшилось в диапазоне 25–40 вес. %. Относительно небольшую долю $N\text{-NO}_3$ в $N_{\text{мин}}$ при недостаточном

увлажнении можно объяснить невысокой скоростью нитрификации, а снижение содержания $N-NO_3$ при избыточном увлажнении – усилением денитрификации. Внесение соломы снижало долю нитратного азота в пуле минерального азота. Следовательно, повышение температуры и влажности в отсутствие вегетирующих растений способствовало увеличению риска потерь азота из почвы, а внесение соломы было эффективным способом биологического связывания минерального азота в почве, который способствует уменьшению потерь азота и не препятствовал повторной минерализации органических азотсодержащих соединений.

Соотношение количества $C-CO_2$, продуцированного почвами за 150 сут и содержания минерального азота к концу основной инкубации ($C_{фм} : N_{мин}$) в почвах без соломы в среднем составило 10. Внесение соломы способствовало расширению соотношения $C_{фм} : N_{мин}$ до 82 как за счет увеличения минерализации органических углеродсодержащих соединений, так и за счет усиления иммобилизации $N_{мин}$ органотрофными микроорганизмами. Это согласовалось с выводом о том, что продуцирование почвой CO_2 более объективно отражает минерализационно-иммобилизационный цикл азота в целом, а не отдельные слагающие его процессы [29].

Влияние длительной инкубации почвы на микробный пул углерода. Почвенные микроорганизмы, использующие $C_{орг}$ в качестве источника энергии и питания, выступают главным биотическим агентом трансформации органического вещества, а микробная биомасса является основным компонентом минерализуемого пула ПОВ [30]. В нашем эксперименте в результате повышения температуры и влажности основной инкубации содержание микробной биомассы при повторной инкубации уменьшилось, а внесение соломы увеличило долю $C_{мб}$ в $C_{орг}$ с 1–2 до 2–4% (табл. 5). Практически двукратное увеличение микробного пула в результате внесения соломы было отмечено нами ранее и для почв, отобранных в полевых опытах [31].

Коэффициент qCO_2 может служить для оценки устойчивости микробного сообщества, а значит и почвы в целом, к различным воздействиям [32], а также быть индикатором состояния почвы как биологического объекта [33]. Предполагается, что чем меньше величина qCO_2 , тем устойчивее данное сообщество микроорганизмов. Наши результаты показали, что длительное предшествовавшее воздействие температуры и влажности привело к снижению qCO_2 при повторной ин-

кубации, а внесение соломы – к повышению этих коэффициентов, т.е. чем выше была температура и влажность основной инкубации, тем устойчивее было в последующем микробное сообщество, а внесение соломы приводило к обратному результату.

Размер и устойчивость микробного пула может зависеть от доступности микроорганизмам углерода и азота. Как показали наши результаты, чем выше была температура и влажность на протяжении основной инкубации, тем активнее расходовался минерализуемый пул углерода, и тем больше в почвах накапливалось минерального азота. В результате внесения соломы, напротив, количество доступного микроорганизмам углеродного субстрата увеличивалось, а содержание $N_{мин}$ уменьшалось. Доступность микроорганизмам углерода и азота сказалась на размере микробного пула и величинах дыхательного коэффициента qCO_2 .

После инкубации почв без соломы при 28°C и увлажнении 40 вес. % содержание в почвах $C_{мб}$ при повторной инкубации было самым низким в опыте и в среднем для 3-х почв составило 182 мг/кг, qCO_2 был наименьшим, равняясь 0.92, т.е. истощение пула доступного углерода привело к уменьшению микробной биомассы, а накопление доступного азота способствовало созданию благоприятных, “комфортных” условий для микроорганизмов. После инкубации почв с соломой при 8°C и влажности 10 вес. %, напротив, содержание $C_{мб}$ было наибольшим и составило в среднем 393 мг/кг, qCO_2 был самым высоким, равняясь 3.90. В таких гидротермических условиях солома в почвах разлагалась лишь на 9–25% от внесенной дозы, а в ходе повторной инкубации в условиях, не лимитирующих минерализацию (22°C и влажности 25 вес. %), неразложившаяся ранее солома активно минерализовалась, что привело к увеличению микробной биомассы. Крайне низкое содержание $N_{мин}$ и качество углеродного субстрата, представленного в основном соломой, способствовали созданию “некомфортных”, стрессовых условий для микробного сообщества в этих вариантах опыта.

Оценка вклада температуры, влажности и внесения соломы в изменчивость почвенных пулов углерода и азота. Установлено, что наиболее значимым фактором, определяющим изменчивость пулов общего, потенциально-минерализуемого и микробного углерода и общего азота было внесение соломы в дозе 1% от массы почвы (табл. 6). Изменчивость пула минерального азота, микробный метаболический коэффициент и соотноше-

Таблица 5. Характеристика микробного пула почв ($C_{мб}$) после 150 сут инкубации без соломы и с соломой при разных температуре и влажности

Почва	Влажность основной инкубации, весовые %	Температура основной инкубации											
		8°C				18°C				28°C			
		$C_{мб}$		qCO_2 , мг С- CO_2 в час/г $C_{мб}$		$C_{мб}$		qCO_2 , мг С- CO_2 в час/г $C_{мб}$		$C_{мб}$		qCO_2 , мг С- CO_2 в час/г $C_{мб}$	
мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$		
Почва без соломы													
Серая лесная почва	10	254 ± 1	2.8	1.96	225 ± 4	2.5	1.51	270 ± 20	3.1	0.91			
	25	177 ± 10	2.0	2.52	228 ± 9	2.6	0.97	227 ± 3	2.6	0.78			
Чернозем оподзоленный	40	180 ± 12	2.0	2.38	220 ± 8	2.6	0.93	183 ± 6	2.2	0.63			
	Среднее	204	2.3	2.29	224	2.6	1.14	227	2.7	0.77			
Темно-каштановая почва	10	228 ± 7	0.9	2.71	268 ± 5	1.1	1.88	266 ± 3	1.2	1.09			
	25	250 ± 1	1.0	1.84	234 ± 12	1.0	1.32	207 ± 1	0.9	0.92			
Среднее	40	234 ± 4	1.0	1.66	238 ± 5	1.0	1.10	179 ± 4	0.8	0.91			
	Среднее	237	1.0	2.07	247	1.0	1.43	217	1.0	0.97			
Среднее	10	345 ± 1	3.1	1.32	219 ± 1	2.0	2.25	328 ± 3	3.2	1.07			
	25	234 ± 6	2.1	1.39	272 ± 5	2.5	1.02	229 ± 14	2.3	1.11			
Среднее	40	226 ± 3	2.1	1.62	239 ± 2	2.3	1.18	184 ± 19	1.9	1.23			
	Среднее	268	2.4	1.44	243	2.3	1.48	247	2.5	1.14			
Среднее	10	236	1.9	1.93	238	2.0	1.35	230	2.0	0.96			
	Среднее	236	1.9	1.93	238	2.0	1.35	230	2.0	0.96			
Почва с соломой													
Серая лесная почва	10	351 ± 10	2.9	3.70	432 ± 5	3.6	1.27	440 ± 9	4.2	1.01			
	25	459 ± 18	3.8	1.87	407 ± 30	3.7	0.56	286 ± 15	2.9	0.62			
Чернозем оподзоленный	40	450 ± 4	4.3	1.68	407 ± 5	4.2	0.65	307 ± 0	3.3	0.65			
	Среднее	420	3.7	2.42	415	3.8	0.83	344	3.4	0.76			
Темно-каштановая почва	10	343 ± 1	1.2	4.56	359 ± 5	1.3	1.52	463 ± 1	1.7	1.15			
	25	438 ± 8	1.6	1.76	440 ± 4	1.7	1.24	337 ± 11	1.4	0.89			
Среднее	40	380 ± 13	1.4	2.10	395 ± 16	1.6	1.12	239 ± 1	1.0	0.89			
	Среднее	387	1.4	2.81	398	1.6	1.29	346	1.4	0.98			
Среднее	10	486 ± 13	3.5	3.45	599 ± 2	4.5	1.16	279 ± 2	2.2	0.99			
	25	506 ± 12	3.8	1.71	469 ± 11	3.9	1.00	302 ± 5	2.6	0.95			
Среднее	40	516 ± 1	3.9	1.86	400 ± 3	3.4	1.31	335 ± 7	3.0	0.77			
	Среднее	502	3.7	2.34	489	3.9	1.16	305	2.6	0.90			
Среднее	10	437	2.9	2.52	434	3.1	1.09	332	2.5	0.88			
	Среднее	437	2.9	2.52	434	3.1	1.09	332	2.5	0.88			

Таблица 6. Вклад изученных факторов (температуры, влажности и внесения соломы) в изменчивость пулов углерода и азота в почвах, %

Показатель пулов углерода или азота	$T, ^\circ\text{C}$	Влажность, вес. %	Внесение соломы
$C_{\text{орг}}$, мг/кг	20.0 (–1.07)	7.8 (–1.05)	47.9 (+1.13)
$N_{\text{общ}}$, мг/кг	17.8 (+1.02)	1.5 (–1.01)	44.7 (+1.10)
$C_{\text{орг}} : N_{\text{общ}}$	43.2 (–1.13)	11.6 (–1.06)	19.7 (+1.08)
$C_{\text{пм}}$, мг/кг	16.4 (+1.79)	12.7 (+1.88)	56.2 (+4.71)
$C_{\text{мб}}$, мг/кг	7.7 (–1.16)	17.6 (–1.31)	52.0 (+1.61)
$q\text{CO}_2$, мг $\text{C-CO}_2/\text{ч}/\text{г } C_{\text{мб}}$	55.6 (–2.57)	10.1 (–1.46)	5.5 (+1.30)
N-NH_4 , мг/кг (вл. 10–25 вес. %)	28.7 (–1.47)	0.9 (+1.01)	25.7 (–1.48)
N-NH_4 , мг/кг (вл. 25–40 вес. %)	11.3 (–1.25)	8.2 (+1.19)	17.2 (–1.34)
N-NO_3 , мг/кг (вл. 10–25 вес. %)	65.0 (+4.42)	9.5 (+1.96)	19.3 (–1.97)
N-NO_3 , мг/кг (вл. 25–40 вес. %)	54.3 (+4.59)	18.8 (–2.16)	8.6 (–1.76)
$N_{\text{мин}}$, мг/кг (вл. 10–25 вес. %)	40.3 (+2.09)	13.4 (+1.54)	25.2 (–1.77)
$N_{\text{мин}}$, мг/кг (вл. 25–40 вес. %)	49.6 (+2.11)	16.7 (–1.50)	15.8 (–1.59)

Примечания. 1. В скобках указана кратность изменения (раз), (+) – увеличение, (–) – уменьшение. 2. Изменения минеральных пулов азота представлены для диапазонов увлажнения 10–25 и 25–40 вес. %, поскольку в первом диапазоне этот пул увеличивался, а во втором – уменьшался.

ние $C_{\text{орг}} : N_{\text{общ}}$ определялись повышением температуры основной инкубации с 8 до 28°C. Вклад влажности в изменчивость изученных показателей не был определяющим в условиях обсуждаемого эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минерализация органического вещества в почвах 3-х типов больше зависела от внесения соломы и от гидротермических условий, в которых проходила инкубация, чем от содержания $C_{\text{орг}}$ в почвах (0.9–2.5%). По влиянию на минерализацию изученные факторы образовывали следующий ряд: внесение соломы (1% от массы почвы) > температура (8–28°C) > влажность (10–40 вес. %). Различия скорости минерализации и зависимости ее от температуры на разных этапах 150-суточной инкубации можно объяснить преимущественным использованием микроорганизмами наиболее доступного и наименее термочувствительного субстрата, по мере расходования которого возрастает вклад в продуцирование CO_2 менее доступных и более термочувствительных соединений.

Вклад температуры, влажности и внесения соломы в изменчивость размера потенциально-минерализуемого пула углерода составил соответственно 16, 13 и 56% в среднем в опыте. Внесение соломы увеличило содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах в начале инкубации в 1.2–1.4 раза, долю $C_{\text{пм}}$ в $C_{\text{орг}}$ – в

3–5 раз. За 150 сут инкубации в почвах в разных гидротермических условиях минерализовалось от 9–25 до 74–87% внесенной соломы. Вклад внесения соломы в изменчивость $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ в конце инкубации также был наибольшим из изученных факторов, однако абсолютное увеличение этих пулов было незначительным. Чем выше была температура и влажность, тем меньше становилось соотношение $C_{\text{орг}} : N_{\text{общ}}$ в почвах через 150 сут инкубации.

Основным фактором, влияющим на изменчивость пула минерального азота в почвах, являлась температура. За 150 сут при 18 и 28°C в почвах в среднем в опыте накопилось в 2 раза больше $N_{\text{мин}}$, чем при 8°, при 25%-ном увлажнении – в 1.5 раза больше, чем при увлажнении 10 и 40 вес.%. Уменьшение активности минерализации органических азотсодержащих соединений почвы может быть одной из причин снижения урожайности сельскохозяйственных культур в холодные и (или) засушливые годы из-за ухудшения условий азотного питания растений. Повышение температуры способствовало повторной минерализации азота, иммобилизованного при внесении соломы.

Изменение доступности углерода и азота в результате 150-суточной инкубации почвенных образцов с внесением и без внесения соломы в разных гидротермических условиях сказалось на размере микробного пула и величине дыхатель-

ного коэффициента qCO_2 , которые были установлены в ходе повторной инкубации при одинаковой температуре и влажности. Размер микробной биомассы зависел от доступности микроорганизмам углерода, а создание благоприятных, “комфортных” условий для микроорганизмов было связано с содержанием минерального азота в почве.

Благодарность. Изучение почвенных пулов углерода проведено при поддержке РФФИ, грант №17-04-00707_а, почвенных пулов азота — при поддержке государственного задания рег. № АААА-А18-118013190177-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233.
2. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. № 7. С. 63–81.
3. Русакова И.В. Теоретические основы и методы управления плодородием почв при использовании растительных остатков в земледелии. Иваново: Издательско-полиграфический комплекс “Пресс-Сто”, 2016. 131 с.
4. Чуян Н.А., Чуян О.Г., Брескина Г.М. Агрофизические показатели чернозема типичного в условиях использования побочной продукции на удобрение при разных уровнях удобренности // Достиж. науки и техн. АПК. 2013. № 2. С. 3–5.
5. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Tillage Res. 2004. V. 79. № 1. P. 7–31.
6. Серая Т.М., Богатырева Е.Н., Бирюкова О.М., Мезенцева Е.Г. Высвобождение элементов питания при заделке соломы в дерново-подзолистые почвы в зависимости от ее видового состава и удобрения азотом // Агрохимия. 2013. № 3. С. 52–59.
7. Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В., Шепелев А.Г. Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 4. С. 473–479.
8. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Иванникова Л.А., Семенова Н.А., Лисова Е.П. Участие растительной биомассы в формировании активной фазы почвенного азота // Агрохимия. 2001. № 7. С. 5–12.
9. Русакова И.В. Биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы при длительном использовании соломы на удобрение // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1485–1493.
10. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Ходжаева А.К., Семенова Н.А., Кудеяров В.Н. Почвенная эмиссия закиси азота: влияние природных и агрогенных факторов // Агрохимия. 2004. № 1. С. 30–39.
11. Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. № 2. P. 255–266.
12. Jensen L.S., Mueller T., Magid J., Nielsen N.E. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field // Soil Biol. Biochem. 1997. V. 29. № 7. P. 1043–1055.
13. Korsaeath A., Henriksen T.M., Bakken L.R. Temporal changes in mineralization and immobilization of N during degradation of plant material: implications for the plant N supply and nitrogen losses // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. № 6. P. 789–799.
14. Использование соломы как органического удобрения / Под ред. Мишустина Е.Н. М.: Наука, 1980. 270 с.
15. Семенов В.М., Семенов А.М., Ван Бругген А.Х., Феррис Х., Кузнецова Т.В. Трансформация азота почвы и растительных остатков сообществом микроорганизмов и микроскопических животных // Агрохимия. 2002. № 1. С. 5–11.
16. Recous S., Robin D., Darwis D., Mary B. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition // Soil Biol. Biochem. 1995. V. 27. № 12. P. 1529–1533.
17. Тулина А.С., Семенов В.М. Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению температуры и влажности // Почвоведение. 2015. № 8. С. 952–962.
18. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
19. Anderson T.-H., Domsch K.H. Maintenance requirements of actively metabolizing microbial populations under in situ conditions // Soil Biol. Biochem. 1985. V. 17. № 2. P. 197–203.
20. Тулина А.С., Семенов В.М., Розанова Л.Н., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А. Влияние влажности на стабильность органического вещества почв и растительных остатков // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1333–1340.
21. Ларионова А.А., Мальцева А.Н., Лонес де Гереню В.О., Квиткина А.К., Быховец С.С., Золотарева Б.Н., Кудеяров В.Н. Влияние температуры и влажности на минерализацию и гумификацию листовного опада в модельном инкубационном эксперименте // Почвоведение. 2017. № 4. С. 438–448.
22. Andersen M.K., Jensen L.S. Low soil temperature effects on short-term gross N mineralization-immobilization turnover after incorporation of a green manure // Soil Biol. Biochem. 2001. V. 33. P. 511–521.
23. Brye K.R., Norman J.M., Nordheim E.V., Gower S.T., Bundy L.G. Refinements to an in-situ soil core technique for measuring net nitrogen mineralization in moist, fertilized agricultural soil // Agron. J. 2002. V. 94. P. 864–869.
24. Кузякова И.Ф., Штар К. Изучение динамики нетто-минерализации азота в катене на лессовидных отложениях с помощью анализа временных рядов // Почвоведение. 2006. С. 443–449.
25. Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В. Оценка климатических рисков при возделывании

- зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов Геосети // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 77–86.
26. Колсанов Г.В. Солома как удобрение в зернопашном севообороте на черноземе лесостепи Поволжья // *Агрохимия*. 2006. № 5. С. 30–40.
 27. Шарков И.Н., Колбин С.А., Прозоров А.С., Самохвалова Л.М. Плодородие чернозема выщелоченного и урожайность яровой пшеницы при многолетнем удалении соломы с поля в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 12–18.
 28. Серая Т.М., Богатырева Е.Н., Кирдун Т.М., Бирюкова О.М., Белявская Ю.А., Торчило М.М. Влияние заправки побочной продукции и минеральных удобрений на продуктивность звена севооборота и агрохимические показатели дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрохимия*. 2015. № 11. С. 32–38.
 29. Кузнецова Т.В., Тулина А.С., Розанова Л.Н., Семенов В.М., Кудяров В.Н. О сопряженности процессов метаболизма углерода и азота в почве // *Почвоведение*. 1998. № 7. С. 832–839.
 30. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // *Агрохимия*. 2011. № 12. С. 53–63.
 31. Семенов В.М., Козут Б.М., Лукин С.М., Шарков И.Н., Русакова И.В., Тулина А.С., Лазарев В.И. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов // *Агрохимия*. 2013. № 3. С. 19–31.
 32. Anderson T.-H., Domsch K.H. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories // *Soil Biol. Biochem.* 1990. V. 22. № 2. P. 251–255.
 33. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С. Пространственное и временное варьирование микробного метаболического коэффициента в почвах // *Почвоведение*. 2002. № 10. С. 1233–1241.

Effects of Temperature, Moisture and Straw Incorporation on Organic Matter Mineralization Dynamics and Soil Carbon and Nitrogen Pools

A.S. Tulina

*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS
ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

E-mail: atulina@yandex.ru

Effects of temperature (8, 18 and 28°C), moisture (10, 25 and 40 weight %) and mature wheat straw incorporation (1% of soil mass) on dynamics of C-CO₂ production by samples of three arable soils during 150-day-long incubation are studied. Most significant factor of variability of Total Organic, Potentially-Mineralizable, Microbial Carbon pools and Total Nitrogen pool was straw incorporation. Variability of Mineral Nitrogen pool was determined by temperature. By the end of the experiment under temperature of 18 and 28°C soils accumulated in 2 times more Mineral Nitrogen than under 8°C, and under moisture of 25 weight % – in 1.5 times more than under moisture of 10 and 40 weight %. In soils with straw incubated under 8°C Nitrogen net-immobilization was discovered while in those incubated under 18 and 28°C Nitrogen net-mineralization was found out.

Key words: temperature, moisture, straw, incorporation, organic matter, mineralization dynamics, soil carbon and nitrogen pools.