

DOI: 10.7868/S3034496426060020
УДК 631.416.1/.2:631.445(571.63)

Оригинальная статья / Original Article

Постагrogenные изменения содержания и запасов общего азота и подвижного фосфора в агротемногумусовых подбелах Приморского края

М.Л. Бурдуковский*, Я.О. Тимофеева

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток,
Российская Федерация

*E-mail: mburdukovskii@gmail.com

Аннотация. Исследовали постагrogenную трансформацию содержания и запасов общего азота и подвижного фосфора в агротемногумусовых подбелах (Luvic Albic Mollic Planosols) Приморского края. Полевые исследования проводили на залежных участках различного возраста (15, 20, 35, 80 и 95 лет) с использованием метода хроносеквенции. В качестве контрольного варианта использовали образцы с пашни. Отбор образцов осуществляли по морфологическим горизонтам до глубины 100 см. В первые десятилетия после вывода земель из селхозоборота содержание подвижного фосфора в почве значительно снижалось. Наибольшие запасы подвижных форм фосфора выявлены в верхнем горизонте пашни и в зрелых залежах. Содержание общего азота в почве также уменьшалось на ранних стадиях залежного состояния. Устойчивая тенденция к накоплению общего азота в почве отмечена спустя 20 лет после прекращения сельскохозяйственного использования. В зрелой 95-летней залежи запасы общего азота в слое 0–25 см превышали уровень контрольного варианта на 22%. Почвы залежных участков по запасам исследованных элементов питания между собой статистически значимо не различались.

Ключевые слова: азот, фосфор, залежи, постагrogenные почвы

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Ссылка для цитирования: Бурдуковский М.Л., Тимофеева Я.О. Постагrogenные изменения содержания и запасов общего азота и подвижного фосфора в агротемногумусовых подбелах Приморского края. *Агрохимия / Agricultural Chemistry*. 2026. № 6. С. 16–26. <https://doi.org/10.7868/S3034496426060020>

Post-Agrogenic Changes in the Content and Stocks of Total Nitrogen and Mobile Phosphorus in Agro-Dark-Humus Podbels of Primorsky Krai

M.L. Burdukovskii*, Ya.O. Timofeeva

Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch of the RAS,
Vladivostok, Russian Federation

*E-mail: mburdukovskii@gmail.com

Abstract. The post-agrogenic transformation of the content and reserves of total nitrogen and mobile phosphorus in agro-dark-humus podbels (Luvic Albic Mollic Planosols) of Primorsky Krai was studied. Field studies were carried out on fallow areas of various ages (15, 20, 35, 80 and 95 years old) using the chronosequence method. Samples from arable land were used as a control variant. Sampling was carried

out along morphological horizons up to a depth of 100 cm. In the first decades after the withdrawal of land from agricultural circulation, the content of mobile phosphorus in the soil decreased significantly. The largest reserves of mobile forms of phosphorus were found in the upper horizon of arable land and in mature fallow. The total nitrogen content in the soil also decreased in the early stages of the fallowing. A steady trend towards the accumulation of total nitrogen in the soil was noted 20 years after the cessation of agricultural use. In a mature 95-year-old fallow, total nitrogen reserves in the 0–25 cm layer exceeded the control level by 22%. The soils of the fallow areas did not differ significantly from each other in terms of the reserves of the studied nutrients.

Keywords: nitrogen, phosphorus, fallows, post-agrogenic soils

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 124012400285-7).

Conflict of interest. The authors of this paper declare that they have no conflict of interest.

For citation: Burdukovskii M.L., Timofeeva Ya.O. Post-agrogenic changes in the content and stocks of total nitrogen and mobile phosphorus in agro-dark-humus podbels of Primorsky Krai. *Agrokhimiia / Agricultural Chemistry*. 2026;(6):16–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034496426060020>

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление заброшенных агроландшафтов за последние несколько десятилетий стало одним из ключевых направлений экологической политики во многих странах мира. Среди основных целей подобных мероприятий – снижение рисков деградации почв, восстановление биоразнообразия, повышение уровня экосистемных услуг и возвращение земель в сельскохозяйственный оборот.

Изменения почвы, вызванные длительным сельскохозяйственным использованием, в том числе деградация химических и физических характеристик, могут затруднять восстановление региональных экосистем на залежных участках [1; 2]. Интенсивное использование земель для выращивания культур, особенно при недостаточном или чрезмерном внесении удобрений, может приводить к истощению питательных элементов в почве [3; 4].

Залежные земли представляют собой форму вторичной сукцессии, начинающуюся непосредственно после прекращения сельскохозяйственного использования пашни. Для изучения вторичных сукцессий часто используется метод хроносеквенции [2; 5–8]. Основная идея метода заключается в комплексном исследовании разновозрастных залежных участков для понимания динамики изменений не только состава растительности, но и почвенных свойств [9].

В научной литературе, особенно отечественной, долгосрочные исследования залежных земель часто сосредоточены на изучении динамики углерода в почве [2; 6–8; 10]. Дело в том, что в 1990-е гг. на территории нашей страны произошли масштабные преобразования в аграрном секторе. Большие площади пашни были выведены из сельскохозяйственного использования и начали зарастать луговой и древесной растительностью. Начиная с 1992 г. и в течение следующих 25 лет ≈40 млн га пахотных земель было выведено

из сельскохозяйственного оборота в залежное состояние [4; 10–12]. Эти территории, ранее являвшиеся источником выбросов CO₂, стали функционировать как его накопители. Оценки показывают, что среднегодовое накопление углерода в почвах бывших пашен РФ составляло порядка 45 млн т в год [10; 12].

Одновременно с потоками углерода изменяется направленность и количественные характеристики потоков других биофильных элементов. В последние годы в работах, посвященных исследованию динамики углерода в почвах залежей, наблюдается рост интереса к изучению содержания в них азота и фосфора [1; 3–7; 13–15]. Доказано, что наличие этих элементов в достаточном объеме способствует накоплению органического углерода в почве [16]. Запасы азота в почве могут служить индикатором потенциала накопления углерода [17]. Содержание фосфора выступает лимитирующим фактором при накоплении углерода на этапе активного зарастания залежей [13]. В целом сведения о содержании и запасах азота и особенно фосфора в почвах залежей остаются фрагментарными и недостаточно проясненными.

Важно отметить, что в научных исследованиях, посвященных оценке запасов элементов в почве, отбор проб, как правило, осуществляется на равных по глубине интервалах. Такой подход зачастую игнорирует морфологически выраженные генетические почвенные горизонты [18]. Кроме того, отбор проб обычно ограничивается верхним горизонтом почвы (0–20 см) [1; 3; 7; 8; 12; 13], реже охватывает нижележащие горизонты (до 20–60 см) [2; 11] и толщу до 1 метра (100 см) [5; 15; 19]. Для более точного понимания динамики изменения почвенных свойств, для корректной оценки запасов элементов в почве необходимо опираться на данные, отражающие характеристики как отдельных генетических горизонтов, так и всего почвенного профиля. Однако такие сведения в научной литературе встречаются довольно редко.

Цель работы — определить постагрогенное изменение содержания общего азота и подвижного фосфора в агротемногумусовых подбелах, а также оценить характер изменения запасов этих элементов в ходе естественного восстановления.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в Уссурийском городском округе Приморского края в июле–августе 2021–2022 гг. В качестве объектов изучения выбраны агротемногумусовые подбелы, классифицируемые по WRB-2015 как Luvic Albic Mollic Planosols (Epiloamic, Endoclayic, Aric) [20]. Почвы отбирали на залежных участках возрастом 15, 20, 35, 80 и 95 лет, которые ранее были заняты под овощные севообороты (рис. 1). Зрелые залежи возрастом 80 и 95 лет подвергались периодическому обкашиванию. Данные по пахотным почвам, полученные в ходе предыдущих агрохимических исследований и опубликованные авторами [21], использовали в качестве контрольных. В год отбора образцов возделываемой культурой была соя. Удобрения в контрольных вариантах не использовали в течение 80 лет.

Темногумусовые подбелы (PU–ELnn–BTnn–BT–C) широко распространены в пределах Западно-Приморской и Среднеамурской равнин. Почвы формируются на озерно-аллювиальных отложениях под разнотравно-злаковой растительностью. В Приморском крае темногумусовые подбелы составляют основу пахотного фонда региона [22]. Для этих почв характерен тяжелый гранулометрический состав (содержание глинистых

частиц в верхнем горизонте достигает 80–85%), высокая степень гумусированности (табл. 1). Они подвержены быстрому переувлажнению корнеобитаемого слоя, а в период отсутствия осадков — интенсивному иссушению.

Смешанные образцы почвы отбирали по всему профилю разреза и из 3-х прикопок с выделением отдельных горизонтов. Для последующих анализов образцы высушивали на воздухе при комнатной температуре.

Определение подвижных форм фосфора проводили в 0,2 н. солянокислой вытяжке по методу Кирсанова колориметрическим методом на спектрофотометре КФК-2 [23]. Содержание общего азота ($N_{\text{общ}}$) определяли методом хроматографии с использованием элементного CHNS-анализатора Flash 2000 (Thermo, Великобритания). Все определения выполнены в трехкратной повторности.

Запасы элементов в почвенном горизонте вычисляли по формуле:

$$Q = m \times h \times dv,$$

где Q — запасы элементов (кг/га, т/га), m — содержание элемента (мг/кг — для подвижного фосфора, % для общего азота), h — мощность горизонта (см), dv — плотность сложения почвенного горизонта (г/см^3).

Оценку агрохимических показателей проводили согласно шкале, разработанной В.И. Ознобихиным и Э.П. Синельниковым для почв Приморского края [24].

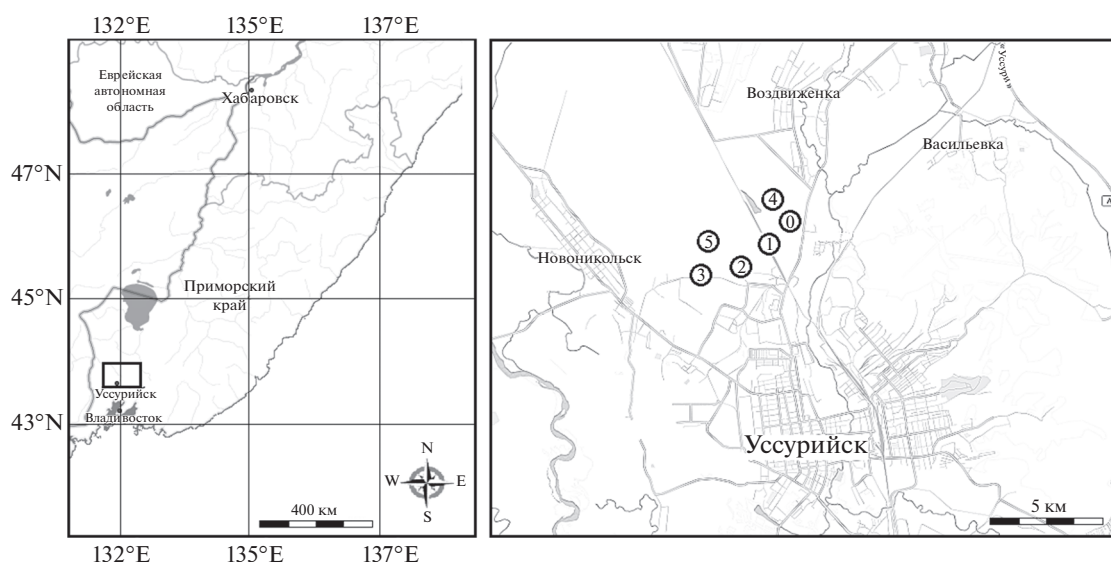


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Обозначения и координаты: 0 — контроль (43,859276, 131,944837), 1 — залежь, 15 лет (43,856500, 131,942569), 2 — залежь, 20 лет (43,833282, 131,907850), 3 — залежь, 35 лет (43,842197, 131,920985), 4 — залежь, 80 лет (43,859047, 131,943925), 5 — залежь, 95 лет (43,839615, 131,903897)

Fig. 1. Map-diagram of the research area. Designations and coordinates: 0 — control (43.859276, 131.944837), 1 — fallow, 15 years (43.856500, 131.942569), 2 — fallow, 20 years (43.833282, 131.907850), 3 — fallow, 35 years (43.842197, 131.920985), 4 — fallow, 80 years (43.859047, 131.943925), 5 — fallow, 95 years (43.839615, 131.903897)

Таблица 1. Основные агро- и физико-химические характеристики верхнего горизонта агротемногумусовых подбелов различного возраста (среднее $\pm$ стандартное отклонение)**Table 1.** Main agro- and physico-chemical characteristics of the upper horizon of agro-dark-humus podbels of various ages (mean $\pm$ standard deviation)

Показатель	Величина
Гумус, %	4,00 $\pm$ 0,20
N _{общ} , %	0,18 $\pm$ 0,03
pH _{KCl} , ед.	4,30 $\pm$ 0,30
K ₂ O подвижный, мг/кг почвы	179 $\pm$ 20
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг почвы	27,50 $\pm$ 2,10
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	14,70 $\pm$ 0,50
Плотность, г/см ³	1,10 $\pm$ 0,05
Физическая глина, %	54,20 $\pm$ 1,73
Физический ил, %	9,00 $\pm$ 0,23

Статистическую обработку данных проводили в программе Microsoft Office Excel 2007. Для сравнения независимых выборок применяли непараметрический *U*-критерий Манна – Уитни. Часто при исследовании почв, как и в нашей работе, распределения данных не соответствуют нормальному, что делает применение параметрических методов статистически необоснованным [25]. Применение *U*-критерия позволяет корректно сравнивать независимые выборки по количественным показателям.

Анализ образцов выполняли в специализированной лаборатории на технической базе Центра коллективного пользования биотехнологии и генетической инженерии (ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основное накопление подвижных форм P₂O₅ отмечено в верхнем горизонте исследованных почв, тогда как в более глубоких горизонтах содержание существенно снижалось, достигая минимума в горизонтах BTg (табл. 2).

Наибольшая концентрация фосфатов выявлена в верхней части профиля современной пашни. Регулярная распашка почвы, в отсутствие внесения удобрений в контрольном варианте опыта, могла усиливать интенсивность и направленность микробиологических процессов, что, в свою очередь, активизировало переход фосфатов в подвижные формы [11]. В исследованном временном ряду на протяжении первых 35 лет естественного зарастания залежей содержание подвижных форм P₂O₅ в почве последовательно снижалось. Это подтверждает тот факт, что пахотный горизонт является основным источником фосфора в почвах [1–3; 5]. Наряду с пахотными почвами, высокое содержание подвижных форм P₂O₅ выявлено в верхнем горизонте залежей 80- и 95-летнего возраста. Повышенное его содержание в данном случае связано с процессом

задерновывания, в ходе которого на определенной стадии сукцессии на залежных участках формируется морфологически выраженный слой дернины. Известно, что поступление фосфора в верхние горизонты почвы во многом связано с активностью корневых систем [2]. Интенсивное ежегодное разложение растительного опада способствовало биогенному накоплению питательных веществ за счет усиления микробиологической активности в корнеобитаемом слое [11].

Большинство почв Дальнего Востока, несмотря на высокое содержание валового фосфора, характеризуются низким уровнем содержания его подвижных форм [26; 27]. Часто подвижные формы P₂O₅ присутствуют только в пределах агрогенного горизонта и практически не обнаруживаются ниже его границ [28; 29]. Это обусловлено низкой мобильностью фосфора из-за быстрой абiotической фиксации в труднорастворимых минеральных соединениях [30–32]. На низкое содержание подвижного P₂O₅ в регионе исследования существенное влияние оказывает процесс конкрециобразования, при котором фосфор переходит в недоступное фиксированное состояние – железомарганцевые конкреции [33; 34]. В целом, содержание подвижных форм P₂O₅ в изученных почвах оценивается как очень низкое.

В ходе исследования было установлено, что максимальные запасы подвижных форм P₂O₅ сосредоточены в верхней части профилей. В первые десятилетия постагрогенного периода запасы существенно снижались в бывшем пахотном горизонте и нижележащем. Наименьшие запасы подвижных форм P₂O₅ выявлены в 35-летних залежах, составляя 51,2 $\pm$ 5,0 кг/га в бывшем пахотном горизонте и 127,0 $\pm$ 7,1 кг/га в толще 0–100 см (рис. 2). Наши результаты подтверждают выводы других авторов о снижении запасов подвижных форм P₂O₅ в почвах в первые годы после вывода земель из сельскохозяйственного оборота [5; 6; 13].

Наибольшая концентрация общего азота (N_{общ}) в исследованных

Таблица 2. Динамика содержания подвижных форм P_2O_5 в распахиваемом и залежных агротемногумусовых подбелах различного возраста (среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Table 2. Dynamics of the content of mobile forms of P_2O_5 in plowed and fallow agro-dark-humus podbels of various ages (mean $\pm$ standard deviation)

Глубина, см	Содержание, мг/кг	Запасы, кг/га
Контроль (пашня)		
0–27	$10,4 \pm 2,7$	247 ± 17
27–42	$5,24 \pm 0,18$	$92,8 \pm 5,2$
42–91	$0,20 \pm 0,01$	$9,31 \pm 0,19$
91–132	$0,01 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,01$
Залежь, 15 лет		
0–15	$8,33 \pm 1,28$	118 ± 7
15–25	$3,02 \pm 0,80$	$41,1 \pm 2,3$
25–50	$1,05 \pm 0,03$	$33,9 \pm 3,2$
50–100	$0,01 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,01$
Залежь, 20 лет		
0–15	$7,61 \pm 1,10$	127 ± 8
15–25	$2,23 \pm 0,08$	$24,5 \pm 2,7$
25–50	$1,02 \pm 0,01$	$30,9 \pm 3,6$
50–90	$0,01 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$
Залежь, 35 лет		
0–15	$6,47 \pm 1,33$	$51,2 \pm 5,0$
15–25	$2,36 \pm 0,07$	$22,5 \pm 1,9$
25–50	$0,90 \pm 0,02$	$30,6 \pm 3,2$
50–90	$0,01 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,01$
Залежь, 80 лет		
4–11	$10,5 \pm 2,3$	115 ± 6
11–35	$3,40 \pm 0,08$	$77,5 \pm 4,3$
35–55	$1,36 \pm 0,02$	$29,9 \pm 3,1$
55–111	$0,01 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,02$
Залежь, 95 лет		
4–10	$9,37 \pm 0,21$	101 ± 6
10–33	$3,52 \pm 0,09$	$80,2 \pm 4,9$
33–54	$1,41 \pm 0,04$	$34,1 \pm 3,2$
54–100	$0,01 \pm 0,01$	$0,58 \pm 0,01$

почвах отмечена в верхнем горизонте (табл. 3). С увеличением глубины его содержание постепенно уменьшалось. Содержание $N_{\text{общ}}$ в пахотном слое современной пашни составляло $0,15 \pm 0,01$, в подпахотном слое – $0,11 \pm 0,01\%$.

Полученные данные близки к показателям почвенно-агрохимических исследований, проведенных в регионе ранее [26]. На сельскохозяйственных угодьях 2/3 азота, необходимого выращиваемым растениям, создается деятельностью микроорганизмов-дiazотрофов [35]. Вклад биологической азотфиксации превышает поступление азота в почву от азотных удобрений в 2 раза [36]. Поскольку в контрольном варианте опыта не использовали

НПК-удобрения, резервы азота во многом пополнялись за счет деятельности азотфиксирующих бактерий одной из культур севооборота – сои. Известно, что симбиоз клубеньковых бактерий рода *Rhizobium* с представителями семейства бобовых занимает первое место по вкладу в биологическую фиксацию азота [37; 38].

В ходе исследования было выявлено существенное различие в содержании $N_{\text{общ}}$ между залежными и пахотными почвами. В первые годы после вывода почвы из сельскохозяйственного оборота уменьшение содержания $N_{\text{общ}}$ отмечено не только в бывшем пахотном горизонте, но и по профилю в целом. В 15-летней залежи содержание $N_{\text{общ}}$ в верхнем горизонте PU составляло

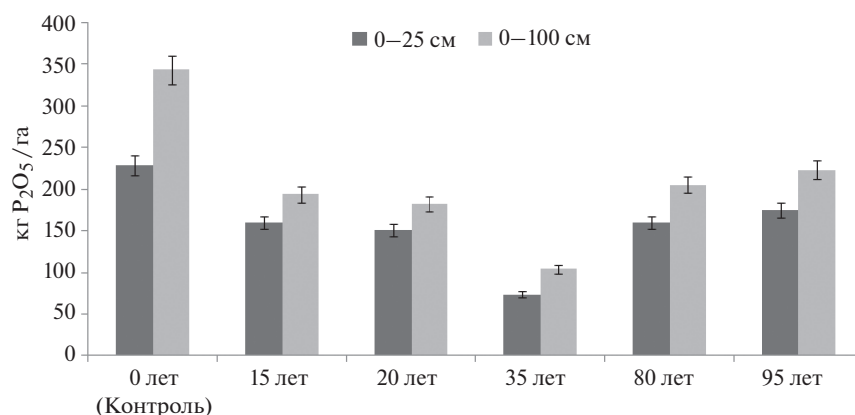


Рис. 2. Запасы подвижных форм P_2O_5 в распаханном и залежных агротемногумусовых подбелах различного возраста

Fig. 2. Stocks of mobile forms of P_2O_5 in plowed and fallow agro-dark-humus podbels of various ages

Таблица 3. Динамика содержания $N_{\text{общ}}$ в распаханном и залежных агротемногумусовых подбелах различного возраста (среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Table 3. Dynamics of the N_{total} content in plowed and fallow agro-dark-humus podbels of various ages (mean $\pm$ standard deviation)

Глубина, см	Содержание, %	Запасы, т/га
Контроль (пашня)		
0–27	$0,15 \pm 0,01$	$3,52 \pm 0,10$
27–42	$0,11 \pm 0,01$	$1,93 \pm 0,05$
42–91	$0,01 \pm 0,01$	$4,04 \pm 0,11$
91–132	$0,01 \pm 0,01$	$0,59 \pm 0,01$
Залежь, 15 лет		
0–15	$0,10 \pm 0,01$	$1,51 \pm 0,03$
15–25	$0,09 \pm 0,01$	$1,18 \pm 0,03$
25–50	$0,07 \pm 0,01$	$2,42 \pm 0,07$
50–100	$0,02 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,02$
Залежь, 20 лет		
0–15	$0,16 \pm 0,02$	$1,91 \pm 0,04$
15–25	$0,08 \pm 0,01$	$0,90 \pm 0,03$
25–50	$0,09 \pm 0,01$	$2,76 \pm 0,08$
50–90	$0,02 \pm 0,01$	$1,02 \pm 0,04$
Залежь, 35 лет		
0–15	$0,16 \pm 0,01$	$1,71 \pm 0,05$
15–25	$0,13 \pm 0,01$	$1,23 \pm 0,04$
25–50	$0,09 \pm 0,01$	$2,91 \pm 0,10$
50–90	$0,03 \pm 0,01$	$1,49 \pm 0,04$
Залежь, 80 лет		
4–11	$0,19 \pm 0,01$	$2,05 \pm 0,04$
11–35	$0,13 \pm 0,01$	$2,99 \pm 0,07$
35–55	$0,11 \pm 0,01$	$2,74 \pm 0,05$
55–111	$0,04 \pm 0,01$	$2,71 \pm 0,03$
Залежь, 95 лет		
4–10	$0,19 \pm 0,02$	$2,11 \pm 0,06$
10–33	$0,14 \pm 0,01$	$3,23 \pm 0,08$
33–54	$0,11 \pm 0,01$	$2,63 \pm 0,07$
54–100	$0,04 \pm 0,01$	$2,10 \pm 0,06$

$0,10 \pm 0,01\%$, что на 33% меньше, чем в аналогичном горизонте контрольного варианта.

Постепенное зарастание залежей способствовало изменению почвенного профиля в результате накопления растительных остатков, особенно в верхних слоях, формированию горизонта A0. Обычно такая трансформация профиля благоприятствует снижению испарения с поверхности, увеличивает влажность почвы [14], способствует накоплению органического углерода, который, в свою очередь, является основным источником энергии для жизнедеятельности гетеротрофной микрофлоры, разлагающей останки и насыщающей субстрат неорганическими азотсодержащими соединениями [39; 40].

В исследованном временном ряду значимое увеличение содержания $N_{\text{общ}}$ произошло через 20 лет после вывода почв из сельскохозяйственного оборота и далее продолжало увеличиваться. За 95 лет залежного режима содержание $N_{\text{общ}}$ увеличилось на 21% относительно современной пашни, составляя $0,19 \pm 0,02$ против $0,15 \pm 0,01\%$ соответственно. Интересно, что увеличение содержания $N_{\text{общ}}$ отмечено не только в верхней толще, но и в нижележащих горизонтах по всей глубине исследованного профиля. Такая динамика может быть обусловлена ассоциативной азотфиксацией и вертикальной миграцией разных форм элемента, в том числе через корневые системы растений [41; 42].

В научной литературе имеется обширная информация о содержании азота в почвах и его запасах, но большая часть исследований сосредоточена на верхнем горизонте. Данных о запасах азота в более глубоких горизонтах значительно меньше и для почв исследованного региона в частности. В ходе исследования было установлено, что запасы $N_{\text{общ}}$ изменялись аналогично его содержанию — самые низкие показатели отмечены в бывшем пахотном горизонте 15-летней залежи. Позитивная динамика запасов $N_{\text{общ}}$ начиналась через 20 лет после вывода земель из оборота — накопление происходило как в верхнем горизонте почвы, так и в общей толще 0–100 см (рис. 3).

Максимальные запасы зафиксированы в почве 95-летней залежи и в варианте современной пашни. При этом в контрольном варианте запасы $N_{\text{общ}}$ в толще 0–25 см составляли $3,26 \pm 0,09$ т/га, что на 22% меньше относительно зрелой залежи. Накоплению $N_{\text{общ}}$ в залежах способствовало отсутствие агротехнических мероприятий, рост разнообразия видов и проективного покрытия растительного покрова на исследованных участках, что согласуется с результатами работ других авторов [43].

Вследствие высокой вариабельности запасов исследованных элементов питания значимые различия, проверенные по коэффициенту Манна — Уитни, были выявлены только между контролем и постагрогенными участками. Почвы залежей по запасам $N_{\text{общ}}$ и валовым формам P_2O_5 между собой значимо не различались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показали, что в агротемногумусовых подбелах юга Приморского края происходят заметные изменения в содержании $N_{\text{общ}}$ и подвижных форм P_2O_5 после изъятия земель из сельскохозяйственного оборота. В первые десятилетия после прекращения эксплуатации отмечено снижение содержания и запасов подвижных форм P_2O_5 и $N_{\text{общ}}$, особенно в верхних горизонтах почвенного профиля. Это свидетельствует о том, что агрогенный горизонт является основным источником биогенных элементов на начальном этапе постагрогенного восстановления.

В исследованном временном ряду наибольшая концентрация подвижных форм P_2O_5 выявлена в контрольном варианте. Устойчивая тенденция к накоплению $N_{\text{общ}}$ как в верхних почвенных горизонтах, так и по профилю в целом отмечена спустя 20 лет залежного режима. В залежах старше 80 лет содержание $N_{\text{общ}}$ в верхних горизонтах было максимальным (0,19%), а запасы в слое 0–25 см превышали уровень современной пашни на 14–22%. Среди залежных вариантов высокое содержание подвижных форм P_2O_5 также отмечено в почвах зрелых

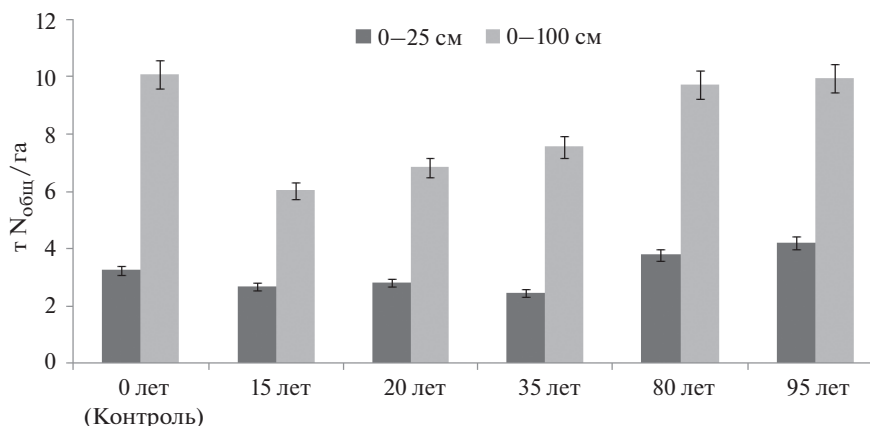


Рис. 3. Запасы $N_{\text{общ}}$ в распаханном и залежных агротемногумусовых подбелах различного возраста
Fig. 3. N_{total} reserves in plowed and fallow agro-dark-humus podbels of various ages

залежей. Вероятно, это связано с формированием дернового горизонта, активизацией микробиологических процессов и усилением биогенной аккумуляции за счет ежегодного накопления растительного опада.

Результаты исследования могут быть использованы при прогнозировании изменений почвенных ресурсов в условиях заброшенных агроландшафтов и при разработке программ устойчивого землепользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smal H., Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus // Plant Soil. 2008. Vol. 305. P. 171–187.
2. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагrogenных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129.
3. Compton J.E., Boone R. Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests // Ecology. 2000. Vol. 81. № 8. P. 2314–2330.
4. Кудеяров В.Н. Баланс азота, фосфора и калия в Земледелии России // Агрохимия. 2018. № 10. С. 3–11.
5. Smal H., Ligeza S., Pranagal J., Urban D., Pietruczyk-Poplawska D. Changes in the stocks of soil organic carbon, total nitrogen and phosphorus following afforestation of post-arable soils: A chronosequence study // For. Ecol. Manage. 2019. Vol. 451. P. 117536.
6. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soil in the Southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. Vol. 152. № 1–2. P. 35–42.
7. Овсепян Л.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Русаков А.В., Кузяков Я.В. Изменение денситометрического фракционного состава органического вещества почв лесостепной зоны в процессе постагrogenной эволюции // Почвоведение. 2020. № 1. С. 56–68.
8. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Караванова Е.И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагrogenной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303.
9. Walker L.R., Wardle D.A., Bardgett R.D., Clarkson B.D. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development // J. Ecol. 2010. Vol. 98. № 4. P. 725–736.
10. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15.
11. Кузнецова И.В., Тихонравова П.И., Бондарев А.Г. Изменение свойств залежных серых лесных почв // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1142–1150.
12. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Largescale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. Vol. 133. P. 461–466.
13. Li D., Wen L., Zhang W., Yang L., Xiao K., Chen H., Wang K. Afforestation effects on soil organic carbon and nitrogen pools modulated by lithology // For. Ecol. Manage. 2017. Vol. 400. P. 85–92.
14. Кудеяров В.Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // Агрохимия. 2021. № 11. С. 3–15.
15. Yang H., Shukla M.K., Begay J. Soil carbon, nitrogen dynamics, and energy, carbon budgeting in response to uncultivated land management with crop biomass in the southwestern US // Soil Till. Res. 2025. Vol. 248. P. 106427.
16. Schulte-Uebbing L., De Vries W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: a meta-analysis // Glob. Change Biol. 2018. Vol. 24. № 2. P. e416–e431.
17. De Vries W., Reinds G.J., Gundersen P., Sterba H. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils // Glob. Change Biol. 2006. Vol. 12. № 7. P. 1151–1173.
18. Gruneberg E., Schoning I., Kalko E.K.V., Weisser W.W. Regional organic carbon stock variability: a comparison between depth increments and soil horizons // Geoderma. 2010. Vol. 155. № 3–4. P. 426–433.
19. Васбиева М.Т. Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2021. № 7. С. 3–12.

20. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015.
21. Бурдуковский М.Л., Тимофеева Я.О., Голов В.И., Киселева И.В., Тимошинов Р.В. Динамика реакции почвенной среды, структурно-агрегатного состояния и запасов углерода агротемногумусовых подбелов в ходе постагрогенного развития // Почвоведение. 2022. № 12. С. 1505–1513.
22. Костенков Н.М., Ознобихин В.И. Почвы и почвенные ресурсы юга Дальнего Востока и их оценка // Почвоведение. 2006. № 5. С. 517–526.
23. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 490 с.
24. Ознобихин В.И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв Приморского края и пути их рационального использования. Уссурийск: Приморский СХИ, 1985. 72 с.
25. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 164–182.
26. Синельников Э.П., Слабко Ю.И. Агрогенезис почв Приморья. М.: ВНИИА, 2005. 280 с.
27. Ивлев А.М., Дербенцева В.И., Голов В.И., Трегубова В.Г. Агрохимия почв юга Дальнего Востока. М.: Круглый год, 2001. 104 с.
28. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Докл. РАСХН. 2013. № 3. С. 30–33.
29. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of Cambisol developed from morainic loam // J. Elementol. 2020. Vol. 25. № 1. P. 181–191.
30. Васбиева М.Т. Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2021. № 7. С. 3–12.
31. Титова В.И., Шафронов О.Д., Варламова Л.Д. Фосфор в земледелии Нижегородской области. Н. Новгород: ВВАГС, 2005. 219 с.
32. Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
33. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
34. Gasparatos D., Massas I., Godelitsas A. Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps // Catena. 2019. Vol. 182. P. 104106.
35. Умаров М.М. Азотфиксация в ассоциациях организмов // Пробл. агрохим. и эколог. 2009. № 2. С. 22–26.
36. Herridge D.F., Peoples M.B., Boddey R.M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems // Plant and Soil. 2008. Vol. 311. № 1–2. P. 1–18.
37. Bothe H., Ferguson S.J., Newton W.E. Biology of the nitrogen cycle. Amsterdam: Elsevier, 2007. 397 p.
38. Divito G.A., Sadras V.O. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis // Field Crops Res. 2014. Vol. 156. № 1. P. 161–171.
39. Голодяев Г.П. Биологическая активность горно-лесных почв южного Приморья // Вопросы численности, биомассы и продуктивности почвенных микроорганизмов. Ленинград: Наука, 1972. С. 240–246.
40. Щапова Л.Н. Микрофлора почв юга Дальнего Востока России. Владивосток: Изд-во ДВО РАН, 1994. 172 с.
41. Yang H., Shukla M.K. Soil carbon, nitrogen dynamics, and energy, carbon budgeting in response to uncultivated land management with crop biomass in the southwestern US // Soil Til. Res. 2025. Vol. 248. P. 106427.
42. Завалин А.А., Алферов А.А., Чернова Л.С. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83–96.
43. Русанов А.М., Анилова Л.В. Экологические аспекты гумусообразования и динамика гумуса целинных и пахотных черноземов Предуралья // Экология. 2009. № 6. С. 417–422.

REFERENCES

1. Smal H., Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant Soil*. 2008. Vol. 305. Pp. 171–187.

2. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Features of morphology and chemical properties of postagrogenic soils of the southern taiga on light sediments (Kostroma region). *Soil Science*. 2016. No. 1. Pp. 115–129. (In Russ.)
3. Compton J.E., Boone R. Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in New England forests. *Ecology*. 2000. Vol. 81. No. 8. Pp. 2314–2330.
4. Kudiyarov V.N. The balance of nitrogen, phosphorus and potassium in agriculture in Russia. *Agrochemistry*. 2018. No. 10. Pp. 3–11. (In Russ.)
5. Smal H., Ligeza S., Pranagal J., Urban D., Pietruczyk-Poplawska D. Changes in the stocks of soil organic carbon, total nitrogen and phosphorus following afforestation of post-arable soils: A chronosequence study. *For. Ecol. Manage.* 2019. Vol. 451. Pp. 117536.
6. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soil in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics. *Geoderma*. 2009. Vol. 152. No. 1–2. Pp. 35–42.
7. Ovsepyan L.A., Kurganova I.N., Lopez de Guereny V.O., Rusakov A.V., Kuzyakov Ya.V. Changes in the densitometric fractional composition of organic matter in soils of the forest-steppe zone in the process of postagrogenic evolution. *Soil Science*. 2020. No. 1. Pp. 56–68. (In Russ.)
8. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopez de Guereny V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. Dynamics of carbon pools and biological activity of agrodernum-podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution. *Soil Science*. 2021. No. 3. Pp. 287–303. (In Russ.)
9. Walker L.R., Wardle D.A., Bardgett R.D., Clarkson B.D. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *J. Ecol.* 2010. Vol. 98. No. 4. Pp. 725–736.
10. Kudiyarov V.N. Agrogeochemical cycles of carbon and nitrogen in modern agriculture in Russia. *Agrochemistry*. 2019. No. 12. Pp. 3–15. (In Russ.)
11. Kuznetsova I.V., Tikhonravova P.I., Bondarev A.G. Changing the properties of fallow gray forest soils. *Soil Science*. 2009. No. 9. Pp. 1142–1150. (In Russ.)
12. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Largescale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan. *Catena*. 2015. Vol. 133. Pp. 461–466.
13. Li D., Wen L., Zhang W., Yang L., Xiao K., Chen H., Wang K. Afforestation effects on soil organic carbon and nitrogen pools modulated by lithology. *For. Ecol. Manage.* 2017. Vol. 400. Pp. 85–92.
14. Kudiyarov V.N. The emission factor of nitrous oxide in the application of nitrogen fertilizers in agriculture in Russia. *Agrochemistry*. 2021. No. 11. Pp. 3–15. (In Russ.)
15. Yang H., Shukla M.K., Begay J. Soil carbon, nitrogen dynamics, and energy, carbon budgeting in response to uncultivated land management with crop biomass in the southwestern US. *Soil Til. Res.* 2025. Vol. 248. P. 106427.
16. Schulte-Uebbing L., De Vries W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, and boreal forests: a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 2018. Vol. 24. No. 2. Pp. e416–e431.
17. De Vries W., Reinds G.J., Gundersen P., Sterba H. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Glob. Change Biol.* 2006. Vol. 12. No. 7. Pp. 1151–1173.
18. Gruneberg E., Schoning I., Kalko E.K.V., Weisser W.W. Regional organic carbon stock variability: a comparison between depth increments and soil horizons. *Geoderma*. 2010. Vol. 155. No. 3–4. Pp. 426–433.
19. Vashbieva M.T. Changes in the fractional composition of mineral phosphates, the content of mobile phosphorus and the degree of phosphate mobility in the profile of sod-podzolic soil with prolonged use of fertilizers. *Agrochemistry*. 2021. No. 7. Pp. 3–12. (In Russ.)
20. *World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Rome. FAO. 2015.
21. Burdukovsky M.L., Timofeeva Ya.O., Golov V.I., Kiseleva I.V., Timoshinov R.V. Dynamics of the reaction of the soil environment, structural and aggregate state and carbon reserves of agrotimporous humus beds during postagrogenic development. *Soil Science*. 2022. No. 12. Pp. 1505–1513. (In Russ.)
22. Kostenkov N.M., Oznobikhin V.I. Soils and soil resources of the south of the Far East and their assessment. *Soil Science*. 2006. No. 5. Pp. 517–526. (In Russ.)
23. Arinushkina E.V. *Manual on chemical analysis of soils*. Moscow. Publishing house of Moscow State University. 1970. 490 p. (In Russ.)

24. Oznobikhin V.I., Sinelnikov E.P. *Characteristics of the main soil properties of Primorsky Krai and ways of their rational use*. Ussuriysk. Primorsky SHI. 1985. 72 p. (In Russ.)
25. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L. Frequently encountered inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science. *Bul. V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*. 2020. No. 102. Pp. 164–182. (In Russ.)
26. Sinelnikov E.P., Slabko Yu.I. *Agrogenesis of Primorye soils*. Moscow. VNIIA. 2005. 280 p. (In Russ.)
27. Ivlev A.M., Derbentseva V.I., Golov V.I., Tregubova V.G. *Agrochemistry of soils in the south of the Far East*. Moscow. Kruglyi god. 2001. 104 p. (In Russ.)
28. Afanasyev R.A., Merzlaya G.E. Dynamics of mobile forms of phosphorus and potassium in soils of long-term experiments. *Dokl. RASHN*. 2013. No. 3. Pp. 30–33. (In Russ.)
29. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of Cambisol developed from morainic loam. *J. Elementol.* 2020. Vol. 25. No. 1. Pp. 181–191.
30. Vasbieva M.T. Changes in the fractional composition of mineral phosphates, the content of mobile phosphorus and the degree of phosphate mobility in the profile of sod-podzolic soil with prolonged use of fertilizers. *Agrochemistry*. 2021. No. 7. Pp. 3–12. (In Russ.)
31. Titova V.I., Shafronov O.D., Varlamova L.D. *Phosphorus in agriculture of the Nizhny Novgorod region*. N. Novgorod. VVAGS. 2005. 219 p. (In Russ.)
32. Sychev V.G., Kirpichnikov N.A. *Methods of optimizing the phosphate regime of soils in agrotechnologies*. Moscow. VNIIA. 2009. 176 p. (In Russ.)
33. Ivanov G.I. *Soil formation in the south of the Far East*. Moscow. Nauka. 1976. 200 p. (In Russ.)
34. Gasparatos D., Massas I., Godelitsas A. Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps. *Catena*. 2019. Vol. 182. Pp. 104106.
35. Umarov M.M. Nitrogen fixation in associations of organisms. *Probl. agrochem. and ecol.* 2009. No. 2. Pp. 22–26. (In Russ.)
36. Herridge D.F., Peoples M.B., Boddey R.M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*. 2008. Vol. 311. No. 1–2. Pp. 1–18.
37. Bothe H., Ferguson S.J., Newton W.E. *Biology of the nitrogen cycle*. Amsterdam. Elsevier. 2007. 397 p.
38. Divito G.A., Sadras V.O. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crops Res.* 2014. Vol. 156. No. 1. Pp. 161–171.
39. Golodyaev G.P. Biological activity of mountain and forest soils of southern Primorye. *The issues of abundance, biomass and productivity of soil microorganisms*. Leningrad. Nauka. 1972. Pp. 240–246. (In Russ.)
40. Shchapova L.N. *Soil microflora of the south of the Russian Far East*. Vladivostok. Publishing House of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 1994. 172 p. (In Russ.)
41. Yang H., Shukla M.K. Soil carbon, nitrogen dynamics, and energy, carbon budgeting in response to uncultivated land management with crop biomass in the southwestern US. *Soil Til. Res.* 2025. Vol. 248. Pp. 106427.
42. Zavalin A.A., Alferov A.A., Chernova L.S. Associative nitrogen fixation and the practice of using biological products in agricultural crops. *Agrochemistry*. 2019. No. 8. Pp. 83–96. (In Russ.)
43. Rusanov A.M., Anilova L.V. Ecological aspects of humus formation and dynamics of humus in virgin and arable chernozems of the Urals. *Ecology*. 2009. No. 6. Pp. 417–422. (In Russ.)

Поступила в редакцию 30.05.2025
После доработки 12.07.2025
Принята к публикации 15.03.2026

Received May 30, 2025
Revised July 12, 2025
Accepted March 15, 2026