

УДК 631.421; 630.114 631.461

## ЭЛЕМЕНТЫ КРУГОВОРОТА С И N В ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПОЛУПУСТЫНИ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ<sup>1</sup>

© 2017 г. Н.Ю. Кулакова\*, Б.Д. Абатуров\*\*, Ю.Д. Нухимовская\*\*

\*Институт лесоведения РАН

Россия, 143030, Московская обл., с. Успенское, ул. Советская, д. 21. E-mail: nkulakova@mail.ru

\*\*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр., д. 33

Поступила 23.05.2016

Прослежены изменения в количестве и динамике депонирования поступающих на поверхность почвы углерода и азота в антропогенных пастбищных и лесных экосистемах Северного Прикаспия, созданных на месте естественных степных и пустынных растительных ассоциаций. Показано, что в подстилке насаждения дуба черешчатого (*Quercus robur*) через два года после поступления депонируется в 1.3 раза больше углерода и примерно такое же количество азота, как в степной подстилке, несмотря на то, что масса поступающего опада в лесном насаждении в 1.4 раза меньше, чем в травяной экосистеме. При близких значениях запасов углерода и азота в почве под степной растительностью и под насаждением, отмечено перераспределение запасов углерода и азота в лесной почве: запасы углерода в лесной подстилке и слое 0-5 см составляют 33% от запасов в подстилке и в слое почвы 0-50 см, а под степной растительностью – 22%; запасы азота соответственно 2.9 и 2.0%. В результате интенсивного выпаса в экосистемы западин поступает в 1.6-1.7 раз меньше углерода и азота, в экосистемы микроповышений – в 1.4 раза меньше этих элементов, чем на заповедных участках. Достоверное уменьшение запасов углерода и азота отмечено в подстилке и слое 0-5 см лугово-каштановых почв западин, находящихся под прессингом интенсивного выпаса.

*Ключевые слова:* круговорот С и N, экосистемы полупустыни, искусственные лесные насаждения, пастбища.

Запас биофильных элементов, аккумулирующихся в природных экосистемах, зависит от скорости накопления фитомассы в биоценозах, которая в аридных условиях Северного Прикаспия определяется особенностями перераспределения почвенной влаги в ландшафте (Биогеоценотические основы ..., 1974). Создание лесных насаждений и природных охраняемых территорий, пастьба скота приводят к изменениям массы органического материала, поступающего на поверхность почвы, её состава. В результате скорость поступления питательных веществ в почву, обеспеченность растений питательными веществами также изменяются (Кулакова, 2008; Kulakova, 2012), что отражается на состоянии и продолжительности жизни лесных насаждений (Душков, 1981), определяет продуктивность пастбищ.

Основная цель работы состояла в сравнении параметров круговорота азота и углерода в естественных и антропогенных экосистемах Северного Прикаспия. В задачи работы входило исследование скорости разложения отмерших частей доминирующих видов растений в пустынных и степных нативных экосистемах, опавших листьев в насаждении дуба черешчатого (*Quercus robur*), помета овец в пастбищных растительных сообществах; определение массы растительного опада и фекалий пастбищных животных, поступающих на поверхность почвы; оценка количества углерода и азота, сохраняющегося на поверхности почвы через два года после поступления; сравнение запасов азота и углерода в почве исследуемых нативных и антропогенных экосистем.

<sup>1</sup> Работа выполнена на Джаныбекском стационаре Института лесоведения РАН при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий», Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-04-00469, № 12-04-00242, № 15-04-03542).

### Материалы и методы исследований

Работа проводилась в Северном Прикаспии (Волгоградская область, 49°25' с.ш., 46°46' в.д.), на Джаныбекском стационаре ИЛАН РАН. Регион относится к засушливым аридным территориям со среднегодовой (1952-2013 гг.) суммой осадков 291 мм и среднегодовым коэффициентом увлажнения 0.32 (Сиземская, Сапанов, 2010; Сапанов, Сиземская, 2015).

В силу специфического мезо- и микрорельефа, и обусловленного им поверхностного перераспределения атмосферных осадков, здесь сформированы три резко различающихся по природным особенностям почвенно-растительных комплекса. Типично степная мезофитная разнотравно-дерновиннозлаковая растительность на лугово-каштановых почвах по микрозападинам и падинам чередуется с пустынно-степными сообществами галофильных полукустарничков на сильнозасоленных солонцовых почвах по микроповышениям и с полупустынными группировками ксерофильных злаков и разнотравья на солонцеватых светлокаштановых почвах по микросклонам (Каменецкая, 1952).

Работы проведены на участках, идентичных по физико-географическим условиям, но различающихся характером использования: на заповедном участке площадью 20 га с многолетним исключением пастбы животных (естественные растительные сообщества), на пастбище с постоянным (многолетним) выпасом комплекса пастбищных животных, преимущественно овец, и в лесном насаждении из дуба черешчатого 65-летнего возраста, приуроченном к понижению с лугово-каштановыми почвами. Участки расположены не далее, чем 2.5 км друг от друга.

Объектами исследований были образцы пяти видов растений: листья и стебли злаков типчака (*Festuca valesiaca* Gaudin) и ковыля (*Stipa lessingiana* Trin.&Rupr.), однолетние побеги полукустарничков – полыни черной (*Artemisia pauciflora* Web.) и прутняка (*Kochia prostrata* Schrad.), опад дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), а также овечий помет. Специальные сетчатые пакеты с растительным материалом или с помётом фиксировали в тех местах, куда этот материал поступает в естественных условиях: типчак и ковыль в микропонижениях, полынь черная и прутняк – на микроповышениях. Произрастание видов и поступление опада каждого вида растений локализовано, поэтому пакеты содержали растения только одного вида. Пакеты с листовым опадом дуба закрепляли на поверхности почвы, непосредственно под деревьями, где они были собраны. Пакеты с образцами овечьего помета закрепляли и в микропонижениях и на микроповышениях. Ячейки верхней сетки пакета имели диаметр 2 мм, нижней – 0.2 мм, за исключением пакетов с образцами дуба и помёта, где размеры ячеек нижней и верхней сеток были 2 мм. Необходимость использования более мелких ячеек в случае злаков и кустарничков была вызвана очень небольшим размером семян этих растений. Образцы компостировали в течение двух лет (с осени 2011 г. по осень 2013 г.). После первого и второго годов компостирования по шесть образцов каждого вида изымали для анализа. До и после компостирования определяли массу и влажность образцов. Почвенные образцы отбирали из скважин с глубин 0-5, 5-10, 10-20 см и далее до 50 см в трехкратной повторности в каждой из исследуемых экосистем. В растительных и почвенных образцах определяли концентрацию С и N на анализаторе элементного состава.

Учет запасов надземной фитомассы проводили трехкратно в течение вегетационного периода методом укусов на площадках размером 1 м<sup>2</sup> в 3-5-кратной повторности отдельно в растительных сообществах двух типов: степном и пустынном. На всех укусных площадках отдельно учитывали ветошь, текущий опад и подстилку. Следует отметить, что на пастбище опад и подстилка в период весенних учетов (апрель) практически отсутствовали, в дальнейшем их образование было целиком вызвано пастбой животных (вытаптыванием), т.е. отторжением растительной массы копытами животных. Травянистые растения срезали на высоте 1-2 см от поверхности почвы, у полукустарничков срезали текущий (годовой) прирост, который в условиях пастбища почти соответствовал всей годичной надземной продукции растения. Учет опада дуба проводили с помощью опадоуловителей площадью 1 м<sup>2</sup> в трёхкратной повторности.

Годичную продукцию оценивали по сумме запасов видов, учтенных в момент максимума массы каждого, т.е. методом “суммирования пиков” (Титлянова, 1983). Суммарную продукцию надземной фитомассы на участке с постоянным выпасом овец рассчитывали, как сумму надземной фитомассы на корню, потребленной фитомассы и текущих опада и подстилки, образованных приростом текущего года. Для оценки, потребленной животными фитомассы на пастбище использован учет

массы фекалий (непереваренных остатков), отложенных пасущимися животными за определенный отрезок времени, с последующим пересчетом этой величины на потребленную кормовую массу. Поступление фекалий на поверхность почвы в условиях выпаса учитывали на постоянных пробных площадях в 100 м<sup>2</sup>, заложенных в трехкратной повторности в западинах и на микроповышениях трижды за сезон (Абатуров и др., 2008; Абатуров, Нухимовская, 2013).

### Результаты и обсуждение

*Скорость разложения образцов.* В полупустыне роль почвенной мезофауны в разложении растительного опада не велика. Известно, что степная подстилка может сохраняться и накапливаться в течение многих лет, если отсутствует выпас домашних или диких копытных (Абатуров, Кулакова, 2010). В лесных насаждениях мезофауна более активно участвует в процессах разложения. В основном это сапротрофные личинки двукрылых, среди которых преобладают *Bibionidae* (*Bibio marci*), *Tipulidae* (*Tipula peliostigma*; Всеволода-Перель, Сиземская, 2005). Однако, воздействие даже этих, наиболее активных сапротрофов, локализовано, их распространение очень неравномерно. Несмотря на довольно крупные ячейки сетки пакетов, в которые были заложены образцы, следы поедания их почвенными животными практически отсутствовали.

Потери массы образцами за первый год компостирования были примерно одинаковыми у ковыля, типчака и полыни черной, между ними нет достоверных различий. Оставшаяся масса составляла 60-70% от первоначальной. Несколько выше была скорость разложения растений прутняка – масса образцов после годового компостирования составила 55% от массы до компостирования, достоверно отличаясь от значений, полученных для типчака и полыни черной. Очевидно, быстрая потеря массы образцами этого растения в первый год связана с разложением листьев, составляющей 50% до компостирования и 40% после первого года компостирования. Такой же процент отмечается в образцах помёта. Более быстрое разложение помёта в первый год компостирования связано с наличием в свежем помёте легко минерализующихся соединений. Масса образцов листьев дуба после компостирования практически не изменилась. Масса образцов злаков и полукустарничков после второго года компостирования изменилась примерно одинаково – осталось около 60-70% от массы образцов после первого года. Листья дуба и помёт слабо подверглись разложению во второй год компостирования – осталось около 80% от массы образцов первого года.

В итоге после двух лет компостирования образцов злаки, полукустарнички и помёт сохранили примерно 35-45% от первоначальной массы, а листья дуба – 80%. Начальные различия в химическом составе растений естественных экосистем и помёта, а также анатомические различия этих растений, сказались на скорости разложения только в первый год компостирования.

*Изменение содержания и запаса С в образцах при компостировании.* В процессе разложения состав компостируемого материала меняется. При этом менее всего в образцах изменяется содержание углерода. До компостирования в растительных образцах содержание углерода составляло 43-46% (табл. 1), достоверные различия обнаружены только между листьями дуба (наиболее высокое содержание углерода) и образцами других видов растений. В помёте овец углерод составлял около 28%. После первого года компостирования достоверные изменения в содержании углерода отмечены в образцах помёта (оно увеличилось примерно на 7%) и в образцах злаков, в которых содержание углерода понизилось на 2-4%. После второго года компостирования имеется тенденция к снижению содержания углерода, но она не подтверждается статистически в образцах ковыля и помёта.

После двух лет компостирования содержание углерода снизилось на 9-10% в растениях типчака и прутняка и на 4-5% в других растительных образцах; в помёте содержание углерода примерно на 4% увеличилось.

Потери углерода по мере снижения общей массы образцов у злаков и полукустарничков были примерно одинаковыми. Образцы полыни и типчака сохранили около 65% от первоначального запаса углерода, а ковыля и полыни 57-59%. Помёт и листья дуба изменились меньше – в образцах помёта осталось 69, а в образцах листьев дуба – 94% от первоначального запаса. Такие же тенденции сохранились и во второй год компостирования. В результате после двух лет наименьшие запасы углерода остались в образцах ковыля, прутняка и типчака (33-35% от первоначального запаса), несколько больше (43%) в растениях прутняка. В образцах листьев дуба сохранилось около 70%, а в помёте – около 50% от первоначального запаса углерода.

**Таблица 1.** Содержание (% от абсолютно сухого веса) и запас углерода (% от запаса до компостирования) в образцах с разной длительностью компостирования.

Объекты	Содержание С, %			Запас С, %	
	0 лет	1 год	2 года	1 год	2 года
Ковыль Лессинга <i>Stipa lessingiana</i>	43.79±1.07 <sup>a</sup>	41.47±0.68 <sup>b</sup>		56.94	32.58
Типчак <i>Festuca valesiaca</i>	43.36±0.98 <sup>a</sup>	39.3±1.80 <sup>b</sup>	34.29±2.72 <sup>c</sup>	65.01	35.62
Прутняк <i>Kochia prostrata</i>	43.26±1.03 <sup>a</sup>	44.39±1.67 <sup>a</sup>	33.74±1.70 <sup>c</sup>	59.18	34.47
Полынь черная <i>Artemisia pauciflora</i>	44.8±0.92 <sup>a</sup>	42.15±1.47 <sup>a</sup>	39.47±1.09 <sup>c</sup>	65.29	42.57
Листья дуба <i>Quercus robur</i>	46.02±0.87 <sup>a</sup>	44.61±1.31 <sup>a</sup>	40.56±2.06 <sup>c</sup>	94.51	70.65
Помёт овцы	27.81±0.75 <sup>d</sup>	34.76±0.82 <sup>c</sup>	32.12±2.27 <sup>d</sup>	69.02	50.87

**Примечание к таблице 1 и 2:** разными буквами отмечены достоверно отличающиеся значения при  $n=6$ ,  $P \geq 0.95$ .

*Изменение содержания и запаса N в образцах при компостировании.* В отличие от содержания углерода, содержание азота в исходных, взятых для компостирования растительных образцах, существенно различалось (табл. 2). Наименьшие значения отмечены в образцах злаков: 0.72-0.76%. Достоверно выше содержание азота в листьях дуба, более чем в 1.5 раз выше в растениях прутняка и полыни. Известно, что значительная часть обменного (усвоенного) азота в организме млекопитающих выделяется не только с мочой, но и с фекалиями животных (Абатуров, 1999; Абатуров, 2005). Содержание азота в помёте было наибольшим в анализируемых образцах – 1.84%.

**Таблица 2.** Содержание (% от абсолютно сухого веса) и запас азота (% от запаса до компостирования) в образцах с разной длительностью компостирования.

Объекты	Содержание N, %			Запас N, %	
	0 лет	1 год	2 года	1 год	2 год
Ковыль Лессинга <i>Stipa lessingiana</i>	0.76±0.04 <sup>a</sup>	1.36±0.20 <sup>b</sup>	1.98±0.27 <sup>c</sup>	107.60	93.31
Типчак <i>Festuca valesiaca</i>	0.72±0.05 <sup>a</sup>	0.99±0.22 <sup>a</sup>	1.56±0.12 <sup>c</sup>	98.63	97.70
Прутняк <i>Kochia prostrata</i>	1.08±0.08 <sup>a</sup>	1.61±0.04 <sup>b</sup>	2.25±0.23 <sup>c</sup>	82.36	80.26
Полынь черная <i>Artemisia pauciflora</i>	1.40±0.08 <sup>a</sup>	1.57±0.10 <sup>a</sup>	2.43±0.15 <sup>c</sup>	77.86	71.43
Листья дуба <i>Quercus robur</i>	0.97±0.05 <sup>a</sup>	0.98±0.13 <sup>a</sup>	1.22±0.24 <sup>a</sup>	98.51	100.83
Помёт овцы	1.84±0.06 <sup>a</sup>	1.95±0.03 <sup>a</sup>	2.12±0.18 <sup>c</sup>	58.52	50.68

В процессе компостирования, как известно, процентное содержание азота в органических образцах увеличивается. Достоверное увеличение содержания азота после первого года произошло только в образцах ковыля и прутняка, после второго года – в образцах злаков и полукустарничков, в то время как в образцах помёта и листьев дуба увеличение содержания азота не подтверждается статистически. За два года содержание азота увеличилось более чем в 2 раза в образцах прутняка и злаков, в 1.6 раза в образцах полыни, и совсем незначительно – в 1.2-1.3 раза в образцах помёта и листьев дуба (табл. 2). При этом в последнем случае увеличение не подтверждается статистически.

Потери общего запаса азота в растительных образцах в процессе компостирования были незначительны (табл. 2). Максимально за первый год запас азота снизился в образцах растений прутняка и полыни – на 18 и 23% соответственно. У злаков и в образцах листьев дуба изменений в запасах азота после года компостирования не обнаружено. За второй год скорость потерь азота образцами уменьшилась. За два года образцы прутняка и полыни потеряли 20-29% азота, в образцах злаков запас снизился на 2-7%, в листьях дуба изменений не произошло.

Существенные потери азота были отмечены в образцах помёта – после первого года осталось всего 59% от первоначального запаса. Затем скорость резко снизилась и в результате за два года потери азота составили 50%. Очевидно, высокая скорость потерь азота в первый год объясняется, как

и в случае с высокой скоростью потери массы этими образцами, содержанием большого количества легко минерализующихся соединений азота в свежем помёте. Этому дополнительно способствовало то обстоятельство, что свежий помёт для компостирования отбирали в загонах, в местах ночного пребывания овец, где он насыщен азотом мочи.

*Изменение соотношения C/N в процессе компостирования.* Показатель C/N в растительных образцах во многих случаях определяет скорость их разложения (Manzoni, Porporato, 2007; Manzoni et al., 2010). Процент оставшейся массы образцов после первого года компостирования, был связан прямой зависимостью с соотношением C/N в образцах до начала компостирования ( $R^2=0.77$  при  $n=6$ ,  $P=0.051$ ). После второго года компостирования корреляция между значениями оставшейся массы и соотношением C/N в образцах до, после первого и второго годов компостирования не обнаружена. Это совпадает с данными о том, что показатель C/N коррелирует со скоростью разложения растительного материала только на начальных стадиях этого процесса, когда деструкции подвергаются крахмал, аминокислоты (McClaugherty, Berg, 1987; Martin et al., 1996). Разложение лигнина (следующая фаза), наоборот, может подавляться при высоком содержании азота (Berg, 2000). Уменьшение значений соотношения C/N со временем (табл. 3) связано с потерями  $CO_2$  при разложении органических остатков, в то время как основная часть минеральных соединений азота вновь иммобилизуются микроорганизмами и накапливаются в разлагающемся материале.

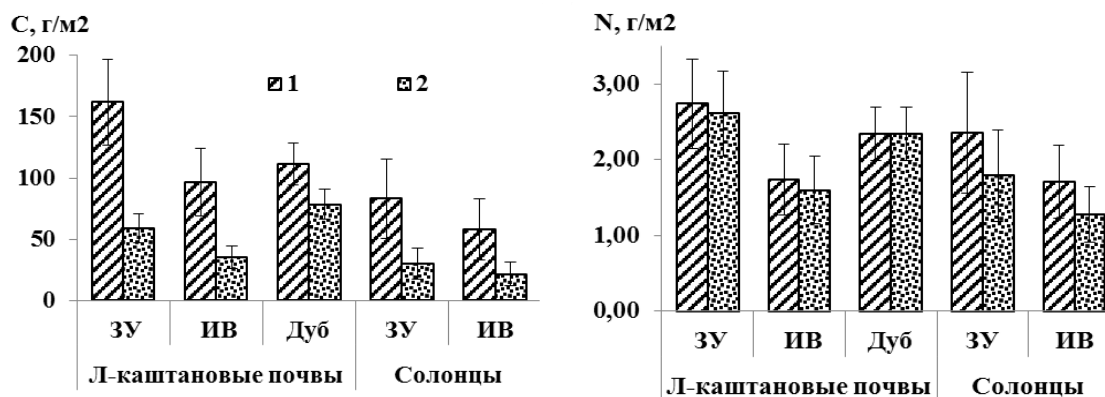
**Таблица 3.** Соотношение C/N в образцах до компостирования, после 1 и 2-х лет компостирования.

Объекты	$C_0/N_0$	$C_1/N_1$	$C_2/N_2$
Ковыль Лессинга <i>Stipa lessingiana</i>	58	30	20
Типчак <i>Festuca valesiaca</i>	60	40	22
Прутняк <i>Kochia prostrate</i>	40	25	15
Полынь черная <i>Artemisia pauciflora</i>	32	27	18
Листья дуба <i>Quercus robur</i>	47	46	33
Помёт овцы	15	18	15

После двух лет компостирования величины соотношения C/N в образцах становятся весьма близкими, изменяясь в пределах 15-22. Исключение представляют листья дуба, высокое значение соотношения C/N в этих образцах после компостирования свидетельствует о наличии трудно разлагающихся углеводов и лигнина.

*Поступление мортмассы, C и N на поверхность почв.* Масса отмерших растительных остатков, поступающих на поверхность почвы, в среднем равна надземной продукции фитомассы в степных и пустынных растительных ассоциациях. Продукция фитомассы в рассматриваемых экосистемах варьировала по годам и составляла в годы наших исследований (2012-2015 гг.) в целинных экосистемах западин и микроповышений в среднем соответственно  $369.7 \pm 79.7$  г/м<sup>2</sup> и  $189.9 \pm 73.3$  г/м<sup>2</sup>. На пастбищном участке ежегодная продукция, остающаяся не съеденной копытными, достоверно ниже этих величин: в 1.7 раза в степных растительных ассоциациях ( $215.4 \pm 62.8$  г/м<sup>2</sup>) и в 1.5 раза в пустынных ( $128.8 \pm 44.3$  г/м<sup>2</sup>). В насаждении дуба опад составил  $242 \pm 36.8$  г/м<sup>2</sup>, что в полтора раза меньше массы опада степных растений. Дополнительное поступление органических веществ в местах выпаса овец связано с накоплением фекалий. Размер накоплений зависел от типа растительной ассоциации и составил в среднем за 4 года наблюдений  $8.4 \pm 1.5$  г/м<sup>2</sup> в степных ассоциациях западин и  $6.1 \pm 1.4$  г/м<sup>2</sup> в пустынных ассоциациях микроповышений.

Опираясь на наши данные по поступлению и разложению растительных остатков и фекалий, можно составить примерную схему распределения и депонирования углерода и азота на поверхности почвы в разных экосистемах. В западинах на заповедном участке поступает больше всего углерода и азота (около  $162$  г/м<sup>2</sup> углерода и  $2.74$  г/м<sup>2</sup> азота), в то время, как на пастбищном участке в 1.7-1.6 раз меньше (рис. 1). В экосистемах микроповышений заповедного участка в среднем поступает  $83$  г/м<sup>2</sup> углерода и  $2.4$  г/м<sup>2</sup> азота. На пастбищном участке – в 1.4 раза меньше углерода и азота (рис. 1). В насаждении дуба поступает в 1.5 раза меньше углерода и в 1.2 раза меньше азота, чем в степных сообществах.



**Рис. 1.** Поступление углерода (А) и азота (Б) и депонирование элементов на поверхности почвы через два года, г/м<sup>2</sup>. Условные обозначения: ЗУ – заповедный участок, ИВ – интенсивный выпас, Дуб – дубовые насаждения, 1 – поступление С, 2 – депонирование С.

*Депонирование С и N на поверхности почвы через 2 года после поступления.* Из полученных нами значений скорости поступления и разложения растительных остатков следует, что в насаждении дуба процесс накопления углерода и азота идет интенсивнее, чем на заповедном участке без выпаса животных. Хотя в насаждении дуба на поверхность почвы поступает в 1.6 раз меньше углерода, чем в травяных сообществах западин, запас углерода в двухлетних органических остатках в 1.3 раза больше. В травяных сообществах всех участков депонирование углерода на поверхности почвы пропорционально поступлению: на пастбищном участке в западинах, запасы углерода в двухлетних растительных остатках в 1.7 раза ниже, а на микроповышениях – в 1.3 раза ниже, чем на заповедном участке.

Процесс накопления азота в подстилке насаждения дуба также идет более интенсивно, чем в естественной степной экосистеме: поступление азота со свежим опадом в насаждении дуба меньше, чем в травяных сообществах западин, а в двухлетних растительных остатках этих экосистем запас азота примерно одинаков. Скорость накопления азота в пустынных фитоценозах меньше, чем в степных: в первых с опадом поступает всего в 1.2 раза меньше азота чем во-вторых, а запас азота в двухлетних растительных остатках в пустынных экосистемах в 1.5 раза меньше, чем в степных. Возможно, это объясняется изначально более высоким содержанием азота в образцах пустынных растений (табл. 2).

*Изменение морфологии профиля, запасов С и N в почвах антропогенных экосистем.* Запасы и структура подстилки (соотношение её слоёв) в естественных и антропогенных экосистемах отражает многообразие факторов, влияющих на депонирование азота и углерода.

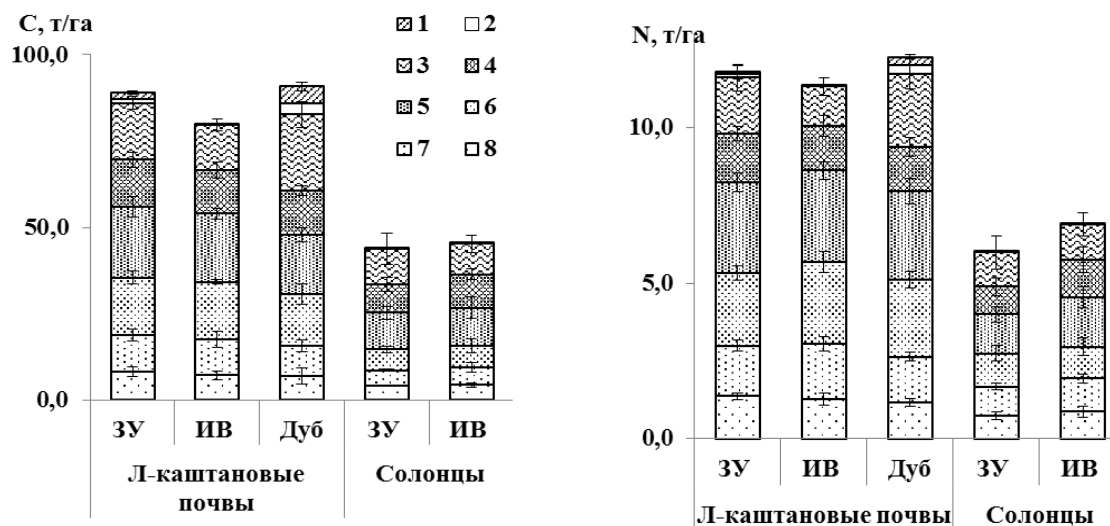
Запасы горизонта L подстилки в степных растительных сообществах на заповедном участке в среднем за 4 года составляли  $670 \pm 195.2$  г/м<sup>2</sup>, на участке с интенсивным выпасом – почти в 9 раз меньше ( $78 \pm 41.4$  г/м<sup>2</sup>). Величина запасов горизонта F-H на заповедном участке –  $1298 \pm 216$  г/м<sup>2</sup>, на пастбищных участках горизонт F-H практически полностью отсутствовал. Такой быстрой деструкции подстилки способствует постоянное её измельчение и втаптывание копытами пасущихся животных. На микроповышениях слой L существенно меньше –  $31.2 \pm 32.5$  г/м<sup>2</sup> на заповедном участке и  $21.2 \pm 26.6$  г/м<sup>2</sup> в местах выпаса, а слой F-H подстилки отсутствует как на заповедном участке, так и на пастбище. В насаждении дуба запас слоя L достигает в среднем  $1957.3 \pm 604.9$  г/м<sup>2</sup>, а слоя F-H –  $1935.5 \pm 596.9$  г/м<sup>2</sup>.

Данные по содержанию углерода в естественных почвах стационара приводятся во многих работах (Колесников, 2004; Колесников, Соколова 2010; Сиземская, 2013; Kulakova, 2012) и близки к значениям, полученным нами. Содержание углерода составляет в верхней 5-сантиметровой части гумусового горизонта нативных лугово-каштановых почв  $3.25 \pm 0.37\%$ , солонцов –  $1.47 \pm 0.23\%$ , закономерно уменьшаясь к низу. Значимые различия в содержании углерода между участками отмечены в слое 0-5 см гумусового горизонта. Содержание углерода в слое 0-5 см на выпасаемых участках уменьшается в западинах с лугово-каштановыми почвами до  $2.47 \pm 0.49\%$ , на солонцах остаётся практически без изменений –  $1.25 \pm 0.18\%$ . Соответственно изменяется и содержание азота –

0.36±0.11% на заповедном участке и 0.24±0.09% на пастбище в западинах. В солонцах микроповышений достоверных различий между заповедным и выпасаемым участками в содержании азота не обнаружено: 0.16±0.03% и 0.16±0.10% на заповедном участке и на пастбище соответственно. В лесных насаждениях содержание углерода и азота в этом слое несколько выше, чем в степных почвах западин – соответственно 4.50±0.36 и 0.48±0.12%.

Основной запас углерода сосредоточен в лугово-каштановых почвах заповедного участка в толще 0-50 см, составляя здесь вместе с подстилкой около 87 т/га, а в солонцах – 44 т/га.

На участках с интенсивным выпасом потери углерода составляют около 7 т/га в лугово-каштановых почвах и близки к нулю в солонцах. Почва под насаждением дуба имела примерно такой же запас углерода, как и почва под степной растительностью (рис. 2).



**Рис. 2.** Запасы углерода (А) и азота (Б) в почвах исследуемых экосистем. Условные обозначения: ЗУ – заповедный участок, ИВ – интенсивный выпас, Дуб – дубовые насаждения, 1 – L, 2 – F-H, 3 – 0-5 см, 4 – 5-10 см, 5 – 10-20 см, 6 – 20-30 см, 7 – 30-40 см, 8 – 40-50 см.

Наибольшие различия в запасах углерода в исследованных экосистемах зафиксированы в подстилке и слое 0-5 см гумусового горизонта. Так, запасы углерода в подстилке составляют в лесном насаждении около 8 т/га, или 9% от запаса углерода в слое 0-50 см и в подстилке, под степной растительностью – около 3 т/га, или примерно 3.4% от общих запасов. На участках с интенсивным выпасом под степной растительностью запасы углерода в подстилке всего 0.22 т/га (0.3%). Запасы углерода в подстилке естественной пустынной растительной ассоциации весьма незначительны – 0.09 т/га, или 0.2% от суммы запасов в подстилке и в почве, а на участке ИВ – 0.06 т/га, или 0.2%.

В слое 0-5 см под насаждением дуба содержится на 5.6 т/га больше углерода, чем в лугово-каштановой почве заповедной степной экосистемы, а на выпасаемом участке – на 3.4 т/га меньше, чем на заповедном участке. В солонцах под пустынными растительными ассоциациями на заповедном участке и на пастбище достоверной разницы в запасах углерода в этом слое нет.

Запасы и закономерность распределения азота в профиле почв антропогенных экосистем также изменяются относительно этих показателей в естественных почвах (рис. 2). Запас азота в почве и подстилке степных экосистем составляет 11.78 т/га. Для лесных почв получено близкое значение запаса азота в почве и подстилке – 12.27 т/га, но характер распределения запасов азота, так же, как и запасов углерода, другой. Запас азота в подстилке и слое 0-5 см почв под насаждением увеличивается на 0.9 т/га, а в слое 5-50 см убывает на – 0.41 т/га относительно почвы под степной растительной ассоциацией. В подстилке лесных почв он достигает 0.54 т/га, а в степной подстилке на 0.34 т/га меньше. Запасы азота в лесной и степной подстилках составляют соответственно 4.4 и 1.4% от общего запаса азота. Запасы азота в слое 0-5 см лугово-каштановых почв под лесом 2.35 т/га, а в этом слое почвы под степным типом растительности – 1.82 т/га.

Запасы азота в лугово-каштановых почвах на участках с интенсивным выпасом несколько меньше, чем в почвах нативных степных экосистем; разница составляет 0.46 т/га, все потери приходятся на подстилку и слой 0-5 см. В условиях заповедного участка в солонцах, запасы азота почти в два раза ниже, чем в лугово-каштановых почвах западин – 5.99 т/га. В солонцах на участках с интенсивным выпасом запасы азота не отличаются от запасов на заповедном участке.

### Выводы

Скорость круговорота углерода в подстилке насаждения дуба черешчатого примерно в 2 раза медленнее, чем в подстилке естественных степных экосистем. Об этом свидетельствуют в 2 раза более низкие значения скорости потери углерода образцами опавших листьев дуба, чем образцами ковыля Лессинга и типчака при компостировании их в естественных условиях. В результате при меньшей в полтора раза массе поступающего на поверхность почвы опада, в насаждении дуба за 2 года депонируется в 1.3 раза больше углерода, чем в естественных степных экосистемах западин.

Существенной разницы в скорости освобождения азота из образцов дубового и травяного опада за 2 года компостирования образцов не обнаружено.

В насаждении дуба черешчатого в условиях полупустыни происходит перераспределение запасов углерода и азота в почвенном профиле относительно нативных почв под степной растительностью. В подстилке и слое 0-5 см гумусового горизонта запасы углерода увеличились примерно на 11 т/га и азота на 1 т/га, а в слое почвы 5-50 см – уменьшение на 9 и 0.4 т/га соответственно относительно почвы под степной растительностью.

Интенсивный выпас животных приводит к уменьшению массы, поступающих на поверхность почвы органических остатков. В степных экосистемах западин поступает в 1.6-1.7 раз меньше углерода и азота, в экосистемах микро повышений – примерно в 1.4 раза меньше этих элементов. В результате этого процесса в профиле лугово-каштановых почв западин наблюдается уменьшение запасов углерода и азота на глубине 0-5 см соответственно на 3.4 и 0.55 т/га и в подстилке на 2.81 и 0.16 т/га. В солонцах, занимающих микроповышения, достоверные изменения не выявлены.

Начальные различия в химическом составе помёта и изученной группы злаков и полукустарничков, а также различия в анатомии этих растений, сказываются на скорости потерь массы образцами только в первый год компостирования. За два года образцы теряют приблизительно одинаковую массу. При этом потери углерода и азота в образцах разных растений и помёта различаются между собой.

*Авторы искренне благодарны к.б.н., ст. н. сотруднику ИЛАН РАН А.В. Колесникову за помощь в организации полевого опыта.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абатуров Б.Д. 1999. Критические параметры качества растительных кормов для сайгаков (*Saiga tatarica*) на естественном пастбище в полупустыне // Зоологический журнал. Т. 78. Вып. 8. С. 999-1010.

Абатуров Б.Д. 2005. Кормовые ресурсы, обеспеченность пищей и жизнеспособность популяций растительноядных млекопитающих // Зоологический журнал. Т. 84. № 10. С. 125-1271.

Абатуров Б.Д., Дмитриев И.А., Жаргалсайхан Л., Омаров К.З. 2008. Утилизация фитомассы и отложение фекалий копытными млекопитающими на степных пастбищах Восточной Монголии // Известия РАН. Серия Биологическая. № 3. С. 350-359.

Абатуров Б.Д., Кулакова Н.Ю. 2010. Роль выпаса животных и степных палов в круговороте азота и зольных элементов в степных пастбищных экосистемах // Аридные экосистемы. Т. 16. № 2. С. 54-64.

Абатуров Б.Д., Нухимовская Ю.Д. 2013. Опыт количественной оценки продукции надземной фитомассы и ее составляющих на степном пастбище // Аридные экосистемы. Т. 19. № 4 (57). С. 5-24.

Биогеоценотические основы освоения полупустыни Северного Прикаспия. 1974. / Ред. А.А. Роде. М.: Наука. 360 с.

Всеволодова-Перель Т.С., Сиземская М.Л. 2005. Лесная подстилка и роль почвообитающих беспозвоночных в её формировании в условиях глинистой полупустыни Северного Прикаспия // Почвоведение. № 7. С. 864-870.

Душков В.Ю. 1981. Опыт восстановления усыхающих насаждений вяза мелколистного на темноцветных почвах падин // Лесоведение. № 6. С. 51-58.

Каменецкая И.В. 1952. Естественная растительность Джаныбекского стационара // Труды Комплексной научной экспедиции по вопросам полезащитного лесоразведения. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР. С. 101-162.



- Колесников А.В.* 2004. Закономерности катионного обмена в лугово-каштановых почвах Северного Прикаспия (на примере почв Джаныбекского стационара). Автореф. дис. .... канд. биол. наук. Москва: МГУ. 24 с.
- Колесников А.В., Соколова Т.А.* 2010. Некоторые химические свойства лугово-каштановых почв залежного участка на территории Джаныбекского стационара // Аридные экосистемы. Т. 16. № 5. С. 67-78.
- Кулакова Н.Ю.* 2008. Влияние искусственных лесных экосистем на состояние основных элементов питания в почвах глинистой полупустыни Северного Прикаспия: на примере Джаныбекского стационара. Автореф. дис. .... канд. биол. наук. М.: Институт лесоведения РАН. 24 с.
- Кулакова Н.Ю., Абатуров Б.Д.* 2010. Элементы круговорота азота в ландшафтах Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. № 2. С. 151-159.
- Сапанов М.К., Сиземская М.Л.* 2015. Изменение климата и динамика целинной растительности в Северном Прикаспии // Поволжский экологический журнал. № 3. С. 307-320.
- Сиземская М.Л., Сапанов М.К.* 2010. Современное состояние экосистем и стратегия адаптивного природопользования в полупустыне Северного Прикаспия // Аридные экосистемы. Т. 16. № 5 (45). С. 15-24.
- Сиземская М.Л.* 2013. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. 276 с.
- Тутлянова А.А.* 1983. Методология и методы оценки чистой первичной продукции и построения баланса химических элементов в экосистемах // Теоретические основы и опыт экологического мониторинга / Ред. В.Е. Соколова, Н.И. Базилевич. М.: Наука. С. 63-76.
- Berg B.* 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // For Ecol Manage. Vol. 133. P. 13-22.
- Kulakova N.* 2012. Impact of plant species on the formation of carbon and nitrogen stock in soils under semi-desert conditions // European Journal of Forest Research. Vol. 131. Issue 6. P. 1717-1726.
- Manzoni S., Porporato A.* 2007. A theoretical analysis of nonlinearities and feedbacks in soil carbon and nitrogen cycles // Soil Biology and Biochemistry. Vol. 39. Issue 7. P. 1542-1556.
- Manzoni S., Trofymow J.A., Jackson R.B., Porporato A.* 2010. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter // Ecological Monographs. Vol. 80. Issue 1. P. 89-106.
- Martin A., Gallardo J.F., Santa Regina I.* 1996. Long-term leaf decomposition in four oak forests located at the 'Sierra de Gata' mountains in Spain // Cbap CE et al (eds) Humic substances and organic matter in soil and water environments. IHSS—University of Minnesota. StPaul. USA. P. 119-130.
- McClougherty C, Berg B.* 1987. Cellulose, lignin and nitrogen concentrations as rate regulating factors in late stages of forest litter decomposition // Pedobiologia. Vol. 30. No. 2. P. 101-112.

## COMPONENTS OF C AND N CYCLE IN NATURAL AND ANTHROPOGENIC ECOSYSTEMS OF SEMI-DESERTS OF THE NORTHERN CASPIAN AREA

© 2017. N.Yu. Kulakova\*, B.D. Abaturov\*\*, Yu.D. Nukhimovskaya\*\*

\*Institute of Forest Science RAS

Russia, 143030, Moscow region, Uspenskoe s., Soviet str., 21. E-mail: nkulakova@mail.ru

\*\*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS

Russia, 119071, Moscow, Leninsky prospect, 33

The changes in the amounts and the dynamics of deposition of carbon and nitrogen in the soil surface of anthropogenic pasture and forest ecosystems created on the places of natural steppe and desert vegetation associations in the Northern Cis-Caspian area are traced. It is shown that two years after the input, the litter of oak stands (*Quercus robur*) deposited 1.3 times more carbon and about the same amount of nitrogen compared to the steppe litter, despite the fact that the mass of litter input in the forest plantation is 1.4 times less than in the grass ecosystem. At close values of carbon and nitrogen stocks in the soil under steppe vegetation and plantation, the redistribution of carbon and nitrogen stocks in the forest soil is marked. The carbon stocks in the forest litter and 0-5 cm layer make up 33% of the stocks in the litter and in 0-50 cm soil layer, and under the steppe vegetation – 22%; the nitrogen stocks make up 2.9% and 2.0% respectively. Due to intensive grazing, ecosystems of micro-depressions obtain 1.6-1.7 times, ecosystem of micro-elevations – 1.4 times less carbon and nitrogen than those of the virgin plots. Reliable decrease of stocks of carbon and nitrogen was observed in the litter and 0-5 cm layer of meadow-chestnut soils of micro-depressions under the pressure of intensive grazing.

**Keywords:** C and N cycle, forest plantations, grazing, semi-desert.