

УДК 631.41:631.445.24:581.5

ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ОКУЛЬТУРЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

© 2022 г. А. В. Литвинович^{1,*}, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург—Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2021 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Прослежены изменения растительного покрова окультуренной дерново-подзолистой иллювиально-железистой песчаной почвы, находящейся в залежи около 100 лет. Приведено описание почвенного профиля на разных этапах формирования природных экосистем. Показано, что положительные изменения (плотность сложения, содержание и запасы различных форм элементов питания), достигнутые в результате 200-летней эксплуатации почвы, по мере увеличения срока прекращения антропогенного воздействия постепенно утрачиваются. Разработаны эмпирические модели, описывающие динамику запасов различных форм соединений калия, фосфора и валового азота в процессе перехода от пашни к лесу. Приведены данные скорости утраты отдельных элементов почвенного плодородия спустя 100 лет после прекращения антропогенного воздействия. Проведено ранжирование изученных показателей по темпам потерь элементов питания за 100 лет нахождения почвы в залежи. По средней относительной скорости снижения запасов элементов питания (средний темп снижения показателей, логарифмическая производная) все изученные элементы образуют следующий по возрастанию ряд (v): валовой фосфор (0.00052) < валовой азот (0.00529) < обменный калий (0.008) < водорастворимый калий (0.012) < подвижный фосфор (0.0136) < обменный калий (0.0185).

Ключевые слова: дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, разновозрастные залежи, природные экосистемы, содержание и запасы элементов питания, эмпирические модели.

DOI: 10.31857/S0002188122060084

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая ситуация в России в последние 25 лет привела к сокращению площади обрабатываемых земель в стране. По данным [1], почти половина пахотных угодий Северо-Западного региона Российской Федерации не используется и в большей своей части подвергается вторичному зарастанию древесно-кустарниковой растительностью. Из общей площади пахотных почв региона, составляющей ~3 млн га, зарастанию подвержено 48% площади.

Выведение в залежь сельскохозяйственных угодий характерно не только для последних 25 лет. Большинство территорий южно-таежной подзоны

за историческое время в той или иной степени подвергалось антропогенному воздействию, вследствие чего многие дерново-подзолистые почвы представляют результат эволюции старопахотных территорий в лесные угодья [2, 3].

В лаборатории мелиорации почв АФИ с 2003 г. проводят исследования направленности и скорости изменения пахотных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава, выведенных из сельскохозяйственного оборота [3–11].

Однако по-прежнему мало данных, касающихся утраты элементов минерального питания растений при длительном отсутствии антропо-

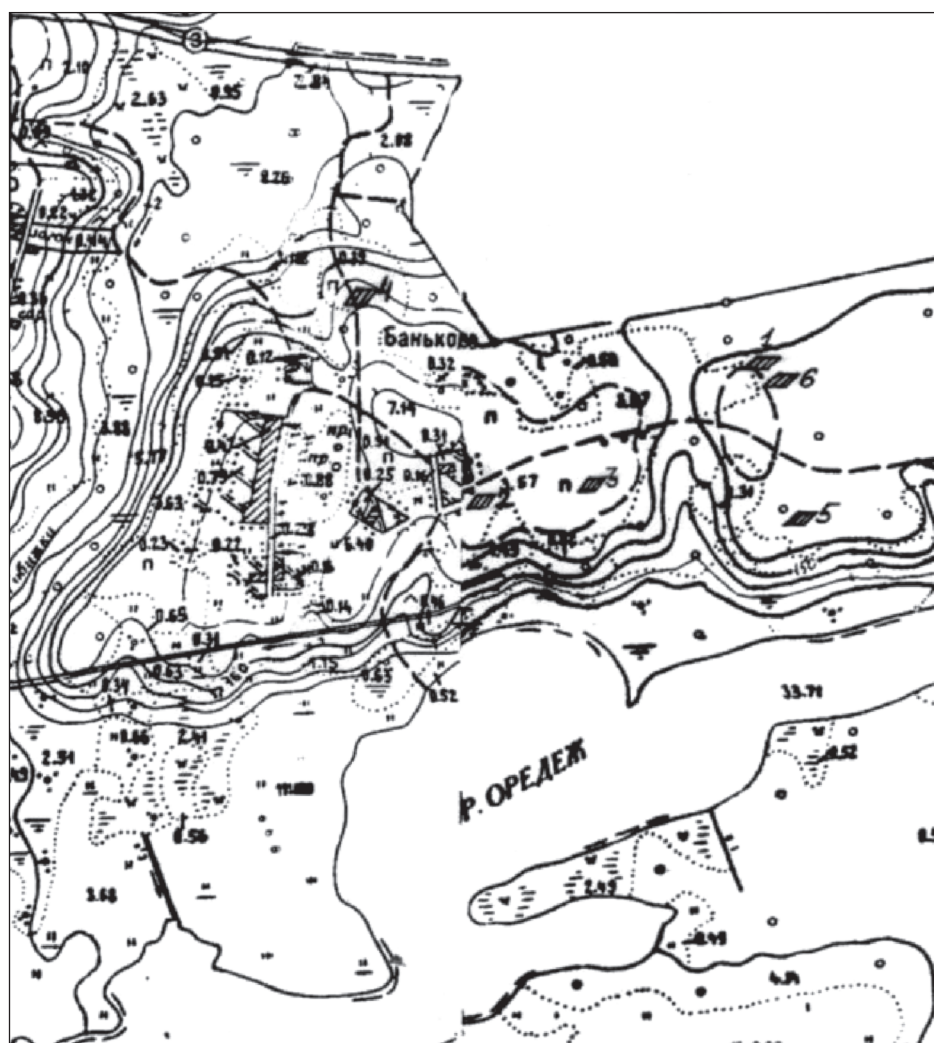


Рис. 1. Карта местности с указанием площадок отбора (М 1 : 10000): 1 – лес, 2 – пашня, 3 – залежь 10 лет, 4 – залежь 20 лет, 5 – залежь 60 лет, 6 – вторичный лес (залежь 100 лет).

генной нагрузки. Не разработаны эмпирические зависимости скорости изменения параметров почвенного плодородия окультуренных почв, долгое время находящихся в залежи.

В задачи исследования входило: проследить смену растительных сообществ окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы по мере увеличения срока нахождения в залежи; изучить строение профиля и изменение плотности сложения при отсутствии механической обработки некультивируемой почвы; определить содержание и запасы различных форм питательных элементов на разных этапах нахождения почвы в залежи; разработать эмпирические модели, описывающие утрату элементов почвенного плодородия в процессе увеличения возраста почвы без антропогенного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В Лужском р-не Ленинградской обл. провели полевое почвенное обследование и выбрали 6 базовых площадок, на которых осуществляли исследование почв. Основными критериями для выбора явилась однотипность геоморфологических условий: 1 – все исследованные почвы сформировались на плоских водораздельных пространствах одинакового гипсометрического уровня; 2 – однородность почвообразующих пород, представляющих собой хорошо сортированные флювиогляциальные (камовые) пески; 3 – однообразие растительности на выбранной площадке. Местоположение площадок, с которых производили отбор проб, изображено на рис. 1.

Материнской породой объектов исследования явились флювиогляциальные (камовые) пески. Почвообразующие породы изученных почв име-

Таблица 1. Гранулометрический состав почвообразующих пород, содержание фракций, % от массы сухой навески почвы

Угодье	Глубина отбора проб, см	Размер фракций, мм							
		1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01	$\frac{1-0.25}{0.25-0.05}$
1. Лес	70–100	56.3	40.1	1.35	0.55	0.91	0.81	2.27	1.40
2. Пашня	92–100	57.4	38.9	1.27	0.58	0.81	1.10	2.49	1.47
3. Залежь 10 лет	80–100	58.3	38.2	1.02	0.49	0.95	1.05	2.49	1.52
4. Залежь 20 лет	80–100	55.6	40.9	1.19	0.51	0.85	0.96	2.32	1.36
5. Залежь 60 лет	90–100	56.0	39.9	1.40	0.75	0.98	0.93	2.66	1.40
6. Вторичный лес (залежь 100 лет)	>105	55.0	41.1	1.39	0.57	0.93	1.03	2.53	1.33

ют ряд сходных характеристик, в частности: содержание песчаной фракции существенно преобладает и меняется в пределах от 95.9 до 96.5%; количество физической глины не превышает 2.7% и изменяется в пределах 2.27–2.66%, что позволило отнести почву по классификации Н.А. Качинского [12] к рыхлым пескам; об однородности песков можно также судить по отношению крупного и среднего песка к мелкому (1–0.25 мм/0.25–0.05 мм). Данное отношение в материнских породах имеет пределы изменений от 1.36 до 1.52 (табл. 1).

Основными объектами исследования явились дерново-подзолистые песчаные почвы залежей различного возраста – 10, 20, 60 и 100 лет. Для сравнения исследовали целинную (лесную) дерново-подзолистую песчаную почву и ее окультуренный аналог. Возраст прекращения антропогенного воздействия на залежных почвах определили по картографическим материалам, опросам местного населения и личным наблюдениям. Время прекращения антропогенного воздействия на залежах 60- и 100-летнего возраста установлено с точностью $\pm 3-5$ лет.

На каждом из выбранных массивов отбивали пробные площадки размером 10×10 м. На них закладывали базовый почвенный разрез, вокруг которого делали дополнительно 4 прикопки. Определение плотности сложения, содержания азота, калия и фосфора, проводили согласно существующим методам в пятикратной повторности.

Аналитические работы по установлению физико-химических показателей проводили с использованием методов, принятых в почвоведении и агрохимии [13]: плотность сложения почвы – методом режущих цилиндров, содержание различных форм калия – методом пламенной фотометрии (водорастворимый калий – в вытяжке при отношении почва : раствор = 1 : 5, обменный калий – по методу Масловой путем вытеснения 1 н.

раствором уксуснокислого аммония, необменный калий – по методике Гедройца в модификации Вазенина, валовой азот – колориметрическим методом с раствором Несслера после сжигания серно-хлорной смесью (по методу Кьельдаля), подвижные соединения фосфора – по методу Кирсанова, валовой фосфор – колориметрическим методом после сжигания серно-хлорной смесью.

Данные исследования обработаны при помощи методов математической статистики [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение растительности при смене характера использования почв. Дерново-подзолистая целинная почва, выбранная в качестве эталонной, сформирована под смешанным березово-сосновым лесом с травянисто-кустарничково-моховым наземным покровом. Растительность: смешанный лес – сосна (*Pinus sylvestris*) : береза (*Betula*) = 1 : 1; подрост – рябина (*Sorbus aucuparia*), ель (*Picea abies*); кустарничковый ярус – черника (*Vaccinium myrtillus*), травянистая растительность – осока пальчатая (*Carex digitata*) и ранняя (*Carex praecox*), марьяник дубравный (*Melampyrum nemorosum*), ситник нитевидный (*Juncus filiformis*) (20% травянистой растительности), в наземном покрове – мхи гипновые (40–50% покрытия).

Дерново-подзолистая пахотная (огородная) почва находится в культуре >200 лет, на момент изучения была занята под посадку картофеля с незначительной засоренностью (сурепка обыкновенная (*Barbarea vulgaris*), бодяк полевой (*Cirsium aryense*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*)).

Прекращение антропогенного воздействия по истечении различного времени наложило значительный отпечаток на характер растительности. В растительном покрове залежи 10-летнего воз-

раста существенно преобладал злаковый компонент, представленный тимофеевкой луговой (*Phleum pratense*), ежой сборной (*Dactylis glomerata*), овсяницей луговой (*Festuca pratensis*) с незначительной примесью клевера красного (*Trifolium rubens*), что связано с возделыванием этой смеси многолетних трав на данном массиве. Незначительную долю в травянистом покрове занимали сорные растения: сурепка обыкновенная (*Barbarea vulgaris*), бодяк полевой (*Cirsium aryense*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*).

Через 20 лет нахождения в залежи растительный покров претерпевал видимые изменения. Резко снижалась доля покрытия злаковыми растениями, которые представлены естественными травами: лисохвостом луговым (*Alopecurus pratensis*), овсяницей луговой (*Festuca pratensis*). Из бобовых место клевера красного (*Trifolium rubens*) занимали мышиный горошек (*Vicia cracca*) и чина луговая (*Lathyrus pratensis*), 70% покрытия составляло разнотравье: одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris*), василек луговой (*Centaurea jacea*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), звездчатка малая (*Stellaria*), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris*), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*). В наземном покрове появлялись мхи (10%). Из древесных пород выявили подрост сосны 10–15-летнего возраста, высотой 1.5–2 м. Незначительную долю составляли растения-ацидофилы: щавель (*Rumex*), осока пальчатая (*Carex digitata*), ситник нитевидный (*Juncus filiformis*).

В последующем, учитывая подкисление почвы [10] и нарастание биомассы древесных пород, происходило изменение растительного покрова. На почве 60-летней залежи начинал формироваться изреженный смешанный березово-сосновый лес (1 : 9) с подростом из рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) и дуба (*Quercus*). Травянистый покров состоял из типичных растений-ацидофилов: ситника нитевидного (*Juncus filiformis*) – 70% и осоки пальчатой (*Carex digitata*) – 10%, а также разнотравья (марьянник дубравный (*Melampyrum nemorosum*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), щавелек малый (*Rumex acetosella*)). Значительную долю в наземном покрове занимали мхи (30–40%).

Отсутствие обработки в течение 100 лет приводило к восстановлению типичной для района и данных геоморфологических условий растительности. Формировался вторичный хвойно-мелколиственный лес с преобладанием сосны с подро-

стом из лиственных пород, появлением кустарничков – черники (*Vaccinium myrtillus*) и типичным травяно-моховым покрытием. Доля травянистых растений (ситник нитевидный, марьянник дубравный, осока пальчатая) снижалась до 15–20%, тогда как покрытие мхами достигало >50%.

Таким образом, в растительном покрове 10-летней залежи преобладал злаковый компонент, представленный сеянными травами. Через 20 лет доля злаковых уменьшалась, появлялись растения-ацидофилы. Растительность 60-летней залежи отличалась отсутствием бобовых и злаковых трав и постепенным восстановлением леса. Характер растительности 100-летнего вторичного леса был близок к таковому на целинной почве.

Строение профиля почв. Строение профиля сравниваемых почв приведено на рис. 2. Разрез 1 (коренной лес) представлен дерново-среднеподзолистой иллювиально-железистой песчаной почвой на флювиогляциальных отложениях. Резкое расчленение профиля на генетические горизонты свидетельствовало о сопряженном развитии дернового и подзолистого процессов с явным преимуществом последнего.

Разрез 2 (пашня) представлен дерново-слабоподзолистой иллювиально-железистой песчаной почвой на флювиогляциальных песках. Данная почва находится в сельскохозяйственном использовании >200 лет. По совокупности морфологических признаков, однородной серой окраске, наличию непрочной комковатой структуры, гомогенности пахотного слоя и отсутствию резко выраженных признаков оподзоливания, данная почва может быть отнесена к категории хорошо окультуренных.

Разновозрастные залежи 10, 20, 60 и 100 лет представлены дерново-слабо (средне) подзолистыми иллювиально-железистыми почвами на флювиогляциальных отложениях.

По ряду морфологических признаков в залежных почвах происходят заметные изменения в строении профиля, связанные с усилением элювиальных процессов. Постепенно залежная почва приближается по морфологии к исходному целинному состоянию, но полного восстановления не происходит. В то же время сохраняются признаки окультуривания, хорошо заметные по мощности гумусового горизонта и четким, ровным границам между ним и последующими.

Плотность сложения почв. Плотность сложения почв в стационарных системах лесных ландшафтов является довольно консервативным свойством, мало изменяющимся во времени. Дерново-подзолистая почва в естественном состо-

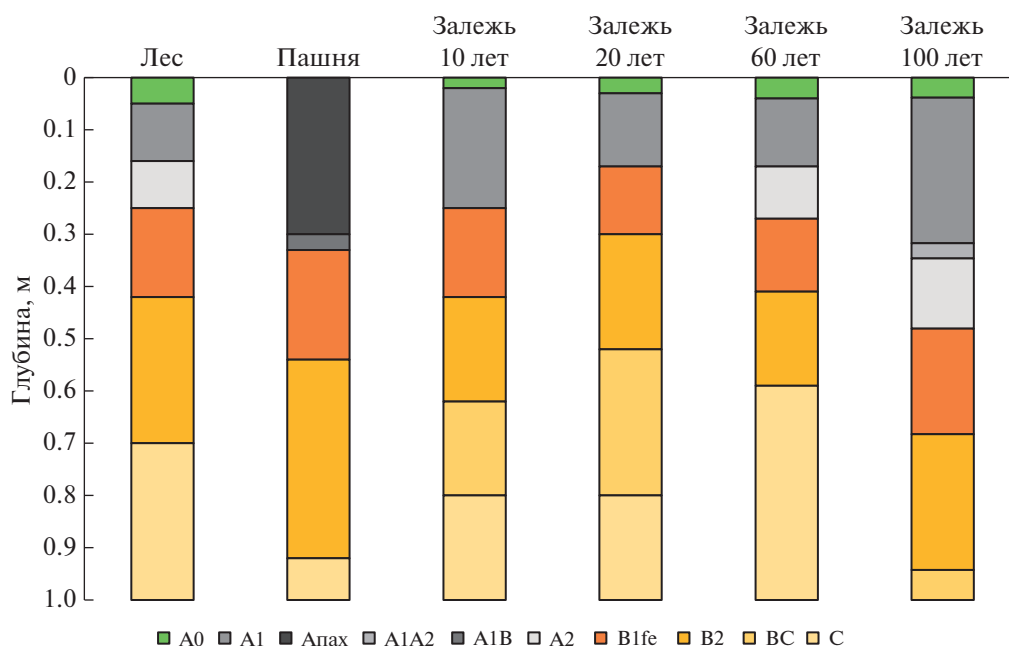


Рис. 2. Строение профиля дерново-подзолистых иллювиально-железистых почв.

янии имеет высокие показатели плотности сложения по всему профилю (от 1.43 до 1.55 г/см³), что типично для рыхлых песков, находящихся практически в раздельно-частичном состоянии (табл. 2).

При окультуривании почвы данный показатель становится более динамичным, особенно в верхних горизонтах профиля, испытывающих как механическое, так и химическое воздействие. Обработка почвы, внесение органических удобрений и химических мелиорантов приводит к уменьшению плотности сложения в пахотном слое. Невысокая плотность сложения пахотного слоя (особенно верхней его части) связана, скорее всего, еще и с тем, что отбор образцов проводили в июне, после окучивания картофеля. Плотность сложения нижних горизонтов профиля оставалась на уровне целинного аналога.

После прекращения антропогенного воздействия, в течение 10–20 лет плотность сложения слабо изменялась, хотя намечалась тенденция к незначительному уплотнению в верхней части профиля. Положительное влияние в этом случае оказывали корни травянистой растительности, способствующие разрыхлению корнеобитаемого слоя. В то же время произошло расчленение бывшего пахотного слоя по плотности. Например, амплитуда изменений плотности сложения в нижней части гумусового горизонта (17–30 см) 20-летней залежи составила от 1.29 до 1.37 г/см³, тогда как в верхней его части – от 1.22 до 1.26 г/см³. Это объясняется неглубоким проникновением

корневых систем травянистых растений, максимальное количество которых (до 80–90%) сосредоточено в слое 0–15 см.

После постепенного зарастания древесной растительностью и уменьшением доли трав в наземном покрове отмечено постепенное увеличение плотности сложения, при этом приблизительно через 100 лет после прекращения обработки в почве под вторичным лесом величины плотности сложения всех горизонтов профиля практически совпадают с плотностью горизонтов целинной лесной почвы. Например, плотность сложения верхних горизонтов почв целинного и вторичного лесов составляет 1.43 и 1.40 г/см³ соответственно.

Таким образом, несмотря на относительную консервативность данного показателя почв, следует отметить, что динамичность его значительна и существенно зависит от характера воздействия.

Содержание и запасы элементов питания. Запасы азота. Максимальные запасы азота были зафиксированы в слое 0–30 см пахотной почвы – ≈4 т/га, что можно связать с поступлением большого количества азота с органическими и минеральными удобрениями (рис. 3). Спустя 10 лет после прекращения антропогенного воздействия запасы азота снижались, однако это уменьшение было незначительным, что объясняется наличием бобового компонента в растительном покрове изученного объекта и прекращением отчуждения этого элемента урожаем. В последующие 10 лет

Таблица 2. Плотность сложения и содержание различных форм элементов питания в дерново-подзолистых песчаных почвах

Угодье	Горизонт	Глубина, см	Плотность, г/см ³	N _{вал} , %	Содержание калия, мг/кг				K _{необм} /K _{обм}	Содержание фосфора	
					водорастворимый	обменный	необменный	валовой, %		подвижный, мг/кг	
Лес	A1	5-16	1.43 ± 0.02	0.10	13 ± 0.2	47 ± 1.2	100 ± 2	2.13	0.078	18 ± 0.3	
	A2	16-25	1.48 ± 0.03	0.017	8	11	81	7.36	0.063	44	
	B1Fe	25-42	1.50 ± 0.05	0.040	11	24	175	7.29	0.070	92	
	B2	42-70	1.55 ± 0.05	Не определяли	11	19	240	12.6	Не определяли	Не определяли	
	C	70-100		Не определяли	15	14	301	21.5	Не определяли	Не определяли	
Пашня	Апах (1)	0-10	1.13 ± 0.03	0.122	46 ± 0.8	146 ± 2	213 ± 2	1.46	0.093	148 ± 1.2	
	Апах (2)	10-30	1.26 ± 0.04	0.104	57 ± 0.3	137 ± 1	196 ± 1	1.43	0.087	248 ± 1.5	
	A1B	30-33	1.50 ± 0.04	0.092	19	31	270	8.71	0.070	Не определяли	
	B1Fe	33-54	1.57 ± 0.04	Не определяли	20	19	281	14.8	Не определяли	60	
	B2	54-92	Не определяли	Не определяли	14	19	272	14.3	Не определяли	Не определяли	
Залежь 10 лет	C	92-100		18	21	341	16.2	Не определяли	Не определяли	Не определяли	
	A1(1)	2-10	1.21 ± 0.03	0.123	42 ± 0.4	172 ± 1	259 ± 1.8	1.51	0.095	152 ± 1	
	A1(2)	10-25	1.26 ± 0.04	0.096	29 ± 0.2	99 ± 1	302 ± 1.5	3.05	0.081	192 ± 1	
	B1Fe	25-42	1.50 ± 0.04	0.071	20	35	195	5.57	0.075	16.0	
	B2	42-62	1.57 ± 0.04	не опр.	13	23	284	12.4	Не определяли	Не определяли	
Залежь 20 лет	BC	62-80		не опр.	14	19	272	14.3	Не определяли	Не определяли	
	C	80-100		18	21	341	16.2	Не определяли	Не определяли	Не определяли	
	A1(1)	3-17	1.24 ± 0.02	0.101	33 ± 0.06	88 ± 0.15	209 ± 0.28	2.38	0.089	128 ± 1.0	
	A1(2)	17-30	1.33 ± 0.04	0.074	28 ± 0.03	54 ± 0.07	228 ± 0.23	4.22	0.075	166 ± 2.1	
	B1Fe	30-52	1.51 ± 0.04	0.050	15	57	423	7.42	0.070	130	
Залежь 60 лет	B2	52-82	1.56 ± 0.05	Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли	Не определяли	
	C	82-100	Не определяли	Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли	Не определяли	
	A1(1)	4-17	1.35 ± 0.03	0.079	14 ± 0.5	34 ± 1.1	117 ± 3.1	3.44	0.081	39 ± 0.7	
	A1(2)	17-32	1.42 ± 0.03	0.060	10 ± 0.2	14 ± 0.04	121 ± 4.1	8.64	0.070	206 ± 0.7	
	A2	32-42	1.50 ± 0.04	0.021	10	7	153	21.9	0.060	118	
Вторичный лес (залежь 100 лет)	B1Fe	42-56	1.57 ± 0.03	Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли	Не определяли	
	B2	56-74	Не определяли	Не определяли	10	11	294	26.7	Не определяли	Не определяли	
	A1(1)	4-14	1.40 ± 0.03	0.066	15 ± 0.1	19 ± 0.5	96 ± 5.2	5.05	0.076	36 ± 0.3	
	A1(2)	14-29	1.48 ± 0.04	0.059	12 ± 0.2	21 ± 0.4	97 ± 4.4	4.62	0.068	46 ± 0.5	
	A1A2	29-32	1.48 ± 0.04	0.050	7	7	136	19.4	0.065	—	
Вторичный лес (залежь 100 лет)	A2	32-46	1.52 ± 0.03	0.028	11	14	200	14.3	Не определяли	Не определяли	
	B1Fe	46-67	1.55 ± 0.02	—	—	—	—	—	—	—	
	B2	67-94	1.57 ± 0.03	—	—	—	—	—	—	—	
	BC	94-105	—	—	—	—	—	—	—	—	

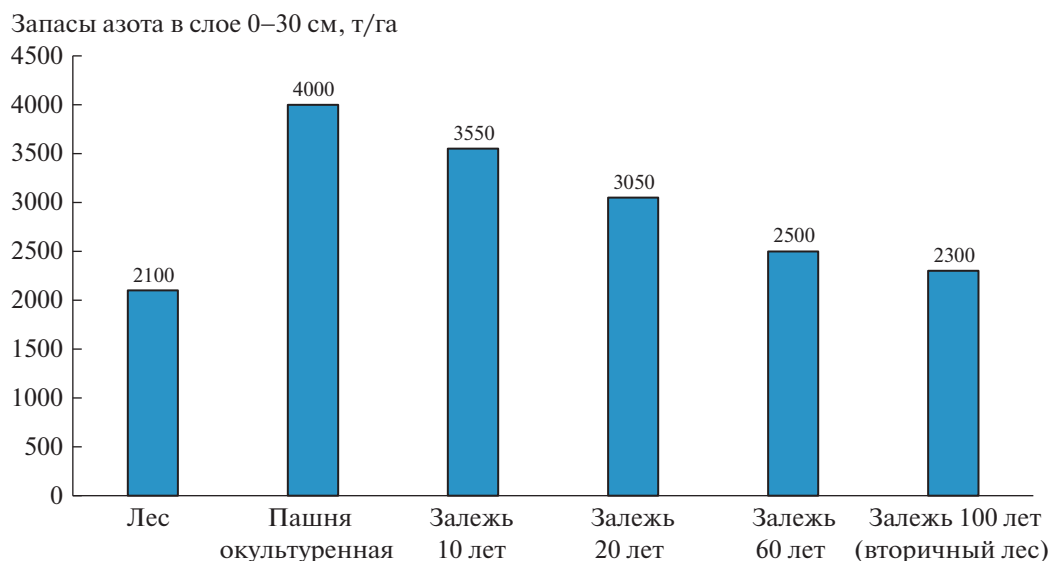


Рис. 3. Запасы азота в слое 0–30 см изученных дерново-подзолистых почв, кг/га (расчет производили без учета лесной подстилки и слоя дернины. То же на рис. 4–6).

нахождения почвы без использования запасы азота уменьшались еще на 500 кг/га. В слое 0–30 см залежной почвы 60-летнего возраста запасы азота были очень близки к таковым в целинной почве. Продолжалось снижение запасов относительно пахотной дерново-подзолистой почвы. Спустя 100 лет после прекращения использования дерново-подзолистой песчаной почвы запасы этого элемента превосходили запасы в нативной почве, что свидетельствовало о сохранении положительных последствий окультуривания даже на этом этапе. Запасы валового азота тесно коррелировали с запасами гумуса [10].

Эмпирическая модель убыли запасов азота по мере увеличения срока нахождения дерново-подзолистой окультуренной песчаной почвы в залежи приведена в табл. 3.

Содержание и формы соединений калия. Результаты свидетельствовали, что количество водорастворимых соединений калия в дерново-подзолистой целинной лесной почве было невысоким с максимумом содержания в гумусовом горизонте — 13 мг/кг (табл. 2). Максимальное содержание элемента в гумусовом горизонте объясняется поступлением калия, накопленного в лесном опаде, в нижележащий слой. Вниз по профилю концентрация калия резко уменьшалась, минимальное его количество было характерно для подзолистого горизонта A2 (16–25 см). Некоторое возрастание содержания водорастворимого калия в нижележащих горизонтах B1 и B2 связано, по-видимому, с миграцией этого элемента из верхних горизонтов.

К обменной форме калия принято относить калий диффузного слоя почвенных коллоидов, который служит основным источником питания растений. В гумусовом горизонте целинной лесной почвы он содержался в количестве 47 мг/кг. Распределение обменного калия по профилю имело элювиально-иллювиальный характер.

Под необменным калием понимается фиксированный калий, труднообменный калий слюд, их гидратированные разновидности и калий других глинистых минералов [15, 16]. Слюды и гидрослюды, содержащиеся в илстой и коллоидной фракциях, выступали основным источником питания для растений. Распределение данной формы калия по профилю лесной почвы было следующим: минимум этих форм содержался в подзолистом горизонте, несколько больше — в гумусовом горизонте. Содержание увеличивалось в иллювиальных горизонтах и в материнской породе.

По многочисленным данным, при окультуривании дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава происходит возрастание концентрации всех форм калия [7, 17]. Это связано с активным разложением органических остатков и минерализацией гумуса, а также с применением калийных удобрений. Но это увеличение незначительно, т.к. часть освобожденного калия усваивается растениями, часть фиксируется почвой. В нашем исследовании содержание водорастворимых соединений калия в пахотном слое по сравнению с содержанием в гумусово-аккумулятивном горизонте целинной почвы увеличилось в 3.5 раза.

Таблица 3. Эмпирические модели динамики процессов изменения запасов элементов питания растений (y_i , т/га) при переходе от пашни к лесу за период времени (t : 0...100 лет)

Мощность слоя, см	Эмпирическая модель	Скорость изменения (v)	p-value	Коэффициент детерминации
Запасы азота				
0–30	$\ln(y_1) = 8.21 - 0.00529t$	$v_1 = -0.00529$	$p = 0.015$	$R^2 = 0.896$
Запасы валового фосфора				
0–30	$\ln(y_2) = 0.99 - 0.00052t$	$v_2 = -0.00052$	$p = 0.03$	$R^2 = 0.82$
Запасы подвижного фосфора				
0–30	$\ln(y_3) = -0.35 - 0.0136t$	$v_3 = -0.0136$	$p = 0.018$	$R^2 = 0.88$
Запасы водорастворимого калия				
0–30	$\ln(y_4) = -2.07 - 0.012t$	$v_4 = -0.012$	$p = 0.05$	$R^2 = 0.77$
0–50	$\ln(y_5) = -1.7 - 0.01t$	$v_5 = -0.01$	$p = 0.045$	$R^2 = 0.785$
Запасы обменного калия				
0–30	$\ln(y_6) = -1.02 - 0.0185t$	$v_6 = -0.0185$	$p = 0.01$	$R^2 = 0.9$
0–50	$\ln(y_7) = -0.74 - 0.017t$	$v_7 = -0.017$	$p = 0.018$	$R^2 = 0.88$
Запасы необменного калия				
0–30	$\ln(y_8) = -0.27 - 0.008t$	$v_8 = -0.008$	$p = 0.045$	$R^2 = 0.78$
0–50	$\ln(y_9) = 0.53 - 0.006t$	$v_9 = -0.006$	$p = 0.08$	$R^2 = 0.69$

Еще одним итогом применения приемов окультуривания явилось увеличение содержания обменного калия в верхней части профиля, причем изменения затрагивали и подпахотный горизонт А1В (30–33 см). В пахотном горизонте происходило увеличение содержания необменных форм калия более чем в 2 раза. Это объясняется адсорбцией калия почвой после внесения калийных удобрений, которая увеличивается со временем вследствие перемешивания почвы и даже может приводить к достройке кристаллической решетки глинистых минералов в почвах (так называемой “аградации”) [18, 19].

В результате развития почвы в ней складывается определенное, оптимальное для данной ситуации, устойчивое соотношение между формами калия. При изменении этого равновесия, например, при внесении удобрений, превращение форм калия будет проходить в направлении восстановления первоначальных пропорций между ними [7, 20, 21]. Действительно, при окультуривании возрастает количество всех форм калия, при этом пропорции между обменным и водорастворимым калием сохраняются, однако необменных форм калия накапливается меньше.

В гумусовом горизонте целинной лесной почвы отношение $K_{необм}/K_{обм}$ равно 2.13 (табл. 3), в

пахотном горизонте окультуренной почвы – 1.43–1.46. Это указывало на смещение пропорций калийных форм в сторону накопления обменной формы калия при применении приемов окультуривания.

В почве, оставленной без использования 10 лет назад, наблюдали возрастание содержания обменной и необменной форм калия в верхнем подгоризонте гумусового слоя (2–10 см). Такое явление могло быть следствием поступления калия при отмирании биомассы корней и надземной части растений. В нижней части бывшего пахотного слоя содержание обменных форм калия снижалось относительно такового в пахотной почве, а количество необменных форм этого элемента, напротив, возрастало. В нижнем подгоризонте гумусового слоя 10-летней залежи соотношение $K_{необм}/K_{обм}$ расширялось, что свидетельствовало о начальном этапе восстановления пропорций между различными формами калия, свойственными целинной дерново-подзолистой почве. Бывший пахотный горизонт через 10 лет после прекращения использования почвы в культуре дифференцировался на 2 подгоризонта по показателям калийного состояния. В верхнем подгоризонте наблюдали некоторое увеличение содержания всех форм калия, а в нижнем происходило

перераспределение между формами калия, фиксирование части калия в необменной форме.

Спустя 20 лет после прекращения антропогенного воздействия в гумусовом слое почвы уменьшалось количество всех форм калия. Показатели $K_{необм}/K_{обм}$ увеличивались в обоих подгоризонтах слоя A1, что указывало на снижение содержания обменных форм калия доступных для растений. Вероятно, это следует объяснить преобразованием твердой фазы почвы после снятия антропогенной нагрузки. Вместе с этим, в почве 20-летней залежи содержание всех форм калия практически в 2 раза превосходило количество тех же форм в целинной почве. Травы, произраставшие на этом объекте, все еще поддерживали показатели калийного состояния почвы на достаточно благоприятном уровне.

Дальнейшее нахождение почвы в залежи приводило к еще более сильному обеднению калием всех горизонтов. И к 60-ти годам после прекращения использования дерново-подзолистой почвы ее калийное состояние, оцененное по содержанию различных форм калия, практически возвратилось в исходное состояние, свойственное целинной почве. Содержание обменного калия было даже меньше, чем в целинной почве. Особенно это было заметно в нижнем подгоризонте бывшего пахотного слоя. В данном случае это можно объяснить сменой растительности с травянистой, которая не может нормально развиваться в экстраэлювиальных условиях, на лесную, способную накапливать элементы-органогены в своей фитомассе, тем самым препятствуя их вымыванию. Вероятно, часть калия была использована древесными растениями для построения многолетней биомассы. Частично калий возвращался в почву с опадом, но практически сразу же вовлекался лесными породами снова в биологический круговорот.

В почве вторичного леса, которую не использовали в течение 100 лет, содержание водорастворимых и обменных форм калия практически совпадало с таковыми в целинной лесной почве. Можно говорить о почти полном возвращении элементов калийного фонда, которые были изучены, в исходное состояние. Исключение составляло содержание обменных соединений калия, которых в гумусовом горизонте 100-летней залежи было меньше, чем в слое A1 целинной лесной почвы. Это связано с тем, что обедненные калием почвы очень интенсивно фиксируют его. По данным [22], емкость фиксации, т.е. предельное количество калия, которое может быть необменно поглощено почвами, довольно высока. Например, в пахотном слое супесчаных почв эта вели-

чина достигала 54 кг/га. Поэтому отмечено расширение соотношения необменного калия к общему, что, видимо, происходило за счет перехода части обменных форм калия в фиксированное состояние.

Полного возврата к исходному состоянию почв залежи по содержанию и соотношению между формами калия не происходило даже спустя 100 лет после прекращения антропогенного воздействия. В дальнейшем следует ожидать медленного восстановления параметров калийного состояния залежных почв по типу зонального почвообразования.

Динамика запасов различных форм калия в слоях 0–30 и 0–50 см приведена на рис. 4, 5. Эмпирические модели запасов различных форм соединений калия представлены в табл. 3.

Содержание валовых и подвижных соединений фосфора. При сравнении содержания валового фосфора по горизонтам исследованных объектов выявлено увеличение содержания данного элемента в верхнем горизонте пахотной почвы по сравнению с гумусовым горизонтом целинного аналога (табл. 2). В почвах залежи 10-ти и 20-ти лет содержание валового фосфора удерживалось на уровне окультуренной почвы. В дальнейшем при увеличении срока нахождения почвы в залежи (60 и 100 лет) происходило снижение количества валового фосфора. Причем в почвах каждого объекта отмечена дифференциация гумусового горизонта на 2 подгоризонта с большим содержанием валового фосфора в верхнем подгоризонте и с меньшим – в нижнем. В окультуренной почве аккумуляция валового фосфора в пахотном слое происходила также в результате внесения изученного элемента с удобрениями. Распределение фосфора по профилю приобретало аккумулятивно-элювиальный характер.

Распределение подвижных соединений фосфора по профилю целинной лесной почвы носило элювиальный характер, т.е. с увеличением глубины повышалось содержание мобильного фосфора, что указывало на его миграцию вниз по профилю.

При окультуривании наблюдали значительное возрастание содержания подвижных фосфатов в пахотном слое. Это объясняется внесением извести, органических и фосфорсодержащих минеральных удобрений [23].

При прекращении антропогенного воздействия в гумусовом горизонте почв 10- и 20-летней залежи происходило снижение подвижности фосфатов, особенно в нижней его части. Можно также предположить наличие связи уменьшения



Рис. 4. Запасы водорастворимого, обменного и необменного калия в слое 0–30 см, т/га.

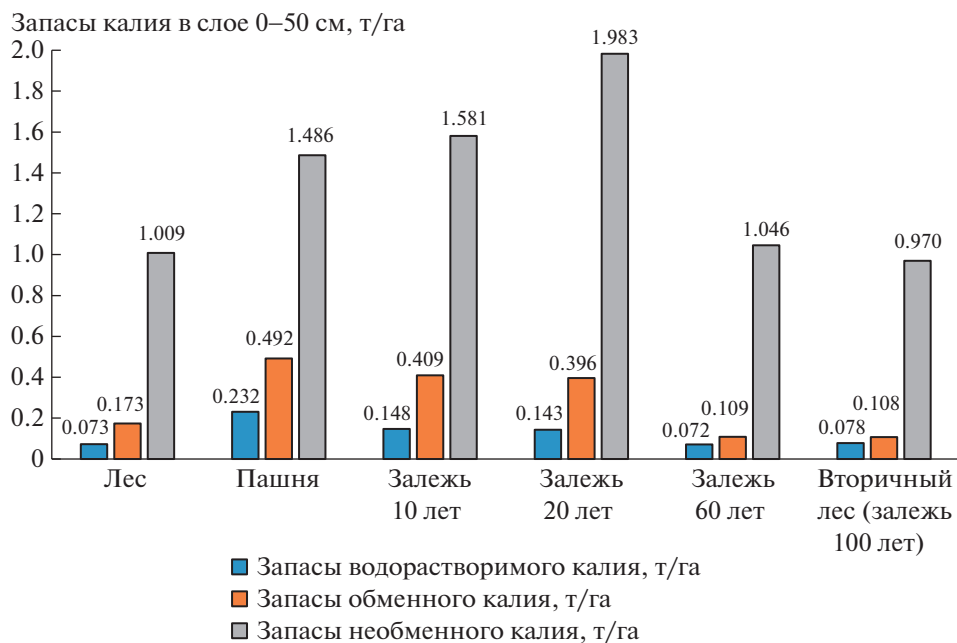


Рис. 5. Запасы водорастворимого, обменного и необменного калия в слое 0–50 см, т/га.

подвижности фосфатов с произрастающей в этот период времени растительностью, которая приводила к уменьшению промачивания почвенного профиля. При сплошном проективном покрытии поверхности почвы уменьшались потери почвенных фосфатов на 65, фосфора удобрения – на 97% [24].

Вниз по профилю происходило увеличение содержания доступных соединений фосфора, что связано, по-видимому, с его миграцией с нисходящим током влаги. Необходимо отметить достаточно высокую мобильность фосфатов, которая удерживалась на протяжении 10–20 лет, сравни-

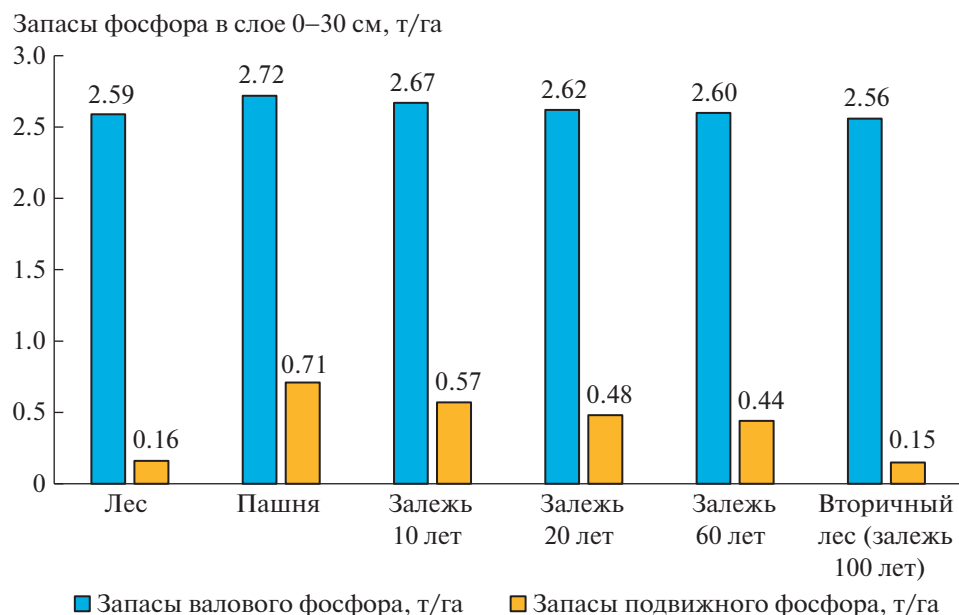


Рис. 6. Запасы валового и подвижного фосфора в слое 0–30 см, т/га.

мую с подвижностью фосфатов в пахотном слое окультуренной почвы.

В почвах, оставленных без использования ≈ 60 и 100 лет назад, отмечено существенное снижение подвижности фосфатов. Содержание лабильного фосфора приближалось к таковому в целинной лесной почве. В почве 60-летней залежи была заметна сильная миграция мобильного фосфора из верхнего подгоризонта бывшего пахотного слоя в нижний подгоризонт, где его содержание было примерно в 5 раз больше. Запасы различных форм фосфора в исследованных почвах приведены на рис. 6. Эмпирические модели динамики запасов подвижного и валового фосфора по мере увеличения срока нахождения почвы в залежи представлены в табл. 3.

Полученные данные позволили утверждать, что окультуренная дерново-подзолистая песчаная иллювиально-железистая почва при выведении из сельскохозяйственного оборота утрачивает положительные изменения, достигнутые в результате окультуривания. Изменяется плотность сложения. Нарушенное антропогенным воздействием строение профиля стремится к своему исходному состоянию. Снижаются содержание и запасы всех форм элементов питания.

Разработанные эмпирические модели изменения запасов всех форм соединений калия, фосфора и валового азота по мере увеличения возраста залежной почвы оказались статистически значимыми на высоком уровне значимости (табл. 3). По средней относительной скорости снижения

запасов элементов питания (средний темп снижения показателей, логарифмическая производная) все изученные элементы образуют следующий по возрастанию ряд (v): валовой фосфор < валовой азот < необменный калий < водорастворимый калий < подвижный фосфор < обменный калий.

Средняя относительная скорость снижения запасов валового фосфора существенно меньше по абсолютной величине, чем запасов подвижного фосфора и азота (абсолютная величина $v_2 = -0.00052$ существенно меньше, чем абсолютная величина коэффициентов $v_3 = -0.0136$ и $v_1 = -0.00529$). Средняя относительная скорость снижения запасов подвижного фосфора была близка к средней относительной скорости снижения содержания обменной формы калия и к средней относительной скорости снижения содержания водорастворимой формы калия ($v_3 = -0.0136$, $v_6 = -0.0185$, $v_4 = -0.012$). Средняя относительная скорость снижения показателя для необменной формы калия существенно меньше по абсолютной величине, чем для обменной формы калия и водорастворимой формы ($v_8 = -0.008$ и $v_9 = -0.006$ по сравнению с $v_6 = -0.0185$, $v_7 = -0.017$, $v_4 = -0.012$, $v_5 = -0.01$).

Статистически значимая взаимосвязь водорастворимой и необменной, обменной и необменной форм калия отсутствовала. Обнаружена статистически значимая на высоком уровне зна-



Рис. 7. Взаимосвязь водорастворимого и обменного калия в слое 0–30 см.

чимости взаимосвязь водорастворимой и обменной форм калия – модель (1.2.1) (рис. 7).

Эмпирическая модель взаимосвязи водорастворимого и обменного калия в слое 0–30 см имеет вид:

$$y_{1.1} = 0.0175 + 0.32y_{2.1}, \quad (1.2.1)$$

где $y_{1.1}$ – водорастворимый калий, $y_{2.1}$ – обменный калий.

Для модели (1.2.1) $p = 0.01$ (p – value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.9$.

ВЫВОДЫ

1. Отсутствие антропогенного воздействия в течение различного времени накладывало значительный отпечаток на характер растительности. В растительном покрове 10-летней залежи преобладал злаковый компонент. Через 20 лет после прекращения использования доля злаковых уменьшалась, появлялись растения-ацидофилы. Растительность 60-летней залежи характеризовалась отсутствием бобовых и злаковых трав и восстановлением леса. Характер растительности вторичного леса (100 лет без использования) был близок к таковому на целинной почве.

2. Строение профиля целинной лесной почвы обусловлено одновременным прохождением дернового и подзолистого процессов. При окультуривании создавался гомогенный пахотный слой

без видимых признаков оподзоливания. Строение профиля залежных почв с течением времени частично приобретало исходное генетическое состояние.

3. Минимальный показатель плотности сложения был характерен для пахотного слоя (1.13–1.26 г/см³). При смене растительности в течение 10–20 лет бывший пахотный слой дифференцировался по плотности на 2 подгоризонта с уплотнением нижней части. При восстановлении леса величины плотности сложения практически совпадали с плотностью горизонтов целинной почвы.

4. Максимальные запасы валового азота (~4 т/га) установлены в 0–30 см слое пахотной почвы. В процессе увеличения возраста залежной почвы запасы азота неуклонно снижались. Спустя 100 лет после прекращения использования почвы в культуре запасы этого элемента превосходили запасы в нативной почве, что свидетельствовало о сохранении положительного влияния окультуривания.

5. Количество всех форм соединений калия в дерново-подзолистой целинной почве было невелико. Вовлечение почвы в культуру приводило к увеличению содержания соединений калия в пахотном и подпахотном слоях. При этом происходило смещение пропорций между формами калия в сторону накопления обменной. В отсутствие антропогенного воздействия в течение 10 лет наблюдали возрастание содержания обменной и необменной форм, в дальнейшем со-

держанию всех форм калия неуклонно снижалось. В почве вторичного леса калийное состояние практически совпадало с таковым в целинной почве как по содержанию различных соединений, так и по соотношению между ними. Установлена связь между содержанием водорастворимой и обменной формами калия.

6. Наибольшее содержание валового фосфора было характерно для верхних горизонтов пахотной почвы и почв залежей 10–20 лет. При увеличении срока нахождения почвы в залежи количество валового фосфора снижалось. Распределение подвижных соединений фосфора по профилю почв носило элювиальный характер. Окультуривание почвы способствовало увеличению содержания подвижных фосфатов в пахотном слое. Под травянистой растительностью отмечены незначительные изменения в содержании подвижных фосфатов по сравнению с пахотной почвой, тогда как при восстановлении леса происходило их резкое уменьшение.

7. Разработаны эмпирические модели, описывающие изменения запасов различных форм соединений калия, фосфора и валового азота при переходе от пашни к лесу. Проведено ранжирование изученных показателей по темпам потерь элементов питания за 100 лет нахождения почвы в залежи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.И., Янко Ю.Г.* Мелиорация, как необходимое средство развития сельского хозяйства нечерноземной зоны России // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 67–78.
2. *Баранова О.Ю., Номеров Г.Б., Строганова М.Н.* Изменение свойств пахотных дерново-подзолистых почв при зарастании их лесом // *Почвообразование в лесных биогеоценозах*. М.: Наука, 1989. С. 60–78.
3. *Литвинович А.В.* Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны // *Агрохимия*. 2009. № 7. С. 85–93.
4. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В.* Изменение показателей почвенного плодородия и лабильной части гумуса дерново-подзолистой песчаной почвы при интенсивном окультуривании и в условиях хозяйственного истощения // *Агрохимия*. 2003. № 4. С. 14–21.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Фомина А.С.* Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой песчаной почвы при окультуривании и последующем исключении из хозяйственного оборота // *Агрохимия*. 2004. № 8. С. 13–19.
6. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф., Чернов Д.В., Фомина А.С.* Изменение кислотно-основных свойств окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы в зависимости от срока нахождения в залежи // *Почвоведение*. 2005. № 10. С. 1232–1239.
7. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Чернов Д.В.* Калийное состояние дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы при окультуривании и под залежью // *Почвоведение*. 2006. № 7. С. 876–882.
8. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Трансформация состава гумуса дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава под действием возрастающих доз извести и в постагрогенный период // *Почвоведение*. 2010. № 11. С. 1362–1369.
9. *Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Шабанов М.В.* Изменение кислотно-основных свойств окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в процессе постагрогенной трансформации // *Почвоведение*. 2009. № 6. С. 680–686.
10. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Буре В.М.* Скорости изменения кислотно-основных параметров, содержания общего углерода и состава гумуса в дерново-подзолистой песчаной почве при переходе от пашни к лесу при сукцессии залежных земель // *Агрохимия*. 2015. № 11. С. 19–29.
11. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы на залежи // *Почвоведение*. 2007. № 11. С. 1323–1329.
12. *Качинский Н.А.* Физика почв. 1965. 320 с.
13. *Лабораторно-практические занятия по почвоведению*. СПб.: Проспект науки, 2021. 332 с.
14. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
15. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
16. *Becketteaut P.H., Naefagy M.H.* Potassium-calcium exchange equilibria in soils. The location of nonspecific sites // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 1967. V. 18. № 2. P. 73–77.
17. *Иванов А.И., Иванов И.А., Воробьев В.А., Лямцева Е.Г.* Изменение калийного состояния хорошо окультуренной дерново-подзолистой почвы при применении калийдефицитной системы удобрения // *Агрохимия*. 2009. № 4. С. 21–26.
18. *Niederbudde E.A., Becker N.N., Schon H.* Wanderungen von Eigenschaften einer Schwarzerde – Parabraunerde als Folge von Stallmist und Mineraldüngung // *Landwirt. Forschung*. 1977. V. 30. № 1. P. 29–45.
19. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Трансформация состава и свойств хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава. СПб.: АФИ, 2011. 108 с.

20. Якименко В.Н. Фиксация и десорбция калия некоторыми автоморфными почвами // *Агрохимия*. № 2. 1995. С. 12–18.
21. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 230 с.
22. Забавская К.М. Фиксация калия разными почвами и выделенными из них механическими фракциями // *Агрохимия*. 2007. № 7. С. 38–42.
23. Ефимов В.Н., Иванов А.И. Скрытая деградация хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв России // *Агрохимия*. 2001. № 6. С. 5–10.
24. Петербургский А.В., Никитишин В.И., Шабеев В.П. Потери питательных веществ из почвы и внесенных удобрений вследствие вымывания // *Агрохимия*. 1976. № 7. С. 144–155.

Study of Indicators of Soil Fertility of Cultivated Sod-Podzolic Sandy Soil at Different Stages of Formation of Natural Ecosystems

A.V. Litvinovich^{a,#}, A.S. Fomina^b, O.Y. Pavlova^a, A.V. Lavrishchev^b, and V.M. Bure^{a,c}

^a*Agrophysical Research Institute*

Grazhdanskiy prosp. 14, Sankt-Petersburg 195220, Russia

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University*

Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

^c*Sankt-Petersburg State University*

Universitetskaya nab. 6–9, Saint-Petersburg 199034, Russia

[#]*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru*

The changes in the vegetation cover of cultivated sod-podzolic illuvial-ferruginous sandy soil located in the deposit for about 100 years have been traced. The description of the soil profile at different stages of the formation of natural ecosystems is given. It is shown that the positive changes (addition density, content and stocks of various forms of nutrition elements) achieved as a result of 200 years of soil exploitation are gradually lost as the term of cessation of anthropogenic impact increases. Empirical models describing the dynamics of stocks of various forms of potassium, phosphorus and total nitrogen compounds during the transition from arable land to forest have been developed. The data on the rate of loss of individual elements of soil fertility 100 years after the cessation of anthropogenic impact are given. The ranking of the studied indicators according to the rate of loss of batteries for 100 years of soil in the deposit was carried out. According to the average relative rate of decrease in the stocks of batteries (the average rate of decline, logarithmic derivative), all the studied elements form the following ascending series (v): gross phosphorus (0.00052) < gross nitrogen (0.00529) < non-exchangeable potassium (0.008) < water-soluble potassium (0.012) < mobile phosphorus (0.0136) < exchange potassium (0.0185).

Key words: sod-podzolic light loamy soil, deposits of different ages, natural ecosystems, content and stocks of nutrients, empirical models.