

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ЛУГОВО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ СТЕПНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВАХ И В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

Н. Ю. Кулакова

Институт лесоведения РАН, Россия

Поступила в редакцию 1 августа 2012 г.

Аннотация: Показано, что в полупустынной зоне процессы аккумуляции органического углерода и общего азота под лесной и под травянистой растительностью имеют различную интенсивность в разных почвенных горизонтах. Под лесными насаждениями разного породного состава, созданными в 50-е годы 20 века в глинистой полупустыне Северного Прикаспия на месте нативных степных биоценозов, увеличиваются запасы этих элементов в подстилке (в 1,6-6,6 раза) и уменьшаются в слое 0-40(60) см на 20-35 % относительно степных почв. Размах колебаний зависит от видового состава насаждений. Подстилки оказывают существенное влияние на формирование запасов нитратного азота в почвенном профиле весной, служат источником питательных веществ в условиях неравномерного увлажнения почвенного профиля в сухой период года.

Ключевые слова: распределение С и N в почве, полупустынная зона, лесные насаждения.

Abstract: It is shown that in the semi-desert area processes of accumulation of organic carbon and total nitrogen under forest and grass vegetation occur with varying degrees of intensity in different soil horizons. The reserves of organic carbon and nitrogen in the litter increase in 1,6-6,6 times and decrease in the layer 0-40 (60) cm by 20-35 % in relation to the steppe soils under forest stands of different species composition, made in the 50s of the 20th century in the clay semi-desert of the Northern Caspian in the place of native steppe biocenosis. The amplitude depends on the species composition of the planting. The litters have a significant influence on the formation of nitrate nitrogen reserves in the soil profile in spring. They also act as a source of nutrients in terms of irregular moistening of the soil profile in the dry season.

Key words: distribution of carbon and nitrogen in the soil, semi-desert zone, forest plantations.

Аккумуляция углерода и азота в почве – основной процесс, определяющий ее биологическую продуктивность и важный фактор, влияющий на долговечность и устойчивость лесных насаждений в аридных условиях [9]. Рассматриваемые в работе лесные экосистемы были созданы на месте естественных степных биогеоценозов, существующих в полупустынной зоне в мезопонижениях рельефа за счет образования линзы незасоленных грунтовых вод, пополняемой при снеготаянии [11]. Исследовались лугово-каштановые почвы мезопонижений под естественной степной растительностью и под искусственными 60-летними насаждениями *Quercus robur L.*, *Pinus sylvestris L.*, *Cotinus coggygria Scop.*, *Acer tataricum L.*

В литературе содержится большое количество информации об изменении запасов С и N при пре-
вращении пахотных почв в залежь и при распаш-

ке лесных или степных почв. Увеличение запасов С было обнаружено в результате облесения пахотных почв [19, 21, 23], что объяснялось увеличением поступления растительных остатков и сокращением потерь CO₂ в бывших пахотных горизонтах. И наоборот, поверхностные горизонты лесных почв, перешедших в сельскохозяйственные угодья, теряли около 30-35 % С, как было отмечено в штате Онтарио [17] и 50 % N, что было подсчитано для лугово-каштановых почв севера Прикаспийской низменности [5]. Вместе с тем имеется довольно незначительное количество данных по изменению запасов углерода и азота и их распределению в почвенном профиле при смене степной растительности на лесную, особенно в полупустынной зоне.

Часто рассматривается влияние насаждений на самый верхний слой почвы или суммарно на почвенный профиль большой мощности. Для степной зоны Украины установлено, что смена степ-

ной растительности 28-32-летними насаждениями *Quercus robur L.*, *Pinus sylvestris L.* различной конструкции приводит к увеличению запасов С и N в 1-метровой толще каштановых почв разного гранулометрического состава [4]. Уменьшение запасов С в черноземах под 60-летними культурами дуба относительно 26-летних насаждений в верхних 30 см гумусового горизонта отмечено Соколовым [15]. Изменение процессов накопления азота и углерода в почвах под насаждениями зависит от разных факторов, в частности, от возраста насаждений [18] и их видового состава [20, 24].

В задачи исследования входило выявить различия в процессах аккумуляции азота и углерода в профиле почв, формирующихся под естественной степной растительностью и под многолетними лесными насаждениями разного видового состава.

Изучаемые почвы расположены в глинистой полупустыне Северного Прикаспия (Волгоградская область, РФ, 49°25'N 46°46'E) с аридным континентальным климатом. Среднегодовая норма осадков (298 мм), что примерно в 3 раза меньше, чем испаряемость – 900-1000 мм в год [13]. Равнинная плоская территория характеризуется хорошо развитым мезорельефом. Мезопонижения занимают около 15 % общей поверхности. Их площадь составляет несколько га, а глубина 1-1,5 м. К ним приурочены лугово-каштановые почвы со степной растительностью, промытые от легко растворимых солей и подстилаемые линзами пресной воды, формирующимися после снеготаяния [11]. Днища мезопонижений с одинаковой площадью водосбора имеют схожие условия почвообразования: лессовидные карбонатные суглинки в качестве материнской породы, степной тип растительных ассоциаций, одинаковое увлажнение. Как правило, почвы мезопонижений мало различаются – они имеют схожее строение профиля, мощность гумусового горизонта около 40 см, вскипание от НС1 с 75 см, рН-6,7-6,9 [11]. Создание массивных лесных насаждений без полива возможно только в таких мезопонижениях. Уникальные лесные экосистемы созданы на Джаныбекском стационаре института лесоведения РАН. Мы исследовали почвы двух мезопонижений: одно – с участком степной растительности и с насаждениями *Quercus robur L.*, *Pinus sylvestris L.*, другое – с насаждениями *Cotinus coggygria Scop.* и *Acer tataricum L.* Участки в каждом понижении располагались достаточно близко друг к другу – на расстоянии не более 30 м. Это позволило нам считать, что строение почвенных профилей и другие свой-

ства исходных почв были близкими. В насаждение дуба более 40 лет назад были интродуцированы черви рода *Eisenia nordenskioldi*, разлагающие подстилку; их численность варьирует от 20 до 80 штук на м² [3].

В листьях, отобранных непосредственно с деревьев и в только что опавших листьях, а также в засохших осенью частях травянистых растений, формирующих наземный опад, определяли содержание органического С и общего N в 4-кратной повторности. Образцы отбирались также из двух слоев подстилки (L и F-H) и из почвенного профиля с глубин 0-5, 5-10, 10-20 см и далее через каждые 10 см до глубины 60 см. Образцы отбирались в 6-кратной повторности для определения содержания органического С и активности ионов NO₃⁻ и NH₄⁺, в 6-кратной повторности для определения общего N до глубины 40 см. Образцы для измерения легко нитрифицирующегося азота отбирались в 4-кратной повторности из подстилки (горизонты L и F-H смешивались вместе), и из верхней части гумусового горизонта 0-5 см. Образцы для измерения активностей отбирались весной и осенью. Все другие анализы проводились в образцах, отобранных весной. Органический углерод определяли по методу Тюрина, Общий азот – по методу Кьельдаля [2], активность ионов NO₃⁻ и NH₄⁺ в водной суспензии почвы (почва:вода 1:5, на сухой вес), используя рН-метр с мембранными электродами «Элит». Для определения легко нитрифицирующегося азота, почву компостировали в течение одного месяца при температуре 25°C и влажности 60 % от общей влагоемкости. Значения концентрации легко нитрифицирующегося азота рассчитывались по максимальным значениям в период компостирования образцов. Запасы подстилок определялись в 4-кратной повторности на площадках 40x40 см на каждом участке. Ежегодный опад определяли в насаждениях *Quercus* и *Acer* на площадках 1 м² в 4-кратной повторности осенью в течение 2008 и 2009 годов.

Наземный опад в степной и лесных экосистемах

Формирование запасов органического углерода, общего и доступного азота в почвах в условиях одинакового климата и положения в рельефе зависит, в частности, от объема поступающих растительных остатков и скорости их разложения.

Поступление опада в искусственных лесных экосистемах составляло 3,55 ± 0,60 т/га в год сухого материала в насаждении дуба и 4,10 ± 0,95 в на-

саждении клена татарского при $P=0,05$ и $n=8$ (таблица 1). К этим цифрам очень близки средние многолетние значения, полученные для степного биоценоза – 3,00-3,30 т/га сухой массы в год в степной ассоциации [14].

Содержание С в приобретенных осеннее окрашивание собранных с деревьев листьях было приблизительно одинаковым у всех листопадных деревьев, и примерно таким же, как содержание углерода в только что опавших листьях (таблица 1). В степном сообществе значения содержания углерода в пожелтевших частях растений, формирующих степной войлок, также было близким к этим показателям.

Содержание азота в опавших листьях оказалось существенно меньше, чем в листьях, собранных с деревьев (таблица 1), что, может быть, связано с продолжающимся оттоком азотсодержащих соединений из еще не опавших листьев. В засохших частях степных растений содержание азота было выше, чем в лесном опаде. Этот факт соответствует и более высокому содержанию азота в слое L степной подстилки: 17,9 и 14,1 г/кг почвы соответственно.

Масса степной и лесных подстилок

Масса степной подстилки была весьма значительна из-за отсутствия выпаса животных –

62,4 т/га. Подстилки, формирующиеся в лесных насаждениях Джаныбекского стационара, всегда отличались высокими запасами органической массы [10]. Масса лесных подстилок была в среднем в 3,4 раза выше, чем запасы степной подстилки. В то же время, наблюдались существенные различия в запасах подстилок между лесными насаждениями. Наиболее высокие значения запасов мертвой органической массы отмечены в насаждении скумпии, клена и сосны – 276; 275 и 227 т/га сухого материала соответственно (таблица 2). Запасы подстилки в насаждении дуба не отличались существенно от запасов подстилки на степном участке, что связано с деятельностью интродуцированных в подстилку червей. Очевидно, разница в процессах аккумуляция материала подстилки в насаждениях дуба и клена и в степном сообществе определялась не объемом поступающего материала, примерно одинаковым на этих участках (таблица 1), а, в значительной степени, процессами разложения подстилки.

Средние значения скорости разложения подстилки (отношение органической массы подстилки к ежегодному опаду), подсчитанные для исследованных экосистем, составили 20 для степного сообщества, 21 для насаждения дуба и 67 для насаждения клена (таблица 1). Скорость разложения

Таблица 1

Параметры опада в степной и лесных экосистемах

	Степная растительная ассоциация			Лесные насаждения			
	<i>Stipa lessingiana</i> TRIN. & RUPR.	<i>Festuca valesiaca</i>	Среднее	<i>Quercus robur</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>	Среднее
Масса опада, т/га	**3.15±0.20 ^a			3.55±0.6 ^{ab}	Нет данных	4.10±1.0 ^b	3,8
С, г/кг	1	–		437.8±25.5	475.7±10.7	480.5±12.3	464.7
	2	467.7	481.7	474.7	460.2±8.4	471.5±11.5	490.4±10.2
С, т/га	3	1.49		1.63	Нет данных	2.01	1.80
N, г/кг	1	–		14.6±2.97	12.7±1.2	14.3±0.4	
	2	10.9	11.9	11.4	9.7±0.2	9.5±1.0	8.7±0.1
N, кг/га	3	35.9		34.4	Нет данных	35.7	35.3
C/N	1	–		31.3	37.9	33.6	
	2	42.9	40.5	41.6	47.5	50	56.2

1 – содержание С в листьях, приобретенные осеннее окрашивание, сорванных с деревьев

2 – содержание С в только что опавших листьях, сухих частях ковыля и типчака

3 – поступление С и N с опадом

*Данные, отмеченные разными буквами, имеют достоверные различия при $P<0,05$.

** Данные [7].

Таблица 2

Запасы органического материала в слоях подстилки (сухой вес, т/га)*

	Степная экосистема	Лесные насаждения				Среднее
		<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>	
L	19.60±2.02 ^a	60.75±6.42 ^b	43.00±3.54 ^c	50.70±4.78 ^{bc}	246.50±28.83 ^d	100.24
F-H	42.80±5.43 ^a	14.53±2.46 ^b	184.35±19.80 ^c	225.50±40.65 ^c	28.50±5.63 ^d	113.22
Сумма	62.40	75.28	227.35	276.19	275.00	213.46

*Данные, отмеченные разными буквами, имеют достоверные различия при P<0,05.

Таблица 3

Содержание органического углерода, г/кг почвы (над чертой) и его запасы, т/га (под чертой) в лугово-каштановых почвах лесных и степных экосистем* (± доверительный интервал), n=6, P≤0,05*

Слой, см	Степная экосистема	Лесные насаждения				среднее
		<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>	
L	266.6±19.8 ^{ab}	279.2±31.5 ^{ab}	327.4±52.0 ^a	176.6±32.3 ^d	231.2±24.5 ^b	253.6
	5.2±0.5 ^a	17.0±1.8 ^b	14.1±2.2 ^b	9.0±1.6 ^c	57.0±6.7 ^d	24.28
F-H	95.7±13.5 ^a	211.0±42 ^b	159.6±19.5 ^b	164.6±16.8 ^b	160.3±26.2 ^b	173.9
	4.1±0.5 ^{ad}	3.1±0.5 ^a	29.4±3.2 ^c	37.0±6.1 ^c	4.6±0.9 ^d	18.53
0 - 5	48.8±8.9 ^a	103.2±16.5 ^d	172.0±37.6 ^b	160.5±5.5 ^b	34.1±2.3 ^a	117.45
	26.8±4.5 ^a	45.4±8.3 ^b	92.0±18.8 ^c	91.4±2.6 ^c	20.1±1.2 ^d	62.23
5 - 10	27.8±2.2 ^a	25.1±2.2 ^a	23.1±3.9 ^a	23.3±1.7 ^a	18.5±1.4 ^b	22.50
	15.4±0.6 ^a	13.9±0.6 ^b	12.9±1.0 ^{bc}	12.7±0.5 ^c	10.9±0.4 ^d	12.60
10 - 20	19.9±1.7 ^a	16.7±0.9 ^a	17.6±1.5 ^a	17.1±1.2 ^a	15.7±1.0 ^b	16.78
	22.9±0.9 ^a	19.7±0.5 ^{bc}	20.6±0.8 ^b	20.0±0.6 ^b	18.7±0.5 ^c	19.75
20 - 30	18.3±2.4 ^a	13.9±2.8 ^{ab}	12.7±1.6 ^b	15.6±3.1 ^{ab}	16.7±3.0 ^{ab}	14.73
	23.6±1.2 ^a	17.9±1.0 ^{bc}	16.4±0.8 ^b	20.1±1.6 ^{cd}	21.5±1.5 ^{ad}	18.98
30 - 40	11.8±2.7 ^a	7.0±0.9 ^{bd}	5.6±1.2 ^b	8.0±0.9 ^d	8.4±0.7 ^d	7.25
	16.3±1.4 ^a	9.7±0.5 ^b	7.7±0.6 ^c	11.0±0.5 ^d	11.6±0.4 ^d	10.00
40 - 50	7.2±1.2 ^a	5.7±0.2 ^b	7.0±1.0 ^a	5.8±0.5 ^{ab}	6.2±1.0 ^{ab}	6.18
	10.6±0.6 ^a	8.4±0.1 ^b	10.3±0.5 ^a	8.5±0.3 ^{bc}	9.1±0.5 ^c	9.08
50 - 60	6.0±0.6 ^a	4.3±0.6 ^b	5.3±0.2 ^a	4.0±0.3 ^b	5.5±1.1 ^{ab}	4.78
	9.1±0.3 ^a	6.5±0.3 ^b	8.1±0.1 ^c	6.1±0.2 ^b	8.4±0.6 ^{ac}	7.8
Подстилка	9.3	20.1	43.5	46.0	61.6	42.8
5-60	97.9	76.1	76.0	78.4	80.2	77.7
Сумма	134.0	141.6	211.5	215.8	161.9	182.7

*Данные, отмеченные разными буквами, имеют достоверные различия при P<0,05.

подстилки во всех трех экосистемах существенно ниже, чем для подобных биоценозов лесостепной или степной зоны, что соответствует более засушливым условиям разложения. Так, средняя ско-

рость разложения подстилки в 60-летней дубраве Теллермановского опытного лесничества (Воронежская область; 111°20'53"N, 41°58'35"E); [7] была 13 лет. В степной зоне скорость разложения под-

Содержание общего азота, г/кг почвы (над чертой) и запасы, т/га (под чертой) в лугово-каштановых почвах лесных и степных экосистем* (\pm доверительный интервал), n = 6, P \leq 0,05*

Слой, см	Степная экосистема	Лесные насаждения				
		<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>	среднее
L	$\frac{17.9 \pm 1.5^a}{0.35 \pm 0.04a}$	$\frac{15.5 \pm 1.7^{ad}}{0.94 \pm 0.10b}$	$\frac{12.9 \pm 0.5^b}{0.55 \pm 0.05c}$	$\frac{13.7 \pm 0.7^{bd}}{0.69 \pm 0.07d}$	$\frac{14.3 \pm 0.9^{bd}}{3.52 \pm 0.41e}$	$\frac{14.1}{1.43}$
F-H	$\frac{8.5 \pm 1.2^a}{0.36 \pm 0.05^a}$	$\frac{13.9 \pm 1.8^b}{0.20 \pm 0.03^b}$	$\frac{8.8 \pm 0.5^a}{1.62 \pm 0.17^c}$	$\frac{11.5 \pm 0.9^{ab}}{2.58 \pm 0.47^d}$	$\frac{11.3 \pm 0.9^b}{0.32 \pm 0.06^a}$	$\frac{11.4}{1.18}$
0-5	$\frac{4.5 \pm 0.7^a}{2.48 \pm 0.39^a}$	$\frac{7.9 \pm 0.8^b}{3.48 \pm 0.18^b}$	$\frac{9.0 \pm 0.8^{bd}}{4.82 \pm 0.22^c}$	$\frac{10.4 \pm 0.6^d}{5.93 \pm 0.42^d}$	$\frac{2.3 \pm 0.1^c}{1.35 \pm 0.12^c}$	$\frac{7.4}{3.90}$
5-10	$\frac{2.6 \pm 0.2^a}{1.44 \pm 0.11^a}$	$\frac{2.1 \pm 0.1^b}{1.17 \pm 0.06^b}$	$\frac{1.6 \pm 0.2^d}{0.89 \pm 0.11^c}$	$\frac{1.8 \pm 0.1^d}{0.98 \pm 0.06^d}$	$\frac{1.8 \pm 0.2^d}{1.06 \pm 0.10^{bc}}$	$\frac{1.8}{1.03}$
10-20	$\frac{2.3 \pm 0.1^a}{2.65 \pm 0.12^a}$	$\frac{1.6 \pm 0.2^{bd}}{1.89 \pm 0.24^b}$	$\frac{1.5 \pm 0.1^b}{1.76 \pm 0.11^b}$	$\frac{1.6 \pm 0.1^{bd}}{1.87 \pm 0.12^b}$	$\frac{1.8 \pm 0.1^d}{2.14 \pm 0.12^c}$	$\frac{1.6}{1.92}$
20-30	$\frac{1.8 \pm 0.1^a}{2.32 \pm 0.13^a}$	$\frac{1.5 \pm 0.1^b}{1.94 \pm 0.10^b}$	$\frac{1.3 \pm 0.1^d}{1.68 \pm 0.08^c}$	$\frac{1.5 \pm 0.1^b}{1.94 \pm 0.13^b}$	$\frac{1.5 \pm 0.1^b}{1.94 \pm 0.12^b}$	$\frac{1.5}{1.88}$
30-40	$\frac{1.1 \pm 0.1^a}{1.52 \pm 0.11^a}$	$\frac{0.9 \pm 0.1^a}{1.24 \pm 0.09^b}$	$\frac{0.6 \pm 0.1^b}{0.83 \pm 0.10^c}$	$\frac{0.9 \pm 0.1^a}{1.24 \pm 0.06^b}$	$\frac{0.9 \pm 0.1^a}{1.24 \pm 0.08^b}$	$\frac{0.8}{1.14}$
Подстилка	0.71	1.14	2.17	3.27	3.84	2.61
5-40	7.93	6.24	5.16	6.03	6.38	5.95
Сумма	11.12	10.86	12.15	15.23	11.57	12.45

*Данные, отмеченные разными буквами, имеют достоверные различия при P < 0,05.

стилки в травянистых ассоциациях в 13 раз выше, чем на нашем степном участке – 1,5-1,6 лет [12]. Возможно, здесь сказывается не только сухость климата, но и почти полное отсутствие выпаса в нашем случае.

Наиболее низкая скорость разложения подстилки отмечена в насаждении клена татарского (таблица 1); она в 3 раза ниже, чем в насаждении дуба. Наши результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными, свидетельствующими о более медленном разложении подстилки клена, чем подстилки дуба [16]. Кроме того, более высокая скорость разложения дубовой подстилки является результатом деятельности интродуцированных сюда червей рода *Eisenia nordenskioldi*.

Подстилку на всех исследуемых участках визуально можно было разделить на две части: верхний слой (L), состоящий из плохо разложившихся растительных остатков и нижний (F-H), представляющий из себя более хорошо разложившиеся

фрагменты листьев, иголок или травинки и коричневатый торфообразный материал в лесных подстилках и темно-серый пылеватый материал в степной подстилке.

Содержание и запасы С и N в степной и лесных подстилках

Слой L степной подстилки не отличался существенно по содержанию С от слоя L в насаждениях дуба, сосны и клена: 267 и 279-327 г С на кг почвы. Меньшее значение отмечено в слое L подстилки насаждения скумпии (177 г С/кг почвы) (таблица 3).

В нижней части лесных подстилок содержание углерода было значительно выше (в 1,7-2,2 раза) по сравнению со степной подстилкой (таблица 3).

В степной подстилке запасы углерода оказались в среднем в 4,6 раза ниже, чем в лесных насаждениях: примерно в 2 раза ниже, чем в подстилке дубового насаждения (таблица 3), в 4,6 раза

Значения соотношения C/N в лугово-каштановых почвах степной и лесных экосистем

Слой, см	Степная экосистема	Лесные насаждения			
		<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>
L	14.9	18	25.4	12.9	16.2
F-H	11.3	15.2	18.1	14.3	14.2
0-5	10.8	13.1	19.1	15.4	14.8
5-10	10.7	12	14.4	12.9	10.3
10-20	8.7	10.4	11.7	10.7	8.7
20-30	10.2	9.3	9.8	10.4	11.1
30-40	10.7	7.8	9.3	8.9	9.3

Таблица 6

Содержание легко нитрифицирующегося азота, мг N(NO₃⁻)/кг (над чертой) и его запасы, г/м² (под чертой) в лугово-каштановых почвах степной и лесных экосистем, подсчитанные по максимумам после одного месяца компостирования, (±доверительный интервал), n=4, P≤0,05*

Слой, см	Степная экосистема	Лесные насаждения				Среднее
		<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Acer tataricum</i>	
Подстилка	<u>1.85±0.12^a</u>	<u>2.41±0.21^b</u>	<u>3.05±0.28^c</u>	<u>1.68±0.10^a</u>	<u>2.95±0.12^c</u>	<u>2.52</u>
	1.15	1.82	6.93	4.62	8.11	5.37
0-5 см	<u>2.34±0.12^a</u>	<u>2.96±0.16^b</u>	<u>2.25±0.14^a</u>	<u>4.41±0.25^c</u>	<u>2.31±0.10^a</u>	<u>2.98</u>
	6.48	7.4	6.17	12.34	6.45	8.09

*Данные, отмеченные разными буквами, имеют достоверные различия при P<0,05.

ниже, чем в подстилках насаждений скумпии и сосны; и в 11 раз ниже, чем в насаждении клена татарского.

В степном биоценозе запасы углерода подстилки составляли всего 7 % от запасов в подстилке и гумусовом горизонте, в насаждении *Quercus robur* – 14 %, в насаждениях *Pinus sylvestris* и *Cotinus coggygria* – 20-21 %, а в кленовом насаждении – 38 %.

Содержание общего азота в слое L степной подстилки в 1,3 раза выше, чем в лесных. Значимые различия обнаружены между степным участком и участками под насаждениями сосны, клена и скумпии (таблица 4).

Нижние части лесных посадок и степной подстилок также различались по содержанию азота: оно было в 1,3 раза выше в лесных насаждениях. Значимые различия отмечены между степной экосистемой и насаждениями дуба и клена.

Запасы азота в степной подстилке составляли в 1,6-5,4 раза меньше, чем в лесных подстилках и составили около 6 % от общих запасов в подстил-

ке и гумусовом горизонте почвы, (таблица 4); в дубовом насаждении – 6 %, в сосновом насаждении – 18 %, в насаждении скумпии – 21 %, в насаждении клена татарского – 33 %.

Как известно, соотношение C/N влияет на скорость разложения подстилки [22, 25], хотя этот показатель применим не для всех видов подстилок [26] (таблица 5). Объемы опада, поступающего на поверхность почвы в степном биоценозе и в насаждениях клена и дуба примерно одинаковы, и наименьшие значения соотношения C/N, свойственные слоям L и H-F подстилки в степной экосистеме согласуются с наименьшими значениями запасов органического материала в этих слоях.

В слое L подстилок величины значений соотношения C/N контролировались концентрацией C и не зависели от концентрации N. Коэффициент корреляции между значениями соотношения C/N и содержанием углерода был 0,87 ($a \leq 0,05$; n=5) для всех участков.

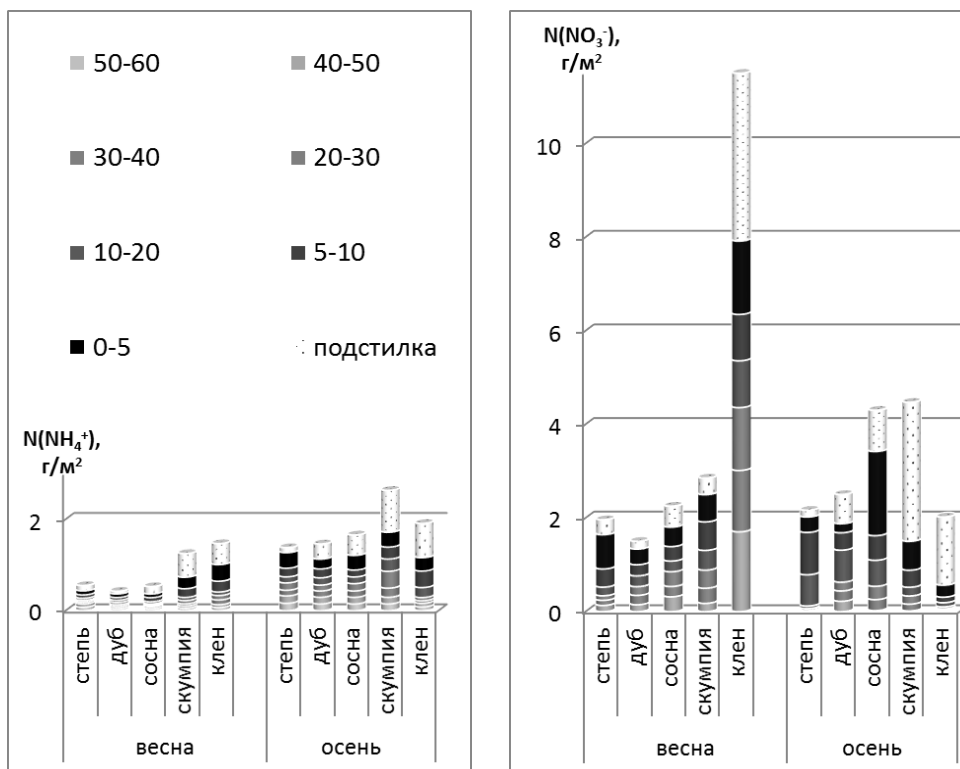


Рис. Запас аммиачного и нитратного азота в лугово-каштановых почвах степной и лесных экосистем

Содержание легко нитрифицирующегося азота было существенно (в 1,3-1,6 раза) выше в подстилке лесных участков, чем степного (таблица 6). Исключение составляет насаждение скуппии, в подстилке которого концентрация легко нитрифицирующегося азота была примерно такой же, как в степной экосистеме. Запасы легко нитрифицирующегося азота в подстилках под насаждениями скуппии сосны и клена были в 4,6-7 раз выше по сравнению со степным участком. На степном участке и в насаждении дуба величины запасов были наименьшими 1,15 и 1,82 г $N(NO_3^-)$ на m^2 (таблица 6).

В подстилках значения активностей NO_3^- и NH_4^+ ионов были почти всегда в несколько раз выше, чем в гумусовых и минеральных горизонтах. Закономерных различий в содержании и запасах нитратного и аммиачного азота в подстилках степной и лесных экосистем не наблюдалось.

Динамика изменений запасов минерального азота по сезонам в подстилках степной и лесных экосистем носила разный характер (рис.). К осени запас аммиачного азота в степной подстилке практически не изменился относительно весеннего значения, а в лесных подстилках запасы увеличились в среднем на 200 %. Запас нитратного азота в степной подстилке осенью сократился на 55 % от весеннего значения, а в подстилках насаждений дуба,

сосны и скуппии запасы увеличились в среднем на 370 %. И только в насаждении клена татарского запас сократился на 61 %. По имеющимся данным [6], в лесных подстилках насаждений Джаныбекского стационара на порядок увеличивается численность микроорганизмов нитрификаторов и денитрификаторов относительно нативной степной подстилки, из-за чего в лесных подстилках к осени, очевидно, могут накапливаться минеральные соединения азота. Возможно, более высокое содержание общего азота в нижней части лесных подстилок относительно горизонта F-H степной подстилки связано с накоплением здесь живой и мертвой микробной биомассы. В насаждении клена татарского отрицательный баланс минерального азота в осенний период складывается, вероятно, из-за более интенсивного поглощения азота этим видом.

Содержание и запасы углерода и азота в гумусовом горизонте

Содержание углерода закономерно уменьшалось с глубиной в профиле почв всех исследуемых участков (таблица 3). Концентрация углерода в верхнем 5-см слое гумусового горизонта на степном участке была в среднем в 2,4 раза выше, чем в лесных экосистемах. Вместе с тем, различия между участками в содержании углерода в этом слое

были сильнее, чем в других слоях. Концентрация углерода сохранялась примерно одинаковой на степном участке и в насаждении клена, а в насаждении дуба, сосны и скумпии в 2-3,5 раза выше.

На глубине 5-10 см различия в содержании углерода прослеживаются между почвами кленового насаждения и почвами других участков. Содержание углерода здесь в 1,5 раз меньше, чем на степном участке и в 1,3 раза меньше, чем в других лесных почвах.

На глубине 10-20 см различия остаются значимыми только между степным участком с наиболее высоким содержанием углерода и участком клена татарского.

Для более глубоких слоев профиля обнаружена следующая закономерность: содержание углерода в степных почвах всегда выше, чем в лесных, хотя эта тенденция статистически подтверждается не для всех слоев. Наиболее сильно она выражена на глубине 30-40 см, где содержание углерода под степной растительностью было в 2-1,4 раза выше, чем под насаждениями.

Запасы углерода, как и его содержание, в слое 0-5 см в степном биоценозе было в среднем в 2,3 раза меньше, чем в почвах лесных насаждений, но величины запасов существенно различались и в лесных почвах. В насаждениях скумпии и сосны в этом слое запасы углерода были в 3-5 раз выше, чем в других экосистемах. Более низкие, чем в степной почве запасы углерода наблюдались в насаждении клена татарского.

Значимые потери органического углерода отмечены в большинстве слоев на глубине 5-60 см в лесных почвах относительно нативных (таблица 3). Сокращение запасов углерода было примерно одинаковым в почвах всех лесных участков и составило около 20 % от запасов степной почвы.

Уменьшение содержания и запасов органического углерода на глубине 5-60 см в почвах всех насаждений, вероятно, связано с уменьшением ежегодного поступления растительных остатков с отмершими корнями в лесных экосистемах, по сравнению со степной залежью. Приблизительные подсчеты подтверждают эту гипотезу. Масса корней в 60 см слое почвы под степной растительностью составляет, по данным [8], 17,5 т/га. Если предположить, что примерно 80 % от массы корней приходится на корневой отпад [1], то он будет соответствовать примерно 14 т/га. Согласно данным [7], поступление мортмассы составляет около 2 т/га в 60-см слое под 50-летней дубравой Тел-

лермановского опытного лесничества. Этот объем существенно меньше, чем в степной экосистеме.

Общие запасы углерода в подстилке и в 60-см слое почвы в степной экосистеме были в среднем в 1,4 раза ниже, чем в насаждениях. При этом под насаждением дуба запасы углерода были такие же, как, под степной растительностью, в насаждениях скумпии и сосны они увеличились на 58-59 %, а в насаждении клена татарского – на 25 % по сравнению со степным участком.

В слое 0-5 см содержание азота в почве в насаждениях дуба, сосны и скумпии было в 2 раза выше, а в насаждении клена татарского примерно в 2 раза ниже, по сравнению со степными почвами (таблица 4).

На глубине от 5 до 40 см в лесных почвах содержание азота содержится в основном достоверно ниже, чем в степной почве.

Запасы азота в верхнем 5 см слое лесных почв оказалось в 1,4-1,9 раз выше, чем в степных почвах (таблица 4). Исключение составляют почвы под насаждением клена: запасы азота в этом насаждении были в 1,8 раз меньше, чем в степной почве.

На глубине от 5 до 40 см установлено, что запасы азота в степной почве достоверно выше, чем под насаждениями. Суммарно в этом горизонте запасы азота уменьшились в насаждении сосны на 35 %, а в остальных насаждениях на 20-23 %.

Запасы азота в подстилке и гумусовом горизонте степных почв были примерно такими же, как на лесных участках, исключая насаждение скумпии. Запасы азота в этом насаждении были на 25-40% выше, чем на других участках.

Величины соотношения C/N, как правило, уменьшались вниз по профилю исследуемых почв (таблица 5). Гумус верхних слоев почвы под степной растительной ассоциацией был более обогащен азотом, чем в лесных почвах. Средние значения на глубине 0-10 см лесных почв изменялись от 10 до 15, а в степных почвах составляли около 10,7.

Содержание легко нитрифицирующегося азота составляло 2,34 мг $N(NO_3^-)$ на кг почвы в верхнем 0-5 см слое степной почвы. Примерно такие же значения наблюдались в почве соснового и кленового насаждений. В насаждениях скумпии и дуба они были в 1,9 и в 1,3 раза выше (таблица 6).

Запасы легко нитрифицирующегося азота в слое 0-5 см оказались приблизительно одинаковыми в рассматриваемых экосистемах, за исключением насаждения скумпии, где они были в 2 раза

выше, чем в почвах других участков. Это связано с высоким содержанием легко нитрифицирующегося азота в этом слое.

Величины активностей NO_3^- ионов в исследованных почвах варьируют в пределах от $4,80$ до $0,1$ моль/л* 10^{-4} , а значения активностей ионов NH_4^+ – от $0,88$ до $0,09$ моль/л* 10^{-4} . Весной активность NO_3^- ионов была в 2-13 раз выше, чем активность NH_4^+ ионов. Осенью соотношение активностей $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ионов составляло ниже единицы только в насаждении скумпии (в гумусовом горизонте) и в насаждении клена (на глубине 10-20 см), что связано с экстремально низкими значениями активностей иона NO_3^- .

Влияние подстилок на формирование пищевого режима почв.

В условиях дефицита влаги и неравномерного распределения значений влажности по почвенному профилю, для характеристики плодородия почв имеет значение, в каких горизонтах аккумулируются питательные вещества. С начала лета и до осени в гумусовом горизонте устанавливается влажность, близкая к влажности завядания – 12%. Примерно такие же значения (7-13%) часто отмечаются в сухой сезон и в подстилке. Вместе с тем, непродолжительные но сильные летние дожди приводят к промачиванию подстилки и увеличению ее влажности даже на следующий день после дождя до 20-25%. Влажность гумусовых горизонтов после летних дождей практически не изменяется. Все подстилки пронизаны тонкими корнями растений, а лесные подстилки содержат также многочисленные гифы грибов. Периодическое увлажнение подстилок, содержащих значительные запасы С, общего азота и его легко минерализующихся и минеральных форм, свидетельствует о том, что подстилки могут быть непосредственным источником питательных веществ для растений даже в сухой период.

Подстилки оказывают влияние на содержание мобильных соединений азота в гумусовом горизонте и ниже по профилю. Согласно нашим лизиметрическим данным [10], ионы NO_3^- вымываются из подстилки в нижние горизонты весной во время и после снеготаяния, когда подстилки находятся во влажном состоянии. Положительная корреляция обнаружена между значениями активностей NO_3^- ионов, измеренными весной в подстилке и в верхних слоях почвы. Для слоев 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, и 30-40 см коэффициенты корреляции были 0,97; 0,88; 0,88; 0,88 и 0,91 соответственно для $n=5$ (все исследуемые участки), $\alpha \leq 0,05$.

Этот процесс практически заканчивается в другие сезоны из-за незначительного количества осадков. Не обнаружено корреляции между значениями активностей ионов NO_3^- в подстилке и в других горизонтах осенью.

Итак, формирование запасов углерода и различных форм азота в профиле почв под естественной степной растительностью и под насаждениями происходит по-разному. В подстилке всех лесных насаждений имело место увеличение запасов углерода в среднем в 4,6 раза, общего азота в 3,7 раза, легко минерализующегося азота в 4,7 раза по сравнению со степной экосистемой. В то же время в слое 5-40(60) см всех лесных почв запасы углерода и азота сократились на 20-35%.

Подстилки играют важную роль в обеспечении растений питательными веществами как весной, когда происходит вымывание из них нитратного азота в гумусовый горизонт, так и в засушливый период из-за периодического увлажнения подстилок дождевыми осадками на фоне иссушения гумусового горизонта. Динамика изменений запасов минерального азота за вегетационный период в подстилке степной и лесных экосистем свидетельствовала о более высоком потенциальном плодородии лесных подстилок.

В целом баланс углерода под лесными насаждениями был положительным: запасы углерода в подстилке и 60-см слое почвы под насаждениями увеличились в среднем на 36%. Общие запасы азота в подстилке и в гумусовом горизонте были примерно одинаковы на степном участке и в насаждении дуба черешчатого, сосны обыкновенной и клена татарского и увеличились на 36% в насаждении скумпии.

Амплитуда колебаний запасов азота и углерода в подстилке и запасов азота в слое 5-40 см лесных экосистем зависела от вида древесных пород, формирующих насаждение. Различия в запасах углерода и азота между участками были максимальны в слое 0-5 см.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН «Биологические ресурсы России» и РФФИ (грант 12-04-01347).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базилевич Н. И. Биотический круговорот на пяти континентах / Н. И. Базилевич, А. А. Титлянова. – Новосибирск : СО РАН, 2008. – 376 с.
2. Воробьева Л. А. Химический анализ почв / Л. А. Воробьева. – Москва : Издательство Московского государственного университета, 1988. – 272 с.
3. Всеволодова-Перель Т. С. Изменение видового состава и трофической структуры почвенного населе-

ния при создании искусственных лесных насаждений в полупустыне Прикаспия / Т. С. Всеволодова-Перель, М. Л. Сиземская, А. В. Колесников // Поволжский экологический журнал. – 2010. – № 2. – С. 142-150.

4. Кретинин М. В. Мелиоративное влияние лесонасаждений на почвы гидрографической сети в Окско-Донской провинции / М. В. Кретинин, Б. В. Кондрашов, А. В. Верченев // Агроресоландшафты: проблемы, свойства, управление и оценка. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1995. – С. 126-133.

5. Кулакова Н. Ю. Влияние агролесомелиорации на состояние основных элементов питания в лугово-каштановых почвах Северного Прикаспия / Н. Ю. Кулакова // Агрехимия. – 2010. – № 5. – С. 22-28.

6. Кулакова Н. Ю. Влияние лесных культур на доступность азота в черноземовидных почвах Северного Прикаспия / Н. Ю. Кулакова, Т. А. Соколова, В. А. Лаврова // Лесоведение. – 1996. – № 2. – С. 42-52.

7. Молчанов А. А. Дубравы лесостепи в биогеоценологическом освещении / А. А. Молчанов. – Москва: Наука, 1975. – 373 с.

8. Оловянная И. Н. Динамика продуктивности растительного покрова в Заволжской глинистой полупустыне / И. Н. Оловянная // Ботанический журнал. – 1985. – Т. 89, № 7. – С. 1122-1137.

9. Оловянная И. Н. О причинах недолговечности вяза приземистого в лучших лесорастительных условиях полупустыни Прикаспия / И. Н. Оловянная, Г. В. Линдеман // Лесоведение. – 2000. – № 6. – С. 17-25.

10. Ржезникова Н. Ю. Зоогенный перенос азота в искусственные лесные насаждения и его перераспределение по почвенному профилю / Н. Ю. Ржезникова, А. В. Быков, Г. В. Линдеман // Почвоведение. – 1992. – № 9. – С. 79-81.

11. Роде А. А. Почвы полупустыни Северо-Западного Прикаспия и их мелиорация / А. А. Роде, М. Н. Польский // Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева. – Москва: Издательство АН СССР, 1960. – Т. 56. – С. 3-214.

12. Родин Л. Е. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности / Л. Е. Родин, Н. И. Базилевич. – Москва; Ленинград: Наука, 1965. – 253 с.

13. Сапанов М. К. Экология лесных насаждений в аридных регионах / М. К. Сапанов. – Тула: Гриф и К, 2003. – 248 с.

14. Сиземская М. Л. Современное состояние экосистем и стратегия адаптивного природопользования в Полупустыне Северного Прикаспия / М. Л. Сиземская,

М. К. Сапанов. // Аридные экосистемы. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 15-24.

15. Соколов Д. Ф. Влияние органического вещества различных древесных пород на чернозем / Д. Ф. Соколов; отв. ред. В. Н. Сукачев // Биогеоценологические исследования в дубравах лесостепной зоны. – Москва: Издательство АН СССР, 1963. – С. 170-183.

16. Соколов Д. Ф. Разложение и минерализация опада дуба в сухой степи / Д. Ф. Соколов // Бюллетень общества испытателей природы. Отдел биологический. – 1960. – Т. 65, вып. 2. – С. 67-86.

17. Ellert B. H. Storage of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Cultivated and Adjacent Forested Soils of Ontario / B. H. Ellert, E. G. Gregorich // Soil Science. – 1996. – Vol. 161(9). – P. 587-603.

18. Effects of afforestation and deforestation on boreal soil carbon stocks-Comparison of measured C stocks with Yasso07 model results / K. Karhu [et al.] // Geoderma. – 2011. – Vol. 164. – P. 33-45.

19. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? / R. Jandl [et al.] // Geoderma. – 2007. – Vol. 137. – P. 253-268.

20. Influence of plant species on physical, chemical and biological soil properties in a Mediterranean forest soil Cano-Amat / A. Perez-Bejarano [et al.] // European Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 129. – P. 15-24.

21. Johnson D. W. Effects of forest management on soil carbon storage / D. W. Johnson // Water, Air, & Soil Pollution. – 1992. – Vol. 64. – P. 83-120.

22. Manzoni S. A theoretical analysis of nonlinearities and feedbacks in soil carbon and nitrogen cycles / S. Manzoni, A. Porporato // Soil Biology & Biochemistry. – 2007. – Vol. 39 (7). – P. 1542-1556.

23. Post W. M. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential / W. M. Post, K. C. Kwon // Global Change Biology. – 2000. – Vol. 6. – P. 317-328.

24. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests / N. Gartzia-Bengoetxea [et al.] // Soil Biology & Biochemistry. – 2009. – Vol. 41. – P. 1674-1683.

25. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter / S. Manzoni [et al.] // Ecological Monographs. – 2010. – Vol. 80. – P. 89-106.

26. Thomas K. D. Nitrogen availability in forest floors of three tree species on the same site: the role of litter quality / K. D. Thomas, C. E. Prescott // Canadian Journal of Forest Research-revue. – 2000. – Vol. 30(11). – P. 1698-1706.

Кулакова Нина Юлиановна
кандидат биологических наук, научный сотрудник Института лесоведения РАН, г. Москва, т. 8(495)3302097, E-mail: nkulakova@mail.ru

Kulakova Nina Yulianovna
Candidate of Biological Sciences, researcher at the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, tel. 8(495)3302097, E-mail: nkulakova@mail.ru