

УДК 631.472.54 + 631.41
doi: 10.17223/19988591/41/2

И.А. Дубровина

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск, Россия

Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0221-2017-0047.

Представлены результаты мониторингового исследования влияния сельскохозяйственного использования на содержание общего углерода, азота и фосфора в верхних горизонтах почв разного генезиса. Исследованы почвы сельскохозяйственных угодий и лесные почвы прилегающих территорий в среднетаежной подзоне Карелии. Показано, что антропогенная трансформация оказывает различное влияние на содержание основных биогенных элементов в верхних горизонтах почв в зависимости от происхождения и состава почвообразующих пород. Так, в органогенных горизонтах почв подзолистого ряда существует тенденция увеличения содержания общего углерода, азота и фосфора. В почвах с торфяными горизонтами доминирует противоположный процесс, когда при активном антропогенном воздействии в них значительно снижается содержание углерода и азота в верхних горизонтах и в целом повышается степень минерализации торфа. Антропогенное воздействие не влияет на содержание валового фосфора в торфяных почвах. Наиболее устойчивыми к антропогенным влияниям являются почвы на иунгитовых породах, где изменение содержания основных биогенных элементов незначительно.

Ключевые слова: *пахотный горизонт; сельхозугодья; биогенные элементы; Podzols; Retisols; Umbrisols; Histosols.*

Введение

Антропогенное воздействие на почвы является одним из самых быстрых и мощных факторов эволюции почвенного покрова. При сельскохозяйственном освоении верхние горизонты почв подвергаются механическому и химическому воздействию, вследствие чего нарушаются баланс поступления органических и минеральных веществ и микробиологическая активность почв. Особенно сильные изменения претерпевают торфяные почвы, подвергшиеся коренным мелиорациям. Естественные растительные сообщества заменяются монодоминантными агроэкосистемами с ежегодным отчуждением фитомассы. Весь этот комплекс факторов приводит к изменениям в морфологическом строении профиля, в химических, физико-химических

свойствах и составе органического вещества, в водном и тепловом режимах почв. Это позволяет выделять в данных почвах особый – антропогенный – процесс почвообразования [1–2]. Первым всю силу антропогенного воздействия принимает на себя верхний горизонт почвы. Пахотный горизонт наиболее активно изменяется под влиянием агротехнических мероприятий, отражая особенности антропогенного почвообразования в морфологических признаках, которые могут сохраняться в почвах длительное время [3–4]. Устойчивость агрогенных признаков зависит от многих факторов, среди которых на первом месте стоят степень трансформации почвы и зональные биоклиматические условия. В таежной зоне признаки пахотных горизонтов в залежи под лесом сохраняются достаточно длительный период времени [5–6]. Следует отметить, что в Карелии строение профиля как минеральных антропогенно-преобразованных, так и мелиорированных гидроморфных почв значительно отличается от естественных аналогов [7–8]. В бореальных экосистемах сравнительные исследования свойств природных и антропогенно-преобразованных почв немногочисленны [9–11]. Недостаточно изучено содержание основных биогенных элементов, хотя известно, что любые изменения в землепользовании ведут к изменению запасов углерода и других биогенов в почвах, поэтому необходим мониторинг их содержания для осуществления эффективного контроля и управления почвенными ресурсами. В настоящее время исследования, посвященные геохимическим циклам биогенных элементов, особенно актуальны в связи с глобальными изменениями климата [12–13]. Основу круговорота биогенов в биосфере составляют процессы ассимиляции и распада веществ, сопровождаемые поглощением и выделением энергии, и наиболее четко это прослеживается в цикле углерода. Малый биологический круговорот служит одним из механизмов, обеспечивающих устойчивость природной среды, и прежде всего это касается баланса углерода, когда увеличение его содержания в атмосфере сопровождается таким же ростом поглощения биотой суши и океана [14–15]. Поскольку почва является многокомпонентной средой и служит центральным звеном биологического круговорота веществ, то во многом именно состояние почвы определяет стабильность наземных экосистем.

Цель работы – мониторинг содержания основных биогенных элементов (N, P, C) в верхних горизонтах широкого спектра антропогенно преобразованных почв на различных почвообразующих породах, а также в целинных почвах под лесом. Результаты исследования позволяют выявить тенденции почвенных процессов в антропогенно-измененных почвах и оценить последствия антропогенного влияния на баланс биогенных элементов различных почв Карелии.

Материалы и методики исследования

Исследование проведено на четырех ключевых участках в Южной Карелии, что позволило охватить разнообразие почв сельскохозяйственных

угодий в зависимости от геоморфологических условий и почвообразующих пород (рис. 1).

Участок № 1 ($60^{\circ}52'51''\text{N}$; $32^{\circ}58'48''\text{E}$) в районе дер. Рыпушкалицы расположен в пределах Олонецкой равнины, занимающей широкую террасу на восточном побережье Ладожского озера. Равнина сложена пылеватыми суглинками и ленточными глинами, подстилаемыми валунным суглинком. Встречаются также более молодые озерные отложения. Почвы формируются в условиях периодически избыточного длительного увлажнения, преобладают глееватые и глеевые разности подзолистых почв.

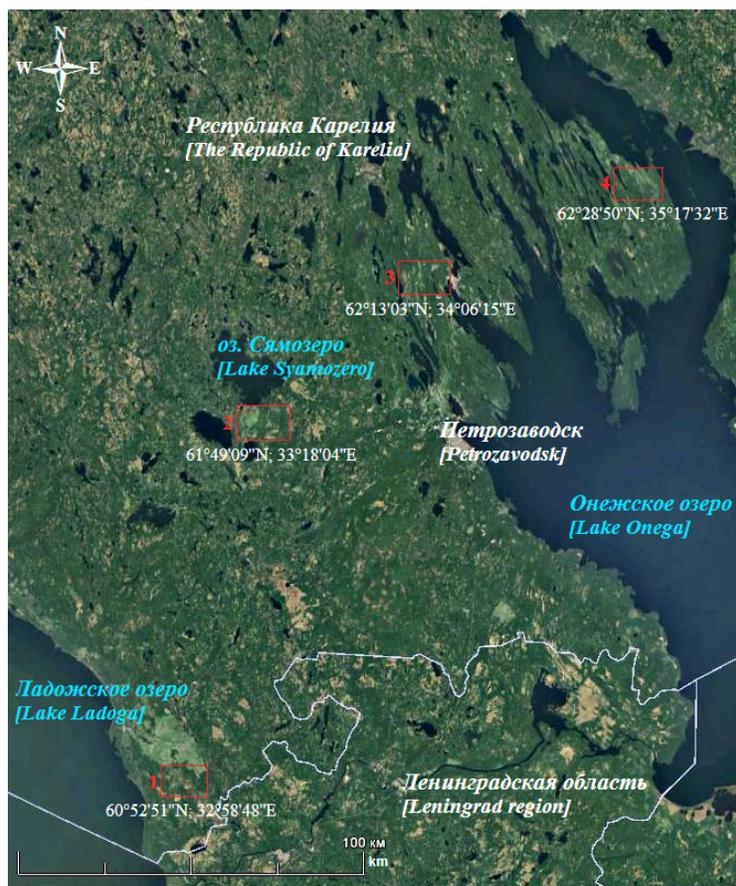


Рис. 1. Районы исследования: 1 – Олонецкая равнина; 2 – Шуйская низина; 3 – Шуйско-Сунский водораздел; 4 – Заонежский полуостров
[Fig. 1. Research areas: 1 - Olonets plain; 2 - Shuyskaya lowland; 3 - Shuysko-Sunsky watershed; 4 - Zaonezhsky peninsula]

Участок № 2 (61°49'09"N; 33°18'04"E) в районе пос. Эссоила представлен западным сектором Шуйской аккумулятивной озерно-ледниковой впадины – осушенным болотным массивом Корзинская низина с преобладанием залежи низинного типа с хорошо разложившимся торфом, подстилаемым озерно-ледниковыми ленточными глинами. В северо-западной части низины распространены легкие по гранулометрическому составу песчаные и супесчаные моренные и флювиогляциальные отложения. Возвышенные формы рельефа заняты подзолистыми почвами с признаками гумусово-аккумулятивного процесса.

Участок № 3 (62°13'03"N; 34°06'15"E) в районе дер. Вороново расположен на песчаной аккумулятивной озерно-ледниковой равнине, лежащей в пределах Шуйско-Сунского водораздела. Почвообразующие породы – озерные пески, а в долине реки Суна – суглинки и глины. Распространены сильноподзолистые почвы, а также подзолы иллювиально-железистые.

Участок № 4 (62°28'50"N; 35°17'32"E) в районе пос. Толвуя характеризуется денудационно-тектоническим холмисто-грядовым рельефом, типичным для Заонежского полуострова. Коренные породы представлены шунгитовыми сланцами, распространенными в основном на юго-востоке Заонежья. На большей части территории почвообразование идет на элюво-делювии шунгитовых сланцев и шунгитовой морене, что способствует развитию специфических темноцветных почв. На полуострове практически отсутствуют почвы подзолистого ряда [16–17].

В целом климат Карелии умеренно-холодный, переходный от морского к континентальному. Исследованные участки лежат в пределах Южного агроклиматического района с наиболее благоприятными условиями для растениеводства. Характеризуется средними температурами января в пределах от –8 до –11 °С, июля +16 °С. Продолжительность безморозного периода составляет 115–130 дней. Сумма эффективных температур за вегетационный период составляет 1 500 °С при 650 мм осадков в год. Естественная растительность относится к среднетаежной подзоне зеленомошных хвойных лесов – ель и сосна с примесью мелколистных пород деревьев [18–19].

Полевые исследования проведены методами традиционной почвенной съемки. Почвенные разрезы закладывали на сельскохозяйственных угодьях (сенокосы, пастбища, залежь до 5 лет) и на прилегающих территориях под естественной лесной растительностью. Генеральная выборка составляет 73 разреза. Почвы диагностировали согласно Классификации и диагностике почв России 2004 г. [20]. Образцы отбирали из средней части верхних горизонтов почв. В мощных горизонтах анализировали смешанный образец с глубин 0–20 см и > 20 см. В почвенных образцах определяли рН солевое (KCl) потенциметрически, содержание общего азота – по Кьельдалю и валового фосфора – по ГОСТ 26261–84 [21], содержание общего углерода – методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе TOC-L CPN (Shimadzu, Япония). Для статистической обработки данных использовали *t*-тест Стьюдента для сравнения средних в не-

зависимых выборках при анализе различных показателей в минеральных почвах под лесом и под сельхозугодьями. Для анализа различий в почвах сельхозугодий (отдельно в минеральных почвах и почвах на торфах) применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным анализом по критерию Тьюки. Статистический анализ данных проводился с использованием программы PAST Statistics [22].

Результаты исследования и обсуждение

Умеренно холодный и влажный климат Карелии, преобладание лесной растительности способствуют распространению зонального подзолистого процесса почвообразования и заболачивания. Почвенный покров отличается сложным строением, высокой степенью мозаичности и мелкоконтурности. В значительной степени почвенное разнообразие обусловлено различиями в почвообразующих породах и сильной расчлененностью рельефа. Минеральные почвы сельскохозяйственных угодий приурочены в основном к четвертичным отложениям последнего оледенения. Строение профиля и свойства этих почв в большой мере зависят от гранулометрического состава пород. Особняком стоят интразональные почвы, сформированные на шунгитовых сланцах и морене. Поэтому для анализа минеральные почвы были сгруппированы следующим образом: почвы на песках и супесях, на суглинках и глинах и почвы на шунгитах (табл. 1).

Естественные почвы на песчаных и супесчаных породах – это мало мощные дерново-подзолы иллювиально-железистые (AY-E-BF-C) и дерново-подбуры иллювиально-железистые (AY-BF-C). Почвы сильноокислые (среднее pH 3,7), мощность серогумусового горизонта 2–8 см. Содержание углерода, азота и фосфора самое низкое среди изученных почв. Антропогенно измененные почвы на легких породах в основном представляют собой короткопрофильные агроземы светлые типичные (P-C) и агроземы альфегумусовые иллювиально-железистые (P-BF-C). Это песчаные и супесчаные слабоокислые почвы, pH в среднем составляет 5,3. Мощность агрогумусовых горизонтов сильно варьирует и в некоторых случаях не соответствует агроземам (> 25 см). Это объясняется изначальной малой мощностью верхних горизонтов лесных почв, поэтому они отнесены к отделу агроземов, а не агрообраземов. Содержание изученных биогенных элементов значительно выше (статистически достоверные отличия с высоким уровнем значимости), чем в естественных почвах на легких породах. Известно, что в целом целинные почвы значительно богаче органическим веществом, чем сельскохозяйственные, но органическое вещество лесных почв сосредоточено в основном в лесной подстилке в составе слабо гумифицированных соединений, а в минеральных горизонтах его содержание незначительно [23]. Соотношение C : N в почвах на песках и супесях узкое, средние значения близки в естественных и антропогенных почвах и составляют 13–14.

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

**Статистические показатели органогенных и гумусовых
горизонтов минеральных почв разных землепользований**
[Statistical indicators of the topsoil of mineral soils for different land use]

Показатели [Indicators]	Почвообразующие породы [Parent rocks]	Лес [Forest]				Сельхозугодья [Farmland]			
		<i>n</i>	<i>M</i> ± <i>m</i>	min-max	<i>V</i> , %	<i>n</i>	<i>M</i> ± <i>m</i>	min-max	<i>V</i> , %
Мощность горизонта, см [The horizon thickness, cm]	Пески и супеси [Sand and sandy loam]	6	5,17 ± 1,05*	2–8	49,60	7	24,43 ± 2,87*	14–35	31,07
	Суглинки и глины [Loam and clay]	6	5,83 ± 0,95*	3–10	39,71	14	25,14 ± 1,93*	11–35	28,72
	Шунгитовые [Schungite]	6	20,83 ± 2,14	15–28	25,11	13	22,31 ± 1,89	12–34	30,54
С, %	Пески и супеси [Sand and sandy loam]	6	1,35 ± 0,09**	1,12–1,76	16,96	7	2,92 ± 0,42**	1,41–4,30	38,46
	Суглинки и глины [Loam and clay]	6	2,92 ± 0,47	1,53–4,84	39,25	14	3,44 ± 0,30	1,98–6,15	32,26
	Шунгитовые [Schungite]	6	3,84 ± 0,35	3,11–5,37	22,62	13	4,53 ± 0,48	2,18–7,71	38,34
N, %	Пески и супеси [Sand and sandy loam]	6	0,11 ± 0,01*	0,08–0,14	19,06	7	0,26 ± 0,03*	0,18–0,40	29,88
	Суглинки и глины [Loam and clay]	6	0,15 ± 0,02**	0,10–0,19	24,22	14	0,30 ± 0,03**	0,17–0,53	42,19
	Шунгитовые [Schungite]	6	0,37 ± 0,03	0,25–0,46	20,19	13	0,40 ± 0,03	0,20–0,53	24,04
C : N	Пески и супеси [Sand and sandy loam]	6	14,06 ± 0,64	12,54–16,33	11,13	7	13,46 ± 1,89	7,15–20,44	37,16
	Суглинки и глины [Loam and clay]	6	23,87 ± 3,99**	10,50–35,29	41,03	14	14,97 ± 1,40**	4,54–22,24	34,94
	Шунгитовые [Schungite]	6	12,52 ± 1,16	9,17–16,57	22,64	13	13,01 ± 0,85	7,33–17,30	23,57
P ₂ O ₅ , %	Пески и супеси [Sand and sandy loam]	6	0,06 ± 0,02*	0,01–0,10	60,77	7	0,17 ± 0,02*	0,08–0,22	28,08
	Суглинки и глины [Loam and clay]	6	0,11 ± 0,02***	0,01–0,16	48,47	14	0,16 ± 0,01***	0,09–0,27	32,33
	Шунгитовые [Schungite]	6	0,23 ± 0,03	0,17–0,33	26,42	13	0,22 ± 0,02	0,13–0,29	24,10

Примечание. *V* – коэффициент вариации. Жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия (для показателей в строке) между почвами на идентичных породах для разных землепользований. Уровни значимости: * *p* < 0,001; ** *p* < 0,01; *** *p* < 0,05.
Note. *V* - Coefficient of Variation. Significant differences (for indicators in the line) between soils on identical rocks for various land use are in bold with the following levels: * *p* < 0.001; ** *p* < 0.01; *** *p* < 0.05.

Почвы на суглинках и глинах относятся к отделу текстурно-дифференцированных. Под лесом формируются дерново-подзолистые типичные (AY-EL-BEL-BT-C) и их глееватые аналоги. Почвы сильноокислые, среднее pH 3,9, мощность серогумусового горизонта 3–10 см. Эти значения близки к лесным почвам на легких породах, но содержание биогенных элементов в этих почвах несколько выше. Агрочувствы в зависимости от степени антропогенного воздействия классифицируются как агродерново-подзолистые типичные (P-BEL-BT-C) и их глееватые аналоги либо агроземы текстурно-дифференцированные глееватые (P-BTg-Cg). Почвы в основном легко- и среднесуглинистые, слабоокислые, pH 5,1, агрогумусовые горизонты имеют среднюю мощность 25 см. Содержание углерода, азота и фосфора выше, чем в почвах под лесом. Различия значений статистически значимы для N ($p < 0,01$) и P ($p < 0,05$) и статистически незначимы для углерода (см. табл. 1). Соотношение C : N в почвах под лесом значительно шире, чем под сельхозугодьями, где органическое вещество обогащено азотом.

Особняком стоят почвы, сформированные на шунгитовых породах. Шунгит – это минерал черного цвета с высоким содержанием углерода, он легко подвергается выветриванию и разрушению. Богатство элементного состава и благоприятные тепловые свойства шунгитовых пород повышают плодородие почв, сформированных на них [17]. Все изученные почвы на элювии шунгита и шунгитовой морене легкосуглинистые, со слабодифференцированным профилем, разной степени каменистости. Почвы относятся к отделу органо-аккумулятивных почв. Под лесом формируются серогумусовые темнопрофильные (AY-Cu), антропогенные аналоги – агрогумусовые темнопрофильные (P-AY-Cu). Все почвы имеют реакцию, близкую к нейтральной, pH в среднем 5,7. Верхние горизонты почв имеют практически одинаковую среднюю мощность – 20 см под лесом, 22 см под сельхозугодьями. Содержание биогенных элементов самое высокое среди минеральных почв, однако значения для естественных и агропочв практически не имеют различий. Средние значения C : N для шунгитовых почв составляют 12–13.

Представленные данные свидетельствуют, что антропогенная трансформация минеральных почв подзолистого ряда приводит к значительным изменениям в строении профиля почв и его свойств. В разы увеличивается мощность верхнего органогенного горизонта (с 5 до 25 см), сильноокислая pH (3,7–3,9) повышается до слабоокислой (5,1–5,3). В супесчаных почвах значимо повышается содержание углерода ($p < 0,01$), азота ($p < 0,001$) и фосфора ($p < 0,001$). В суглинистых почвах усиливается минерализация органического вещества (C : N изменяется с 23,8 в лесных до 14,9 в агропочвах), а также значимо повышается содержание азота ($p < 0,01$) и фосфора ($p < 0,05$). Почвы на шунгитовых породах менее подвержены видимым изменениям при агротрансформации. Мощность верхнего горизонта и pH имеют близкие значения для разных землепользований. Повышение содержания углерода, азота и фосфора в почвах под сельхозугодьями незначительно и статистически незначимо.

Если сравнивать содержание биогенов в агрогумусовых горизонтах минеральных агропочв на различных породах, то в целом они выстраиваются в ряд шунгитовые > суглинистые > супесчаные. Наибольшие значения по всем показателям имеют шунгитовые почвы. В них статистически значимо более высокое содержание азота, чем в супесчаных ($p < 0,005$) и суглинистых ($p < 0,05$) почвах, углерода чем в супесчаных ($p < 0,05$), фосфора – чем в суглинистых ($p < 0,01$). Различия в содержании биогенных элементов в суглинистых и супесчаных агропочвах статистически незначимы.

Изученные торфяные массивы представляют собой сельскохозяйственные угодья с различной степенью трансформации торфяной залежи низинного и переходного типов. Почвы были сгруппированы по мощности торфа (< или ≥ 50 см), и в свою очередь торфяные почвы ≥ 50 см разделены по степени антропогенной трансформации верхнего горизонта (табл. 2).

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

**Статистические показатели агрогенных горизонтов
торфяных почв под сельхозугодьями
[Statistical indicators of the topsoil of peat soils under farmland]**

Показатели [Indicators]	Почвы и мощность торфяной залежи [Soils and peat deposit thickness]	n	$M \pm m$	min – max	V, %
Мощность горизонта, см [The horizon thickness, cm]	Торфяно-минеральные (< 50 см) [Peat-mineral soils (< 50 cm)]	5	$28,00 \pm 5,36$	10–39	42,78
	Торфоземы (≥ 50 см) [Torfozems (≥ 50 cm)]	10	$35,50 \pm 3,15$	20–50	28,02
	Торфяные (≥ 50 см) [Peat soils (≥ 50 cm)]	6	$18,00 \pm 1,00$	15–20	13,61
С, %	Торфяно-минеральные (< 50 см) [Peat-mineral soils (< 50 cm)]	5	$12,69 \pm 1,42$	9,32–17,70	24,97
	Торфоземы (≥ 50 см) [Torfozems (≥ 50 cm)]	10	$17,19 \pm 3,78$	4,47–34,28	69,47
	Торфяные (≥ 50 см) [Peat soils (≥ 50 cm)]	6	$47,91 \pm 2,31$	38,70–54,84	11,79
N, %	Торфяно-минеральные (< 50 см) [Peat-mineral soils (< 50 cm)]	5	$0,48 \pm 0,04$	0,33–0,60	20,38
	Торфоземы (≥ 50 см) [Torfozems (≥ 50 cm)]	10	$0,80 \pm 0,14$	0,21–1,58	56,94
	Торфяные (≥ 50 см) [Peat soils (≥ 50 cm)]	6	$1,64 \pm 0,12$	1,11–1,93	17,66
C : N	Торфяно-минеральные (< 50 см) [Peat-mineral soils (< 50 cm)]	5	$31,17 \pm 3,33$	21,39–41,30	23,90
	Торфоземы (≥ 50 см) [Torfozems (≥ 50 cm)]	10	$24,61 \pm 2,20$	15,56–36,13	28,33
	Торфяные (≥ 50 см) [Peat soils (≥ 50 cm)]	6	$35,15 \pm 3,49$	28,22–50,83	24,28
P ₂ O ₅ , %	Торфяно-минеральные (< 50 см) [Peat-mineral soils (< 50 cm)]	5	$0,26 \pm 0,05$	0,09–0,35	38,70
	Торфоземы (≥ 50 см) [Torfozems (≥ 50 cm)]	10	$0,28 \pm 0,03$	0,16–0,40	30,72
	Торфяные (≥ 50 см) [Peat soils (≥ 50 cm)]	6	$0,27 \pm 0,07$	0,10–0,54	59,99

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 1.

[Note. For symbols see Table 1].

Мощность торфа в 50 см принята в классификации [20] границей между стволами органогенных и постлитогенных почв. Часть почв органогенного ствола сохранила практически естественное строение верхних горизонтов и диагностирована как торфяные эутрофные типичные (TE-ТТ) и торфяные эутрофные иловато-торфяные (TE_{mg}-ТТ). Почвы сильнокислые, рН в среднем составляет 4,3. Мощность эутрофно-торфяных горизонтов невелика и составляет 15–20 см. Почвы характеризуются высоким содержанием углерода (48%) и азота (1,6%) и слабой разложённостью органического вещества, среднее значение C : N составляет 35. Данные почвы по строению и свойствам близки к целинным низинным торфяникам [24]. Объяснить это можно тем, что на данных участках верхний горизонт изначально подвергался минимальной антропогенной трансформации и в настоящее время они имеют слабую нагрузку в процессе сельскохозяйственного производства (использование под сенокосы).

В свою очередь, почвы с мощностью торфа ≥ 50 см и верхним горизонтом, сильно преобразованным в ходе освоения, диагностированы как торфоземы агроминеральные (PTR-ТТ) в отделе торфоземы. Мощность агроторфяно-минеральных горизонтов PTR составляет порядка 35 см, это примерно в 2 раза выше, чем средняя мощность горизонтов TE торфяных почв. Это среднекислые почвы (рН 5,0) с более низкими содержанием углерода ($p < 0,001$), азота ($p < 0,005$) и соотношением C : N ($p < 0,01$), чем в торфяных эутрофных почвах. Средние значения C : N составляют 24, это самый узкий показатель для почв, развитых на торфах. Содержание углерода и азота в торфоземах неоднородно и представляет собой широкий разброс величин, характерных как для минеральных, так и для торфяных почв. Эта особенность торфоземов связана с историей их освоения, в ходе которого верхняя часть торфяной залежи подвергалась интенсивному перемешиванию с песком, глиной и известью, что послужило формированию агроторфяно-минеральных горизонтов PTR.

Почвы с мощностью торфа < 50 см диагностированы как агроторфяно-глееземы минерально-торфяные (PT_{mg}-T-G-CG) в отделе глеевых либо агроземы минерально-торфяные (PT_{mg}-C) в отделе агроземы. Почвы имеют значительно трансформированные верхние горизонты PT_{mg}, мощность которых сильно варьирует и в среднем составляет 28 см. Почвы среднекислые (рН 4,9), имеют более низкое содержание углерода ($p < 0,001$) и азота ($p < 0,005$), чем торфяные эутрофные почвы. Значения C:N колеблются от 21 до 41, в среднем составляя 31. В данных почвах самое низкое содержание биогенных элементов среди изученных торфяных почв. Статистически значимых различий в содержании углерода и азота между торфяно-минеральными почвами и торфоземами не наблюдается. В целом по содержанию основных биогенов в верхних горизонтах торфяные почвы выстраиваются в ряд торфяные > торфоземы > торфяно-минеральные. Содержание фосфора во всех торфяных почвах сильно варьирует, но среднее значение примерно

одинаково и составляет 0,26–0,28%. Это достаточно высокий показатель, который характерен для торфяников, обогащенных фосфатами.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о наличии разнонаправленных тенденций в изменении содержания биогенных элементов антропогенно измененных почв Южной Карелии. Они обусловлены в первую очередь различиями в составе и свойствах почвообразующих пород. Полученные данные отражают изменения в содержании основных биогенных элементов в минеральных почвах подзолистого ряда при сельскохозяйственном использовании, характерные для бореальных условий. В верхних горизонтах почв происходит накопление углерода и связанного с ним азота, а также фосфатов [2, 9]. Исследованные нами почвы подтверждают эту зависимость, так как под многолетними лугово-пастбищными угодьями протекает аккумулятивно-гумусовый процесс, при котором происходит накопление углерода и биогенных элементов [1, 11]. Для почв на богатых углеродом шунгитовых породах изменения при смене землепользования как в строении профиля, так и в содержании элементов незначительны. Сходная динамика наблюдается при окультуривании черноземных и темно-каштановых почв с высоким содержанием гумуса [2]. Известно, что по запасам гумуса, его составу и насыщенности основаниями шунгитовые почвы близки к черноземам [16–17]. В данных почвах изначально высокий уровень плодородия, развиты буферные свойства, которые сглаживают антропогенные воздействия при смене землепользования. В отличие от минеральных почв, сформированные в условиях гидроморфности торфяные почвы при осушении и сельскохозяйственном использовании подвергаются различной степени деструкции и деградации. Наиболее уязвимым в торфяных почвах является легкоминерализуемое органическое вещество. Так, снижение величины $C : N$ в целом характерно для сельскохозяйственных почв, однако в бореальных условиях оно наиболее проявлено в гидроморфных почвах, когда при осушении и освоении значительно повышается микробиологическая и ферментная активность почв. Происходят увеличение интенсивности процессов биогеохимического цикла и ускорение ритма почвообразования [2], что приводит к быстрой минерализации органического вещества торфяных почв. Скорость деструкции торфяников определяется климатическими условиями, составом торфа и характером использования почв [24]. Изученный нами массив торфяных почв однороден по составу торфа, находится в сходных климатических и гидротермических условиях, имеет схожий характер землепользования. Несмотря на это, наблюдаются существенные различия в степени деструкции верхних горизонтов, а также в содержании в них углерода и азота. Вариабельность значений изученных показателей для нарушенных торфяных горизонтов высокая, что отражает неоднородность искусственно сформированного почвенного покрова. Данные различия в строении и свойствах торфяных почв определяются в основном мероприятиями по их окультуриванию на этапе освоения [7–8], в частности количеством и составом внесенных минеральных компонентов.

Заключение

В зависимости от генезиса почв и состава почвообразующих пород антропогенная трансформация оказывает различное влияние на содержание основных биогенных элементов в верхних горизонтах почв Южной Карелии. Общей тенденцией при антропогенном влиянии являются увеличение мощности верхних органогенных горизонтов и повышение их рН (КС1). Это правило не распространяется на почвы на шунгитовых породах, где различия для почв в разных землепользованиях незначительны. Значения С:N в минеральных почвах в целом достаточно узкие и имеют близкие значения для разных землепользований. Исключения составляют лесные почвы на суглинках, имеющие повышенный гидроморфизм и слабую степень минерализации органического вещества, которая возрастает в почвах сельхозугодий. В холодных гумидных условиях Карелии при антропогенном воздействии в органогенных горизонтах почв подзолистого ряда существует тенденция увеличения содержания основных биогенных элементов. Для почв с торфяными горизонтами характерен противоположный процесс, когда при активном антропогенном воздействии в них значительно снижается содержание углерода и азота в верхних горизонтах, повышается степень минерализации торфа. Антропогенное воздействие не влияет на содержание валового фосфора в торфяных почвах. В шунгитовых почвах увеличение содержания основных биогенных элементов незначительно или не проявлено (нет статистически значимых отличий). Почвы на углеродсодержащих шунгитовых породах являются наиболее устойчивыми к антропогенным влияниям ввиду их высоких буферных способностей.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории экологии и географии почв ИБ КарНЦ РАН ведущему почвоведу Т.В. Богдановой, старшему биологу А.Г. Каиштановой, старшему биологу Л.И. Скороходовой и главному физику А.А. Хомиченко, за помощь в проведении аналитических исследований.

Литература

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск : Ойкумена, 2003. 268 с.
2. Муха В.Д. Естественно-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности). М. : КолосС, 2004. 271 с.
3. Караваева Н.А., Лебедева И.И., Скворцова Е.Б., Герасимова М.И. Генетическая концепция пахотных горизонтов и опыт их типизации // Почвоведение. 2003. № 12. С. 1413–1421.
4. Васильченко Н.И., Звягин Г.А. Проявление агрогенной трансформации в почвах сухостепной зоны Республики Казахстан // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 1 (29). С. 6–15. doi: [10.17223/19988591/29/1](https://doi.org/10.17223/19988591/29/1)
5. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М. : ГЕОС, 2010. 416 с.

6. Кечайкина И.О., Рюмин А.Г., Чуков С.Н. Постагрогенная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1178–1193.
7. Дубровина И.А., Тонконогов В.Д. Корректировка содержания крупномасштабной почвенной карты с использованием новой классификации почв России // Почвоведение. 2008. № 11. С. 13–22.
8. Дубровина И.А. Почвенный покров Корзинской низины в новой классификации почв России // Экология и география почв / под ред. П.В. Красильникова. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2009. С. 91–105.
9. Канев В.В., Мокиев В.В. Трансформация свойств подзолистых почв подзоны средней тайги при освоении и окультуривании (Республика Коми) // Почвоведение. 2008. № 3. С. 349–359.
10. Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // Geoderma. 2013. № 192. PP. 189–201. doi: [10.1016/j.geoderma.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003).
11. Akujärvi A., Heikkinen J., Palosuo T., Liski J. Carbon budget of Finnish croplands – Effects of land use change from natural forest to cropland // Geoderma Regional. 2014. № 2–3. PP. 1–8. doi: [10.1016/j.geodrs.2014.09.003](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.003).
12. Sperow M. Estimating carbon sequestration potential on U.S. agricultural topsoils // Soil & Tillage Research. 2016. № 155. PP. 390–400. doi: [10.1016/j.still.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.006).
13. Duran J., Morse J.L., Rodríguez A., Campbell J.L., Christenson L.M., Driscoll C.T., Fahey T.J., Fisk M.C., Mitchell M.J., Templer P.H., Groffman P.M. Differential sensitivity to climate change of C and N cycling processes across soil horizons in a northern hardwood forest // Soil Biology & Biochemistry. 2017. № 107. PP. 77–84. doi: [10.1016/j.soilbio.2016.12.028](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.028).
14. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // European Journal of Soil Science. 1996. № 47. PP. 151–163.
15. Smith P. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol // Soil Use & Management. 2004. № 20. PP. 264–270. doi: [10.1079/SUM2004239](https://doi.org/10.1079/SUM2004239).
16. Морозова Р.М., Федорев Н.Г. Земельные ресурсы Карелии и их охрана. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2004. 152 с.
17. Морозова Р.М., Федорев Н.Г., Бахмет О.Н. Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.
18. Агроклиматические ресурсы Карельской АССР / под ред. Г.И. Бугиновой. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 115 с.
19. Атлас Карельской АССР / под ред. А.Г. Дурова. М. : ГУГК СССР, 1989. 40 с.
20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
21. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
22. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. № 4 (1). PP. 1–9.
23. Бахмет О.Н. Состав органического вещества и его запасы в почвах Карелии, сформировавшихся на коренных породах // Лесной вестник. 2015. Т. 19, № 2. С. 28–33.
24. Ефимов В.Н. Торфяные почвы и их плодородие. Л. : Агропромиздат, 1986. 254 с.

*Поступила в редакцию 08.09.2017 г.; повторно 11.11.2017 г.;
принята 27.02.2018 г.; опубликована 30.03.2018 г.*

Дубровина Инна Александровна – канд. с.-х. наук, с.н.с. лаборатории экологии и географии почв Института биологии – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11).
E-mail: vorgo@mail.ru

For citation: Dubrovina IA. Change in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in the boreal soils of the Republic of Karelia when used in agriculture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;41:27-41. doi: 10.17223/19988591/41/2. In Russian, English Summary

Inna A. Dubrovina

Institute of Biology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

Change in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in the boreal soils of the Republic of Karelia when used in agriculture

Recently, studies devoted to geochemical cycles of biogenic elements have been especially relevant in connection with global climate change. Since soil is the central link in biological cycle of substances, in many respects its condition determines the stability of terrestrial ecosystems. It is known that changes in land use lead to changes in carbon stocks and other nutrients in soils, therefore, monitoring of their content is required to implement effective control and management of soil resources. This paper presents the results of studying the effect of agricultural use on the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in the topsoil of soils of different genesis.

The studies were carried out in the Middle Taiga zone of Karelia (Eastern Fennoscandia) at four key sites (See Fig. 1). Soil profiles were located on farmlands and in the adjacent territories under forest. General sampling comprises 73 profiles. Samples were selected from the middle part of the topsoil. In thick horizons, a mixed sample was analyzed from a depth of 0-20 cm and 20 and > cm. In soil samples, the following parameters were analyzed: total nitrogen according to Kjeldahl, total phosphorus photometrically, total carbon by high-temperature catalytic combustion, and pH_{KCl} potentiometrically. For statistical analysis, the PAST Statistics software was used. Comparisons of mean values were performed using Student's t-test and one-way ANOVA with post-hoc analysis according to Tukey's HSD test.

It is known that the moderately cold and humid climate of Karelia and the predominance of forest vegetation foster the zonal podzolic process of soil formation and waterlogging. The soil cover is characterized by a complex structure, a high degree of patchiness and shallowness. To a large extent, the soil diversity of Karelia is due to differences in soil-forming rocks and strong relief roughness. Mineral soils of agricultural lands are mainly in relation to Quaternary sediments of the last glacial period. The profile structure and the properties of mineral soils depend, to a large extent, on the texture and origin of parent rocks. Soils on sands and sandy loams (Albic / Entic Umbric Podzols), on loams and clays (Umbric Retisols), and soils on schungites (Skeletal Umbrisols) were analyzed (See Table 1). The presented data suggest that anthropogenic transformation of mineral soils leads to significant changes in structure of the profile and properties of soils. The thickness of upper horizons increases from 5 to 25 cm, strongly acidic pH (3.7-3.9) rises to slightly acidic (5.1-5.3). The content of carbon, nitrogen and phosphorus significantly increases in soils on sands and sandy loams. Mineralization of organic matter intensifies, and the content of nitrogen and phosphorus also increases reliably in soils on loams and clays. Soils on schungite rocks are less susceptible to noticeable changes during agrottransformation. Peat soils represent drained farmlands with varying degrees of transformation of lowland peat (Drainic Eutric Histosols) (See Table 2). A part of these soils (Peat soils) has preserved an undisturbed natural structure of upper horizons with a strongly acidic pH (4.3), a

high content of carbon (48%) and nitrogen (1.6%) and weak decomposition of organic matter. Soils with a highly disturbed topsoil (Torfozems) have an elevated pH (5.0), a lower content of carbon ($p < 0.001$), nitrogen ($p < 0.005$) and a C:N ratio ($p < 0.01$) compared to peat soils. Peat-mineral soils with peat thickness < 50 cm (Histic Gleysols) have a highly disturbed topsoil with pH 4.9 and a lower content of carbon ($p < 0.001$) and nitrogen ($p < 0.005$) than peat soils.

Thus, in cold humid conditions of Karelia under anthropogenic influence in topsoils of Al-Fe-humus and texturally-differentiated soils, there is a tendency to increasing the content of the main biogenic elements. In soils with peat horizons, the opposite process dominates when an active human impact reduces greatly the content of carbon and nitrogen in the topsoil and generally increases the degree of peat mineralization. Anthropogenic influence does not affect the content of total phosphorus in peat soils. Soils on schungite rocks are most resistant to anthropogenic influences where an increase in the content of the main biogenic elements is insignificant (no statistically significant differences).

The paper contains 1 Figure, 2 Tables and 24 References.

Key words: topsoil; farmlands; biogenic elements; Podzols; Retisols; Umbrisols; Histosols.

Funding: This work was supported by the state projects No 0221-2017-0047.

Acknowledgments: The author is grateful to the staff of the Laboratory of Ecology and Geography of Soils, Institute of Biology, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (IB KarRC RAS) TV Bogdanova, AG Kashtanova, LI Skorokhodova and AA Khomichenko for assistance in analytical studies.

References

1. Gerasimova MI, Stroganova MN, Mozharova NV, Prokof'eva TV. Antropogennyye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya [Anthropogenic soils: genesis, geography and reclamation]. Dobrovol'skiy GV, editor. Smolensk: Oykumena Publ.; 2003. 268 p. In Russian
2. Moukha VD. Estestvenno-antropogennaya evolyutsiya pochv (obshchie zakonomernosti i zonal'nye osobennosti) [Natural and anthropogenic evolution of soils (general laws and zonal peculiarities)]. Moscow: KolosS Publ.; 2004. 271 p. In Russian
3. Karavaeva NA, Lebedeva II, Skvortsova EB, Gerasimova MI. Genetic concept of plow horizons and an experience in their typification. *Eurasian Soil Science*. 2003;36(12):1261-1268.
4. Vasil'chenko NI, Zvyagin GA. Agrogonic transformation of soils in the dry steppe zone of the Republic of Kazakhstan. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2015;1(29):6-15. In Russian, English Summary. doi: [10.17223/19988591/29/1](https://doi.org/10.17223/19988591/29/1)
5. Lyuri DI, Goryachkin SV, Karavaeva NA, Denisenko EA, Nefedova TG. Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv [Dynamics of agricultural lands of Russia in the XX century and postagrogenic restoration of vegetation and soils]. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 416 p. In Russian
6. Kechaikina IO, Ryumin AG, Chukov SN. Postagrogenic transformation of organic matter in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(10):1077-1089. doi: [10.1134/S1064229311100061](https://doi.org/10.1134/S1064229311100061)
7. Dubrovina IA, Tonkonogov VD. Correction of a large-scale soil map with the use of the new classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Science*. 2008;41(11):1148-1155. doi: [10.1134/S1064229308110021](https://doi.org/10.1134/S1064229308110021)

8. Dubrovina IA. Pochvennyy pokrov Korzinskoy niziny v novoy klassifikatsii pochv Rossii [Soil cover of the Korzinskaya lowland in the new Russian soil classification]. In: *Ekologiya i geografiya pochv* [Ecology and geography of soils]. Krasil'nikov PV, editor. Petrozavodsk: KarRC of RAS Publ.; 2009. pp. 91-105. In Russian
9. Kanev VV, Mokiev VV. Transformation of properties of podzolic soils under development and cultivation in the middle taiga subzone (Komi Republic). *Eurasian Soil Science*. 2008;41(3):312-321. doi: [10.1007/s11475-008-3009-7](https://doi.org/10.1007/s11475-008-3009-7)
10. Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*. 2013;192:189-201. doi: [10.1016/j.geoderma.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003)
11. Akujärvi A, Heikkinen J, Palosuo T, Liski J. Carbon budget of Finnish croplands - Effects of land use change from natural forest to cropland. *Geoderma Regional*. 2014;2-3:1-8. doi: [10.1016/j.geodrs.2014.09.003](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.003)
12. Sperow M. Estimating carbon sequestration potential on U.S. agricultural topsoils. *Soil & Tillage Research*. 2016;155:390-400. doi: [10.1016/j.still.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.006)
13. Duran J, Morse JL, Rodríguez A, Campbell JL, Christenson LM, Driscoll CT, Fahey TJ, Fisk MC, Mitchell MJ, Templer PH, Groffman PM. Differential sensitivity to climate change of C and N cycling processes across soil horizons in a northern hardwood forest. *Soil Biology & Biochemistry*. 2017;107:77-84. doi: [10.1016/j.soilbio.2016.12.028](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.028)
14. Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 1996;47:151-163. doi: [10.1111/ejss.12114_2](https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2)
15. Smith P. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use & Management*. 2004;20:264-270. doi: [10.1111/j.1475-2743.2004.tb00367.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00367.x)
16. Morozova RM, Fedorets NG. Zemel'nye resursy Karelii i ikh okhrana [Land resources of Karelia and their protection]. Petrozavodsk: KarRC of RAS Publ.; 2004. 152 p. In Russian
17. Fedorets NG, Morozova RM, Bakhmet ON. Soils and soil cover of Karelian Zaonezhje. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2004;6:69-89. In Russian
18. *Agroklimaticheskie resursy Karel'skoy ASSR* [Agroclimatic resources of the Karelian ASSR]. Buginova GI, editor. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1974. 115 p. In Russian
19. *Atlas Karel'skoy ASSR* [Atlas of the Karelian ASSR]. Durov AG, editor. Moscow: GUGK SSSR Publ.; 1989. 40 p. In Russian
20. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian
21. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Vorob'eva LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian
22. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1-9.
23. Bakhmet ON. Organic matter composition and stock in soils over different types of bedrock in Karelia. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2015;19(2):28-33. In Russian, English Summary
24. Efimov VN. Torfyanye pochvy i ikh plodorodie [Peat soils and their fertility]. Leningrad: Agropromizdat Publ.; 1986. 254 p. In Russian

Received 08 September 2017; Revised 11 November 2017;

Accepted 27 February 2018; Published 30 March 2018

Author info:

Dubrovina Inna A, Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Laboratory of Ecology and Geography of Soils, Institute of Biology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskatya Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation.

E-mail: vorgo@mail.ru