

УДК 631.81:630:630\*161.15

## ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И УГЛЕРОДНЫЙ БЮДЖЕТ ЛЕСОВ<sup>§</sup>

© 2023 г. Д. Г. Щепашенко<sup>1,2,\*</sup>, Л. В. Мухортова<sup>3</sup>, О. В. Мартыненко<sup>4</sup>,  
В. Н. Коротков<sup>5</sup>, В. Н. Карминов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Международный институт прикладного системного анализа  
А-2361 Лаксенбург, Шлоссплатц, 1, Австрия

<sup>2</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, стр. 14, 84/32, Россия

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва Сибирского отделения РАН  
660036 Красноярск, Академгородок, 50 (28), Россия

<sup>4</sup>Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства  
141202 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 17, Россия

<sup>5</sup>Институт глобального климата и экологии им. Акад. Ю.А. Израэля  
107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б, Россия

<sup>6</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана  
141005 Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

\*E-mail: schepd@iiasa.ac.at

Поступила в редакцию 12.03.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Поглощение и сохранение углерода является одной из важных экосистемных функций леса. Современной науке ставится задача изучить возможности усилить данную функцию с целью противостояния росту концентрации углекислого газа в атмосфере. Лесохозяйственные мероприятия, в частности применение минеральных удобрений, являются эффективным способом увеличения производительности лесов и усиления их углерод-поглощающей способности. Данный обзор ставит целью обобщить накопленный опыт применения минеральных удобрений в бореальных и умеренных лесах. Сделан вывод о том, что внесение удобрений должно быть избирательным, и оно наиболее эффективно в сочетании с другими лесоводственными мероприятиями. Значительный эффект наблюдают в средних по продуктивности условиях местопроизрастания с достаточным, но не избыточным увлажнением, в возрасте максимального текущего прироста общей или деловой древесины (40–70 лет для хвойных пород). Наиболее популярными (недорогими, но эффективными) являются N-удобрения, однако необходимо контролировать содержание прочих элементов питания, в частности Р, К и В. Нами собрана и опубликована база данных многолетних экспериментов по внесению минеральных удобрений. Эксперименты показали, что поглощение 1 т CO<sub>2</sub> требует от 5.6 до 10.3 кг (в среднем 7.2) азота. Результаты проекта применения удобрений должны сравниваться с базовой линией (без проекта), а разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов.

*Ключевые слова:* азот, фосфор, калий, прирост, поглощение углерода, рост леса, депонирование углерода.

DOI: 10.31857/S0002188123090107, EDN: VXZFDL

### ВВЕДЕНИЕ

Стабилизацию уровня концентрации парниковых газов в атмосфере признают одним из

условий снижения опасного антропогенного воздействия на климатическую систему планеты [1]. На международном уровне Киотский протокол и Парижское соглашение запустили рыночный механизм регулирования выбросов парниковых газов. Глобальный процесс торговли квотами на выбросы парниковых газов на национальном, региональном или международном рынках обуславливает необходимость поиска путей сниже-

<sup>§</sup> Работа выполнена в рамках реализации инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

ния и компенсации выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики.

Одним из самых рентабельных способов секвестрации углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) является поглощение его растениями в процессе фотосинтеза и депонирование в фитомассе и мертвом органическом веществе. С этой точки зрения леса рассматривают как наиболее перспективные природные системы, поскольку в древесной растительности углерод может депонироваться на десятки и сотни лет. На территории России леса занимают 815 млн га [2], кроме того, имеется большое количество заброшенных и зарастающих сельскохозяйственных земель [3], которые также могут быть использованы для целей лесовыращивания. По оценкам разных авторов, леса на территории нашей страны в фоновом режиме ежегодно поглощают от 91 до 692 млрд т С [4]. В масштабах страны – это огромный вклад в климатическую систему Земли, который может быть еще более увеличен за счет развития и усовершенствования методов ведения лесного хозяйства.

Цель обзора – рассмотрение возможностей увеличения углерод-депонирующей и углерод-консервирующей роли лесов за счет применения удобрений в лесном хозяйстве. Традиционно минеральные удобрения в лесном хозяйстве использовали для увеличения скорости роста и продукции стволовой древесины, усиления плодоношения, повышения устойчивости грибным заболеваниям и повреждениям насекомыми, для восстановления нарушенных почв [5, 6]. Однако применение удобрений и мелиорантов способно помочь и в достижении цели увеличения углерод-депонирующих функций лесных экосистем:

- ускорение роста леса (и, соответственно, поглощения  $\text{CO}_2$ ) путем внесения тех элементов питания растений, которых не хватает в почве, может увеличить запасы фитомассы и мертвого органического вещества в экосистемах;

- увеличение размеров заготавливаемых на этапе рубки деревьев позволяет увеличить долю выхода из древесины продуктов длительного пользования (например, пиловочника, в отличие от дров и сырья для производства бумаги). Длговременные продукты из древесины консервируют углерод на более длительный срок. Например, средний период полураспада пиломатериалов составляет 35 лет в отличие от целлюлозно-бумажной продукции – 2 года [5];

- повышение устойчивости насаждений к неблагоприятным факторам. Сбалансированность элементов питания повышает устойчивость рас-

тений к вредителям и болезням, что в свою очередь снижает риск потери углерода;

- восстановление бедных или нарушенных почв. Увеличение продуктивности леса приведет к увеличению отпада и накоплению органического углерода в почве, что способно привести к более долговременной его консервации по сравнению с накоплением в фитомассе.

Интенсивность роста леса и накопление углерода зависит от множества факторов, включая климатические условия, обеспеченность водой и элементами питания, внешних природных и антропогенных воздействий, а также от породного состава и возраста древостоев. В том случае, если все прочие факторы благоприятствуют росту, обеспеченность элементами минерального питания становится определяющей, а восполнение их недостатка способно существенно повысить продуктивность древостоев и углерод-депонирующие возможности лесных экосистем.

## ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Рост и продуктивность древостоя тесно связаны с наличием макро- и микроэлементов в почве. В бореальных и умеренных лесах дефицит азота (N) широко распространен [6, 7] и обычно снижает продуктивность древостоя за счет уменьшения площади листовой поверхности, светопропускания и меньшей скорости фотосинтеза [8, 9]. Поскольку индекс листовой поверхности (*LAI*) в древостое тесно связан с чистой первичной продукцией (*NPP*), низкая доступность N может существенно снижать прирост и секвестрацию углерода в северных лесах [9]. По этой причине N является элементом, наиболее часто применяемым при удобрении лесов [10]. Удобрение лесов азотом на не плодородных участках обычно увеличивает фитомассу всех компонентов (листья, древесины и корней) [11–13], что часто усиливается при одновременном внесении и других элементов питания [14, 15].

Хотя реакция прироста на однократное внесение удобрений обычно длится менее 10 лет, внесение удобрений может повысить долгосрочную продуктивность деградированных участков. Например, питательные вещества, внесенные в сосновые насаждения, созданные на обедневших сельскохозяйственных землях, обычно становятся постоянным компонентом питательного капитала участка [16]. Положительное влияние N-удобрений на рост деревьев следующего поколения наблюдали на лесных плантациях даже через 25 лет после последнего внесения удобрений и

через 10 лет после рубки главного пользования [17, 18].

Многие исследователи считают эффективным мероприятием по повышению устойчивости лесов к техногенному загрязнению внесение в почву минеральных удобрений и ее известкование, что способствует улучшению минерального питания, установлению оптимального соотношения ионов в почве, улучшению состояния и роста древесных пород [19]. Как показывает опыт, минеральные удобрения улучшают состояние и рост лесов, ослабленных высокой рекреационной нагрузкой [20], способствуют увеличению устойчивости древостоев против вредителей и болезней [21], а также против неблагоприятных климатических условий, например, засухи [22]. Таким образом, удобрения являются важным экологическим фактором, повышающим устойчивость, улучшающим рост и состояние лесных насаждений, ослабленных в результате неблагоприятных природных или антропогенных воздействий [23].

Многие исследователи считают, что чистая продуктивность экосистемы (*NEP*) — баланс углерода в экосистеме — чаще всего повышалась в ответ на применение удобрений, аналогично *NPP*. Однако, учитывая, что *NEP* является составным показателем, его величина зависит от направления и относительной величины реакции *NPP* и гетеротрофного дыхания (*RH*) на применение удобрений и доступность почвенной влаги. Увеличение *NEP* в ответ на внесение удобрений происходит с участием 2-х механизмов, действующих в противоположных направлениях: *NPP* увеличивается с внесением удобрений, в то время как общее дыхание почвы (*RS*) и *RH* часто снижаются [24]; это может быть вызвано изменением схемы распределения углерода, когда растения дают меньше тонких корней, более низкой микробной биомассой и изменениями в составе микробного сообщества и почвенных ферментов, с последующим снижением гетеротрофной активности [25].

В большинстве случаев присутствие в составе растительного сообщества азотфиксаторов (ольха — *Alnus glutinosa* L. Gaertn., *Alnus rubra* Bong.) вызывало существенное (от 20 до 100%) повышение содержания углерода и азота в почве [26–28]. Смешанные насаждения с включением видов, способных к симбиотической азотфиксации, целесообразно создавать для восстановления полноценного питательного режима почв [29, 30].

Скандинавские страны были одними из первых, где массово применяли удобрения для управления продуктивностью бореальных лесов. В Норвегии удобрение насаждений ели европей-

ской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) началось в 1930-х гг. [31]. Общая цель норвежской программы удобрения заключалась в том, чтобы: 1 — увеличить производство древесины и связанную с этим экономическую прибыль за счет сокращения оборотов рубки, 2 — предотвратить дефицит предложения древесины, который, согласно прогнозам, должен был возникнуть в начале 21-го века из-за неравномерного распределения древостоев по возрастным классам [31]. Объемы внесения N-удобрений в лесах Норвегии варьировали в 1990–2018 гг. от 73 до 839 т N/год [32].

В Швеции промышленное применение удобрений началось в 1960-х гг. Лесная промышленность рассматривала удобрения как рентабельное решение своих проблем с поставками древесины [33, 34].

В Финляндии в 1960–1980-х гг. применяли государственные субсидии на использование удобрений в лесах, и в течение этого периода были удобрены леса на общей площади 3.2 млн га. После отмены субсидий применение удобрений сократилось до 20 тыс. га/год [35]. По данным национальной отчетности [32], за 1990–2018 гг. внесение удобрений варьировало от 1.1 до 7.0 тыс. т азота. Внесение удобрений рекомендуется в этом случае для насаждений со средним уровнем плодородия почв в приспевающих древостоях, чтобы добавление азота не увеличивало ветвистость и сучковатость ствола [1, 36, 37].

В США удобрения используют для ускорения роста лесов и при лесоразведении. В 1990 г. было внесено с удобрениями 13.2 тыс. т N, в 2018 г. — 73.5 тыс. т N. В отдельные годы объемы внесения удобрений достигали 83.5 тыс. т азота (2000 г.) [38]. В Великобритании используют удобрения при посадке леса на бедных почвах и при рекультивации отвалов [32].

В 1970-х гг. в Канаде была запущена обширная программа [39, 40], которая включала 79 стандартизованных экспериментов по изучению влияния удобрений на рост хвойных древостоев. Использовали разные дозы N-удобрений, совместное внесение N и фосфорных (P) удобрений или N и калийных (K) удобрений и одновременное внесение всех трех элементов (NPK). Показано, что 57% экспериментов показали статистически значимый отклик прироста на внесение удобрений, при этом наибольший эффект давало внесение азота. Реакция на внесение удобрений значительно отличалась для разных древесных видов. Наибольший дополнительный прирост наблюдали для сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) допол-

нительно от 5.8 до 23.3 м<sup>3</sup>/га, что составляло 24–5% [39, 40]. Не было обнаружено статистически значимой реакции пихты (*Abies balsamea* (L.) Mill.) на внесение удобрений, что могло быть связано с большим возрастом древостоев, повышенным отпадом и существенной исходной вариабельностью приростов и запасов древесины. Ответы на внесение удобрений в насаждениях ели красной (*Picea rubens* Sarg.) продемонстрировали изменение запаса за 10 лет от –3 до +29% или от –1.4 до +13.4 м<sup>3</sup>/га по сравнению с контролем. В очень густых насаждениях периодические потери с отпадом в течение 10-ти лет наблюдения привели к отрицательным приростам [39–41]. Более подробные данные этого и других экспериментов собраны нами в базу данных [42].

По данным некоторых исследователей, N-удобрения увеличили производство стволовой древесины от 56 до 81% в еловых насаждениях в северной Финляндии при долговременном эксперименте по внесению N-удобрений (750–1160 кг/га за 5–6 приемов в течение 30-ти лет). Кроме того, заметно увеличилась фитомасса ветвей. После внесения N-удобрений на наиболее плодородных участках еловых насаждений на юге Финляндии эффект от внесения азота был намного меньше, т.к. сказывался недостаток P и бора [35]. Долговременный эксперимент по внесению N-удобрений (596–746 кг N/га за 5–6 приемов в течение 26–30 лет) в сосновых лесах Финляндии показал увеличение стволовой древесины к возрасту рубки на 22–36% и фитомассы ветвей на 12–25% [35, 43].

В отечественной практике лесного хозяйства удобрения в основном применяют в лесных питомниках при выращивании посадочного материала хозяйственно-ценных пород [44–46], несколько меньше – на постоянных лесосеменных участках (ПЛСУ), лесосеменных плантациях (ЛСП) с целью увеличения плодоношения плюсовых деревьев и получения семян высокого качества [47, 48]. Удобрение средневозрастных, припевающих и спелых лесных насаждений в пределах РФ проводили только в опытном порядке и небольшом объеме. В результате зонально-типологического подхода для отдельных регионов и лесорастительных зон были разработаны рекомендации, наставления, указания, инструкции по применению удобрений в лесных объектах [48–52], в которых дано обоснование применения удобрений в зависимости от типов леса, условий произрастания и других лесоводственных факторов и рекомендуется оптимальная технология их внесения [23].

## ВИДЫ И ФОРМЫ ПРИМЕНЯЕМЫХ УДОБРЕНИЙ

В лесоводственной практике удобрениями обычно восполняют недостаток одного или нескольких макроэлементов питания (например, N, P, K), или микроэлементов (например, B). На сильнокислых почвах применяют известковые материалы, содержащие Ca и Mg.

В отечественной практике в основном используют N-удобрения, т.к. большинство лесных почв, особенно занятых сосновыми насаждениями, бедны азотом [23, 53]. Из N-удобрений предпочтение отдается аммиачной селитре (N<sub>aa</sub>) и мочеvine (N<sub>m</sub>). Но некоторые авторы [47] считают N<sub>m</sub> менее эффективной по сравнению с N<sub>aa</sub>, известково-аммиачной селитрами или сульфатом аммония (N<sub>a</sub>) [23].

Наибольший эффект достигается внесением медленно растворимых форм удобрений и мелиорантов, высвобождение которых продолжается месяцы и даже годы. Карбамидо формальдегид (Ureaformaldehyde) – продукт конденсации N<sub>m</sub>, состоящий из полимеров разного размера, которые медленно разлагаются до аммония почвенными микроорганизмами. Общая концентрация N в гумусовом слое и доступность минерального N оставались на более высоком уровне после ее внесения по сравнению с внесением N<sub>m</sub> или N<sub>aa</sub> [35].

Из P-удобрений наиболее часто применяют суперфосфаты простой, двойной и фосфат-сырец [23]. Апатиты тонкого помола медленно растворяются и обеспечивают долговременный источник минерального питания. Внесение дозы P44 привело к повышению содержания растворимого P в верхних 0–5 см почвы через 3 мес., что сохранилось по сравнению с контролем и на 3-й год [35].

Из K-удобрений наиболее часто применяют хлористый калий, калийную соль и сульфат калия [23, 53]. В Канаде азот вносили в виде N<sub>m</sub>, фосфор – в виде тройного суперфосфата, калий – в виде хлорида калия [39, 40].

Для известкования применяют доломитовую муку, обожженный доломит, сланцевую золу, которые повышают концентрацию обменного кальция и магния, способствуют нейтрализации почвенной кислотности [53]. Нейтральные и слабокислые почвы, как правило, более плодородны по сравнению с кислыми. В частности, снижение кислотности способствует ускорению минерализации органического азота. Было доказано, что внесение даже небольших доз (2 т известняка/га)

приводило к снижению кислотности на 0.5 ед. рН даже через 20 лет после внесения [19].

Эксперименты по известкованию почв проводили в Финляндии перед посадкой лесных культур (2–4 т известняка/га с заделкой в почву или распылением по поверхности), а также в молодых и средневозрастных насаждениях (2 т известняка/га). Внесение извести в лесные почвы стимулирует также развитие микрофлоры, особенно аммонификаторов и целлюлозоразлагающих микроорганизмов [54, 55]. Древесные и травянистые растения реагируют на применение извести только через несколько лет после ее внесения. Это объясняется как очень слабой растворимостью самой извести, так и механизмом ее влияния на режим питания растений: известь через изменение жизнедеятельности микроорганизмов и грибов содействует разложению органического вещества и образованию доступных форм элементов минерального питания [56]. Использование удобрений, содержащих помимо кальция еще и магний, увеличивало прирост в высоту 20–30-летних культур сосны на 20–25% [57].

Однако действие извести на прирост древостоев неоднозначно. В Швеции сосновые и еловые древостои на хорошо дренированных минеральных почвах мало или совсем не реагировали на внесение извести [58], а в опытах, проведенных в Финляндии, действие извести в молодняках сосны часто было отрицательным [56, 59]. Известкование увеличивало долю мертвой микоризы на корнях ели, что частично объясняет снижение прироста ельников в связи со снижением поступления элементов питания через микоризу [35].

### ДОЗЫ, ПЕРИОДИЧНОСТЬ И СПОСОБЫ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Важным элементом в технологии применения удобрений является установление оптимальных доз. Оптимальные дозы удобрений определяются почвенно-климатическими особенностями региона, условиями произрастания, типом леса, возрастом древостоев и видом удобрений. Некоторые исследователи считают, что для лесных пород разовые дозы  $N < 50$  кг/га – не эффективны, а  $> 300$  кг/га – вредны, т.к. причиняют ожоги деревьям или угнетающе действуют на их рост [60]. Тем не менее, частое внесение небольших доз удобрений (N и P) дают такой же биологический ответ, как и однократное внесение большой дозы при условии, что совокупные количества внесенных удобрений были сопоставимы [61].

Опыт свидетельствует, что в хвойных лесных насаждениях при однократном внесении удобре-

ний на минеральных почвах эффективны N-удобрения в дозах 150–200 кг/га, на осушенных болотных почвах – P- и K-удобрения и полные NPK, при этом однократные дозы P-удобрений составляют 120–150, K – 100–150, а N – 100 кг/га [49, 53, 60, 62, 63].

Анализ изменений запаса древесины в Онтарио (Канада) показал, что лучший результат достигался внесением  $N_{151}Mg_{62}$ , в результате чего объем древесины увеличивался дополнительно на  $16 \text{ м}^3/\text{га}$  за 10 лет [64].

Ускорение роста после применения N-удобрений в приспевающих хвойных лесах Финляндии наблюдали в течение 7–10 лет с максимумом на 3–4-й годы. При применении медленно растворяющихся удобрений эффект может быть существенно продлен, что улучшает равномерность прироста и качество древесины [35].

Ежегодное внесение как N-, так и NPK-удобрения в культуры сосны в Карелии, произрастающие на подзоле иллювиально-железистом песчаном, способствовало увеличению прироста массы древесины к 20–22-летнему возрасту в 5.7–10.7 раза при снижении ее плотности на 16–20%. Периодическое внесение удобрений через каждые 5 лет повлияло на прирост массы деревьев в меньшей степени (в 2.0–3.4 раза) и по-разному сказалось на плотности древесины: при применении полного удобрения плотность древесины снижалась, при внесении только азота – не изменялась [65].

По имеющимся данным [66], сроки внесения удобрений оказывают сильное влияние на степень использования удобрений лесными насаждениями, а также на экологические последствия от их применения. Большинство авторов отдают предпочтение весенним и раннелетним срокам внесения N-удобрений [21, 67, 68]. Некоторые данные [69] свидетельствуют о большей эффективности осенних подкормок. На практике используют оба срока внесения удобрений. С целью избежания загрязнения окружающей среды, газообразных потерь N и потерь от вымывания рекомендуется учитывать метеоусловия и вносить удобрения при температуре  $\geq 6-8^\circ\text{C}$  (для любых форм N-удобрений) и  $\leq 15^\circ\text{C}$  (для  $N_{aa}$ ) [51, 52].

Внесение N-удобрений весной или в начале лета, когда потребности в них максимальны, показало наибольшую эффективность [70]. Обильные осадки и таяние снега увеличивает вынос N, особенно если в это время нет активного потребления растениями. Время внесения не критично для удобрений с медленным высвобождением, например, мочевины формальдегида, апатита (apatite), биотита (biotite), P-удобрений (фосфо-

ритной муки, фосфат-сырца), но для получения эффекта в первый год внесения их следует применять до начала вегетации [35, 71].

В мировой и отечественной практике удобрения в лесных насаждениях вносят поверхностно без заделки в почву. Существует ручное, механизированное (с помощью наземной техники) и авиационное (использование самолетов, вертолетов) рассеивание удобрений [72, 73]. Ручной способ ограничен из-за исключительной трудоемкости и применяется только на небольших площадях [21, 53].

Шведские исследователи [68] пришли к выводу, что авиационное внесение экономически более оправдано, но не всегда обеспечивает равномерность распределения, и качество работ зависит от рассеивающей удобрения аппаратуры. Опыт показывает преимущество вертолетов, т.к. они обеспечивают большую прицельность рассеивания удобрений, позволяют удобрять небольшие площади и не требуют организации взлетно-посадочной полосы [74, 75].

### ВЫБОР ОБЪЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Аборигенные виды древесных растений, как правило, хорошо приспособились к климату и почвам и могут достаточно успешно расти в широком диапазоне условий произрастания. Внесение удобрений может принести требуемый эффект только при выраженном недостатке того или иного элемента питания. Чем больше недостаток элемента питания в почве, тем большее увеличение прироста можно ожидать при оптимальности прочих факторов роста. Недостаток элементов питания можно определить в результате анализа почв и хвои (листьев).

Древостои с низким показателем удельной площади листовой поверхности обычно сильнее реагируют на внесение удобрений, потому что они ограничены питательными веществами, тогда как насаждения с высокой удельной площадью листовой поверхности не ограничены элементами питания и поэтому практически не реагируют на внесение удобрений [16, 61, 76].

Существует необходимость учитывать верхний предел продуктивности лесов разных типов в различных природных условиях. Как показали исследования [77], дополнительные лесоводственные мероприятия, включая внесение удобрений, не приведут к увеличению продуктивности, если бонитет древостоев близок к максимальному в данном регионе.

Внесение N-удобрений не рекомендуется в экосистемах, где наблюдают поступление больших количеств N в результате его осаждения из атмосферы или предыдущего сельскохозяйственного использования земель, поскольку это может стимулировать потери N в виде нитратов в воде или в виде парниковых газов в результате денитрификации [78, 79].

Реакция на внесение удобрений, которая наблюдается у разных древесных видов и у одного и того же вида в значительной степени зависит от условий произрастания и характеристик насаждения (густоты, видового состава, размера и интенсивности роста деревьев) [14]. Эта реакция изменяется в зависимости от стадии развития древостоя [80, 81], от возможностей иммобилизации и минерализации питательных веществ после их внесения, т.е. зависит от свойств почвы [82].

Большие потери, связанные с естественным отпадом древостоя, могут маскировать реакцию на внесение удобрений [41]. Поэтому использование удобрений, вероятно, нежелательно в древостоях с высокой густотой, где может быть ожидаем большой естественный отпад деревьев, связанный с самоизреживанием.

Удобрения применяют в разные периоды жизни леса. В лесных питомниках их применяют для выращивания высококачественного посадочного материала. В молодняках, особенно в стадии жердняка, внесение минеральных удобрений ослабляет конкурентную борьбу и способствует выживанию ослабленных растений. Внесение дополнительных питательных веществ в средневозрастных и спелых древостоях может повысить их затухающий прирост. Кроме этого, внесение удобрений усиливает плодоношение древостоев и повышает их устойчивость к грибным заболеваниям и повреждениям насекомыми [56].

В отечественной научной литературе имеются данные о влиянии удобрений и комплексного ухода на процесс естественного возобновления под пологом леса [20, 63, 83, 84] и на вырубках [85]. Сообщается о влиянии удобрений и рубок ухода на высоту и диаметр подроста, в основном елового [83, 84]. В иностранной литературе отмечены высокая биологическая и экономическая эффективности применения удобрений, рыхления почвы, комплексного ухода, осушения для содействия естественному возобновлению леса [86, 87].

Удобрение способно увеличить рост молодых деревьев в 3–5 раз [88]. Сосновые молодняки на легких почвах (лишайниковые и черничные боры) могут увеличивать прирост по объему в 1.5–

2.0 раза [89], а прирост в высоту – в 1.4–2.5 раза. На бедных песчаных почвах наряду с N-удобрениями эффективно внесение K-удобрений [56]. В 13-летних сосняках Житомирской обл., произрастающих на супесчаной подзолистой почве, через 3 года после внесения удобрений, содержащих N, объем древесины увеличивался на 16–31%, а масса хвои – на 12–15%. Другие виды удобрений – P, K и известковые – практически не оказали влияния на рост сосны [90]. В Финляндии внесение удобрений в молодняках 1-го класса возраста было признано не эффективным по нескольким причинам: их потребности в элементах питания невелики и обеспечиваются разложением порубочных остатков; удобрения перехватываются подлеском и травянистыми растениями; ветви становятся более крупными, что ухудшает качество древесины [35]. В Канаде исследования показали, что если удобрения вносят только при посадке, то через 5–10 лет деревья растут примерно так же, как на неудобранных территориях [91].

Наибольший эффект удобрений на поглощение углерода наблюдается в возрасте, когда происходит максимальный текущий прирост древостоев. В сосняках и ельниках Финляндии этот возраст составляет 30–50 лет. Внесение 150 кг N/га позволяет увеличить запас на 12–20 м<sup>3</sup>/га [35].

Удобрение средневозрастных, приспевающих и спелых древостоев способно увеличить их прирост в высоту и в диаметре. Естественный прирост уменьшается с возрастом, снижается потребность в элементах питания и отзывчивость к применению удобрений. Однако применение удобрений в момент максимального прироста технической спелости (обычно за 10–20 лет до рубки) позволяет увеличить размеры стволов и качество древесины при заготовке. Это, в свою очередь, позволяет использовать большую долю древесины на изделия с длительным сроком службы и предотвращать возврат углерода в атмосферу на значительное время [35, 92, 93]. В этом случае за счет удобрений можно получить дополнительный прирост древесины за период их действия до 20–30 м<sup>3</sup>/га [23, 53, 94], с самой высокой окупаемостью затрат за короткий срок. В зарубежной практике она составляет 8–10 долларов прибыли на 1 затраченный доллар [58, 95–97] в отечественной практике и в ближнем зарубежье – 1.5–8.0 руб. на 1 руб. затрат [49, 98–100].

Мета-анализ реакции древостоев на применение удобрений показал, что древостои ели черной (*Picea mariana* (Mill.)) , формирующиеся на участках хорошего и отличного качества, демонстрируют значимые ( $p < 0.05$ ) и устойчивые положи-

тельные ответы на внесение азота (дозы N84–140) и 2NP или (дозы N196–252) + (дозы P84–140) (т.е. среднее увеличение составило: площади поперечных сечений – на 22.6, общего запаса – на 16.9 и запаса деловой древесины – на 17.9%); участки низкого и среднего качества демонстрировали в основном незначительную (или) непостоянную реакцию на внесение удобрений (т.е. значимую ( $p < 0.05$ )), средняя площадь поперечных сечений увеличилась на 12.6% ( $p < 0.05$ ) только при применении удобрений в количестве 2N (дозы N196–252) и 2 NPK (N196–252) + (P84–140) + (K84–140) (при  $p < 0.05$ ) [101].

Древостои сосны Банка, произрастающие на участках хорошего качества, показали значительную ( $p < 0.05$ ) и устойчивую реакцию на все 5 вариантов обработок, в среднем увеличение составило: площади сечений – на 17.3, общего запаса – на 15.4 и объема деловой древесины на 14.5%. Участки среднего качества достоверно и устойчиво реагировали на внесение N, 2N, 2NK и 2NPK, наблюдали: среднее увеличение площади сечений – на 28.3, общего запаса – на 22.1 и объема деловой древесины – на 22.7%. Участки низкого качества показали значительный ( $p < 0.05$ ) и последовательный ответ на применение 2NK и 2NPK (т.е. в среднем увеличение составило: площади сечений – на 23.5, общего запаса древесины – на 19.5 и объема деловой древесины на 19.5%) [101].

Список типов леса в порядке убывания эффективности применения N-удобрений в Финляндии выглядит следующим образом: сосняки брусничные–ельники черничные–ельники кисличные. Закономерности, связанные с типами леса в северной и южной Финляндии, проявляются одинаково, но эффект в центральной Финляндии на 20–40% меньше по сравнению с южными районами [35].

Сомкнутость насаждений в значительной степени определяет реакцию на внесение удобрений, при этом насаждение со средней плотностью обеспечивает пространство, необходимое для увеличения площади листьев, кроны и улучшения фотосинтетического потенциала после внесения питательных веществ [80, 102]. Загущенные насаждения могут плохо реагировать на удобрения из-за высокой скорости самоизреживания и повышенного отпада деревьев 2-го яруса, что снижает чистый прирост фитомассы в древостое [41, 102]. В некоторых случаях прореживание перед внесением удобрений улучшает реакцию, предоставляя пространство для расширения кроны и увеличивая ресурсы (например, свет, влажность почвы), необходимые для того, чтобы

оставленные деревья могли в полной мере использовать увеличившиеся количества питательных веществ [103–105]. С помощью такой комбинации ухода можно улучшить рост отдельных деревьев, однако общая продукция биомассы насаждений снижается на определенный период из-за более низкой сомкнутости насаждений после прореживания [105–107].

Для положительной реакции роста на внесение макроудобрений (NPK) в северных лиственных лесах иногда требуется дополнительное внесение известковых удобрений [108, 109]. В лесах восточной части Северной Америки с кислыми почвами и дефицитом основных макроэлементов внесение извести отдельно или в сочетании с K-удобрениями, а также с Mg- и Ca-содержащими удобрениями, улучшало жизнеспособность и рост клена (*Acer*) [110–112]. Доказано, что осина (*Populus tremula* L.) быстро реагирует на внесение удобрений. Годовой прирост объема осиновых насаждений, удобренных N-, P- и K-удобрениями, увеличился на 0.4–7.3 м<sup>3</sup>/га за 5 лет [41] и в среднем до 6.8 м<sup>3</sup>/га через 15 лет [105]. Повторное внесение N-удобрений в осиновые насаждения на Аляске увеличивало годовой прирост надземной биомассы от 0.6 до 1.77 т/га за 9 лет [82, 113].

Внесение удобрений на участках с дефицитом N способствует увеличению прироста деревьев, хотя растительность обычно усваивает только небольшую часть внесенного N [6, 114]. Удержание N в лесах линейно связано с внесенным количеством удобрения и составляет в среднем 25% (диапазон от 6 до 65%) и 35% (диапазон от 15 до 67%) в растительности и почве соответственно, а остальная часть теряется за счет вымывания и перехода в газообразную форму [6, 14, 115]. Внесение удобрений обычно не влияет на продуктивность участка постоянно, а устойчивое повышение прироста требует повторных внесений [116].

### ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА СВОЙСТВА ПОЧВ

Некоторые данные свидетельствуют о том, что внесение N-удобрений в хвойных лесах увеличивает накопление и секвестрацию углерода в гумусе. В работе [91] провели мета-анализ 48 исследований, в которых оценивали влияние удобрений или присутствия азотфиксирующих видов растений на запас углерода почвы. Большинство исследований показало увеличение содержания углерода в почве после внесения удобрений, но в некоторых случаях статистически значимой реакции не наблюдали. Результат, по-видимому, зависел от типа почвы, частоты внесения удобре-

ний и породы деревьев (качества лесной подстилки) [91]. В работе [117] обнаружили увеличение содержания углерода в минеральной почве на 14% через 11 лет после однократного внесения удобрений при посадке.

В работе [118] оценивали содержание углерода в почве и микробную активность на 2-х участках в Швеции. Первый обрабатывали N<sub>aa</sub> и N<sub>m</sub> в дозах 150 и 600 кг N/га и через 11 лет обнаружили увеличение запаса органического углерода в подстилке и почве на 16–25%. Второй участок обрабатывали дозой 150 кг N/га в виде N<sub>aa</sub> за 8 лет и за 1 год до измерений (всего N300), при этом обнаружили увеличение запаса органического углерода в подстилке и почве на 10%. Эффект был более выражен при внесении более высоких доз удобрений и при использовании N<sub>aa</sub> [118]. Отмечали также увеличение содержания углерода в почве с 13 до 17% после применения N<sub>aa</sub> и тройного суперфосфата на осиновых участках в центральной части Аляски [119].

Удобрения увеличивают поступление углерода в почву за счет возрастания количества опада и отпада. Соединения N реагируют с ароматическими органическими соединениями в почве, давая стойкие гуминовые соединения [120]. Есть также свидетельства, что N удобрения снижают скорость разложения гумуса [120, 121] за счет ингибирующего действия высоких концентраций N на продуцирование лигнолитических ферментов грибами белой гнили [13].

### НЕГАТИВНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Применение минеральных удобрений в лесных насаждениях наряду с высокой эффективностью может вызвать и негативные последствия в связи с загрязнением окружающей среды [122]. Удобрения в некоторых случаях могут способствовать загрязнению воды, почвы (при многократном внесении), а иногда и воздуха [53]. Наибольшую опасность представляет вымывание из почвы нитратов, аммиака и их попадание в реки, водоемы [53, 66, 123]. Однако основное количество удобрений попадает в водоемы с территориями сельскохозяйственных угодий. В лесу, при соблюдении форм, доз, сроков и технологии внесения элементы питания замыкаются в биологическом круговороте и практически не выносятся из экосистемы [93]. В этом отношении перспективным является применение медленнодействующих удобрений с полимерным покрытием [47, 53].

Внесение макроэлементов, как правило, снижает концентрацию микроэлементов в тканях,

что может вызвать нарушение роста растений. Например, в Финляндии, на участках с недостатком бора в хвое ели, внесение N-удобрений еще больше понизило его содержание, вызвало дисбаланс элементов питания и, как следствие, ухудшение роста [35].

При постоянном внесении N-удобрений фундаментальные изменения в круговороте углерода в почве из-за изменений микробной биомассы, экспрессии ферментов и состава соединений, содержащих углерод, в почве могут уменьшить или изменить круговорот других питательных веществ [112]. Препятствиями на пути внедрения практики использования удобрений могут быть стоимость удобрений, возражение против использования синтетических удобрений на государственных землях и мнение общественности по поводу потенциальной эвтрофикации дренажных вод, хотя N-удобрения в лесном хозяйстве обычно приводят к небольшому и временному увеличению концентрации N в водотоках [14, 79, 124].

IPCC предполагает потерю 1.25% удобрений в виде  $N_2O$  или  $NO_x$  в сельскохозяйственных почвах. Показано [125], что выбросы  $N_2O$  увеличились после удобрения букового леса в Германии. Однако выбросы  $N_2O$  снижались, если на участке также проводили известкование. Вероятно, это было связано с тем, что редуктаза закисной формы N, фермент, участвующий в последней стадии денитрификации, восстановлении  $N_2O$  до  $N_2$ , ингибируется при низкой величине pH [13].

Основное беспокойство вызывает влияние удобрений на качество воды и водные экосистемы. Однако многие научные исследования показали, что правильное внесение N- и P-удобрений не влияет на качество воды и не оказывает значительного неблагоприятного воздействия на видовой состав и продуктивность водных экосистем [14, 82, 102, 126].

Другая проблема, связанная с внесением удобрений, заключается в том, что они могут изменить состав, структуру и разнообразие видов подлеска [127–129]. Обилие вересковых, мохообразных и лишайников обычно снижается после внесения N-удобрений, в то время как доля трав увеличивается [33, 35, 129]. Изменение видового состава подлеска может повлиять на качество среды обитания диких животных как за счет изменений вертикальной структуры подлеска, так и за счет изменения кормовой базы для лесных видов животных. Внесение удобрений может повысить питательные и вкусовые качества древесных и травянистых видов подлеска и увеличить количество посещений дикими животными, употребляю-

щими их в пищу [129]. Однако там, где чрезмерный выпас препятствует регенерации древесных видов, внесение удобрений можно использовать для увеличения скорости роста, что снижает период уязвимости высаживаемых древесных культур для травоядных [82, 130].

Многочисленное внесение удобрений (периодически каждые 6 лет или ежегодно) оказывало негативное влияние на продолжительность жизни хвои и реакцию роста молодых насаждений сосны (*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm.) во внутренних районах Британской Колумбии (Канада) [131].

Минеральные удобрения отрицательно влияли на физико-механические свойства древесины при их ежегодном и периодическом (через 5 лет) внесении в молодые плантационные насаждения и лесные культуры и ежегодном применении в средневозрастных насаждениях [132, 133].

Сбалансированность элементов питания способствует устойчивости древостоев к неблагоприятным погодным условиям и, в частности, к заморозкам. Внесение большого количества N-удобрений может нарушить баланс и сделать древостой менее устойчивыми. Например, внесение доз N-удобрений более чем 150 кг/га приводило к повреждению заморозками недостаточно одревесневших верхушечных побегов. Видимо, это было связано с недостатком бора, содержание которого в хвое удобренных растений уменьшалось до дефицитного уровня [134].

Внесение N-удобрений приводит к увеличению размеров крон, что в свою очередь повышает риск ветровалов в первые годы, снижаясь через 8 лет до первоначального уровня. Наибольшей опасности подвергались насаждения, в которых внесение удобрений и прореживание проходили одновременно. Прореживание в этом случае способствовало большему развитию кроны удобренных деревьев [35].

Потенциальные преимущества удобрений для ускорения роста деревьев и увеличения запасов углерода в почве необходимо сопоставлять с соответствующими издержками, поскольку производство, транспортировка и применение удобрений влекут за собой сжигание ископаемого топлива и выбросы  $CO_2$  [79].

#### ОТРАЖЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ В НАЦИОНАЛЬНОЙ ОТЧЕТНОСТИ РКИК ООН

В настоящее время удобрения в лесном хозяйстве РФ практически не применяют, поэтому выбросы и поглощение парниковых газов, связан-

**Таблица 1.** Ориентировочный расчет результатов проекта внесения удобрений с точки зрения учета эмиссий парниковых газов

Компоненты углеродного бюджета	т CO <sub>2</sub> -экв/га (доверительный интервал)
Увеличение фитомассы (накопленное в течение 17 лет)	+14.4 (10.4–18.4)
Увеличение запасов крупных древесных остатков (отношение массы мертвой древесины к фитомассе 0.12) [136]	+1.7 (1.3–2.2)
Увеличение запасов углерода в почве (накопленное в течение 20–30 лет, предполагая начальное содержание 40 т С/га)	+5.5 (0.8–10.2)
Выбросы CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O от сжигания топлива при внесении удобрений: от 30 кг CO <sub>2</sub> /га при использовании тракторов [5], 300 кг CO <sub>2</sub> /ч при использовании вертолета и до 1000 кг CO <sub>2</sub> /ч при использовании самолета [137]	–0.1 (0.03–0.5)
Прямые выбросы N <sub>2</sub> O [5]	–0.70 (–1.26–0.07)
Непрямые выбросы N <sub>2</sub> O [5]	–0.08 (–0.27–0.00)
Баланс:	20.7 (14.2–27.0)

Примечание. По данным табл. 1, для секвестрирования дополнительной тонны CO<sub>2</sub> средневозрастными хвойными лесами южной тайги требуется внесений 7.2 кг азота (доверительный интервал – 5.6–10.3). Потенциальное увеличение чистого поглощения составляет в среднем 1.08 (0.82–1.51) т CO<sub>2</sub>-экв/га/год.

ные с их использованием, не представлены в национальном кадастре парниковых газов [135]. Необходимо отметить, что методы оценки выбросов парниковых газов при применении органических, минеральных и известковых удобрений в настоящее время разработаны и рекомендованы к использованию в руководящих указаниях МГЭИК [5, 36].

При использовании удобрений в лесных климатических проектах необходимо учитывать выбросы N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, происходящие в результате добавления известковых материалов и удобрений, содержащих N<sub>м</sub>. Для большинства почв увеличение доступного N повышает темпы нитрификации и денитрификации, что приводит затем к увеличению производства N<sub>2</sub>O [5]. В среднем выбросы N<sub>2</sub>O составляют ≈1% от N, внесенного в почвы [36], хотя этот коэффициент выбросов может варьировать в зависимости от параметров

окружающей среды (климата, содержания органического углерода, гранулометрического состава, кислотности) и других факторов (например, скорости поступления N в почву, вида удобрений) [5].

Помимо прямых выбросов N<sub>2</sub>O из почв, необходимо учитывать косвенные выбросы N<sub>2</sub>O, которые связаны с улетучиванием N в виде NH<sub>3</sub> и окислов N (NO<sub>x</sub>) и поступлением этих газов и их производных (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) в почву и на поверхность водоемов, а также в результате вымывания из почвы и поверхностного стока N, входящего в состав удобрений [5, 36]. Обновленный набор коэффициентов прямых и косвенных выбросов N<sub>2</sub>O, а также выбросов CO<sub>2</sub> от внесения удобрений и известкования почв представлен в руководстве МГЭИК [5].

Результаты проекта применения удобрений должны сравниваться с базовой линией (без проекта), и разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов. Выбросы парниковых газов при этом включают: сжигание ископаемого топлива техникой при внесении удобрений (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), прямые и непрямые выбросы N<sub>2</sub>O при применении N-удобрений, выбросы CO<sub>2</sub> при применении известкования и N<sub>м</sub>. Поглощение включает в себя резервуар живой фитомассы, крупных древесных остатков, органического вещества почвы, долгосрочное хранение углерода в лесоматериалах.

Результаты проекта применения удобрений с точки зрения учета эмиссий парниковых газов необходимо сравнивать с базовой линией (без проекта), и разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов. Выбросы парниковых газов при этом включают: сжигание ископаемого топлива техникой при внесении удобрений (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), прямые и непрямые выбросы N<sub>2</sub>O при применении N-удобрений, выбросы CO<sub>2</sub> при известковании и внесении N<sub>м</sub>. Сокращение выбросов может включать следующие компоненты: увеличение запасов фитомассы, крупных древесных остатков, углерода в почве, долгосрочное хранение углерода в лесоматериалах. Ориентировочный расчет результатов проекта внесения удобрений приведен в табл. 1. Данный расчет основан на собранной нами базе данных экспериментов по внесению удобрений [42]. Предполагается научно обоснованный отбор насаждений и соблюдение технологии внесения (удобрение – N<sub>аа</sub>150, хвойные древостои южной тайги 40–70-летнего возраста).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение удобрений в тщательно отобранных насаждениях является одним из эффективных методов увеличения их производительности и усиления углеродпоглощающей способности лесов. Основанием для внесения удобрений могут быть тип леса и бонитет древостоев, но более точно определить необходимость и рассчитать дозу внесения удобрений можно по результатам химического анализа хвои, листвы и почв. Применение удобрений без учета конкретных условий может привести к загрязнению окружающей среды, повышенным эмиссиям и нарушению биоразнообразия.

Внесение удобрений наиболее эффективно в сочетании с другими лесоводственными мероприятиями, в частности, с рубками ухода. Удобрение перегущенных древостоев приводит к повышенному отпаду, удобрение слишком редких — к не пропорциональному увеличению фитомассы ветвей. Применение удобрений является важным компонентом плантационного лесовыращивания, где сочетание селекционного посадочного материала, полива, рубок ухода позволяет создать оптимальные условия для роста растений и поглощения углерода.

Наибольший эффект от внесения удобрений наблюдают в средних по продуктивности условиях местопроизрастания с достаточным, но не избыточным увлажнением, на 1–2 класса бонитета ниже от регионального максимума в возрасте максимального текущего прироста общей или деловой древесины (40–70 лет для хвойных пород).

Наиболее популярными (недорогими, но эффективными) являются N-удобрения. Многолетние эксперименты в Финляндии, Швеции, Канаде и России показали, что поглощение 1 т CO<sub>2</sub> фитомассой хвойных насаждений требует от 7 до 31 кг (в среднем 14) действующего вещества удобрений, в основном азота. Однако необходимо контролировать наличие прочих элементов питания, в частности P, K и бора, недостаток которых может ограничить эффект от применения N-удобрений.

Применение минеральных удобрений может также обеспечить более высокие темпы аккумуляции органического углерода в почве (от 5 до 30%) в зависимости от типа леса, типа почвы, а также от вида и объема примененных удобрений. Это обеспечивает долговременное накопление углерода в соизмеримых с наземной фитомассой объемах. Более точные оценки накопления углерода в почве могут быть получены в результате моделирования для конкретных условий.

Совместное внесение N-удобрений и ингибиторов уреазы позволяет снизить потери N и уменьшить дозы удобрения. Медленно растворяющиеся комбинированные удобрения способны обеспечить долговременный эффект от их применения, избежать стресс при внесении, уменьшить потери удобрений (эмиссию парниковых газов, загрязнение окружающей среды). Однако их применение ограничено более высокой стоимостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M.M.B., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Climate Change, 2022.
2. Global forest resources assessment 2020. Rome: FAO, 2020.
3. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // Sci. Data. 2018. V. 5. 180056.
4. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., Van Der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. № 12. P. 5323–5340.
5. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eds. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. Switzerland: IPCC, 2019.
6. Johnson D.W. Nitrogen retention in forest soils // J. Environ. Qual. 1992. V. 21. № 1. P. 1–12.
7. Vitousek P.M., Howarth R.W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? // Biogeochemistry. 1991. V. 13. P. 87–115.
8. Albrektson A., Aronsson A., Tamm C.O. Effect of forest fertilisation on primary production and nutrient cycling in the forest ecosystem // Silva Fennica. 1977. V. 11. № 3. P. 233–239.
9. Reich P.B., Grigal D.F., Aber J.D., Gower S.T. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils // Ecology. 1997. V. 78. № 2. P. 335–347.
10. Krause H.H., Weetman G.F., Koller E., Veilleux J.-M. Interprovincial forest fertilization program 1968–1983. V. 21. Faculty of Forestry, University of British Columbia, 1987. 55 p.
11. Albaugh T.J., Allen H.L., Dougherty P.M., Kress L.W., King J.S. Leaf area and above- and belowground growth

- responses of loblolly pine to nutrient and water additions // *Forest Sci.* 1998. V. 44. № 2. P. 317–328.
12. *Canary J.D., Harrison R.B., Compton J.E., Chappell H.N.* Additional carbon sequestration following repeated urea fertilization of second-growth Douglas-fir stands in western Washington // *Forest Ecol. Manag.* 2000. V. 138. № 1. P. 225–232.
  13. *Grayston S.* Effects of forest fertilization on soil C sequestration and greenhouse gas emissions. Greenhouse-gas budget of soils under changing climate and landuse (Burnout) // *Proceed. Europ. Sci. Found. COST Action 639 Workshop*, 2007. V. 110. P. 33–38.
  14. *Binkley D., Fisher R.F.* Nutrition Management // *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons, Ltd, 2019. P. 319–349.
  15. *Brockley R.P.* Response of thinned, immature lodgepole pine to nitrogen and boron fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1990. V. 20. № 5. P. 579–585.
  16. *Fox T.R.* Sustained productivity in intensively managed forest plantations // *Forest Ecol. Manag.* 2000. V. 138. № 1. P. 187–202.
  17. *From F., Strengbom J., Nordin A.* Residual long-term effects of forest fertilization on tree growth and nitrogen turnover in boreal forest // *Forests*. 2015. V. 6. № 4. P. 1145–1156.
  18. *Федорец Н.Г., Соколов А.И., Солодовников А.Н.* Последствие минеральных удобрений в посевах сосны в долгосрочном эксперименте в Карелии // *Лесоведение*. 2018. № 5. С. 372–380.
  19. *Derome J.* Effects of forest liming on the nutrient status of podzolic soils in Finland // *Water Air Soil Pollut.* 1990. V. 54. № 1. P. 337–350.
  20. *Цареградская С.Ю., Аршинова Т.И.* Влияние минеральных удобрений на продуктивность рекреационных сосняков Подмосковья // *Повышение комплексной продуктивности лесов: сб. научн. тр. М.: ВНИИЛМ*, 1987. С. 115–123.
  21. *Паавилайнен Э.* Применение минеральных удобрений в лесу. Пер. с финского Л.В. Блюдника / Под ред. В.С. Победова. М.: Лесн. пром-ть, 1983. 96 с.
  22. *Сляднев А.П.* Применение минеральных удобрений в сосняках зоны смешанных лесов // *Лесн. хоз-во*. 1971. № 10. С. 34–35.
  23. *Степаненко А.А.* Интенсификация целевого выращивания сосновых насаждений в южно-таежном лесном районе таежной зоны европейской части России: Дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: ЦЭПЛИ, 2010. 356 с.
  24. *Janssens I.A., Dieleman W., Luyssaert S., Subke J.-A., Reichstein M., Ceulemans R., Ciais P., Dolman A.J., Grace J., Matteucci G., Papale D., Piao S.L., Schulze E.-D., Tang J., Law B.E.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition // *Nat. Geosci.* 2010. V. 3. № 5. P. 315–322.
  25. *Bracho R., Vogel J.G., Will R.E., Noormets A., Samuelson L.J., Jokela E.J., Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Markewitz D., Seiler J.R., Strahm B.D., Teskey R.O., Fox T.R., Kane M.B., Laviner M.A., McEligot K.M., Yang J., Lin W., Meek C.R., Cucinella J., Akers M.K., Martin T.A.* Carbon accumulation in loblolly pine plantations is increased by fertilization across a soil moisture availability gradient // *Forest Ecol. Manag.* 2018. V. 424. P. 39–52.
  26. *Binkley D., Sollins P.* Factors determining differences in soil pH in adjacent conifer and alder-conifer stands // *J. Soil Sci.* 1990. V. 54. № 5. P. 1427–1433.
  27. *Brozek S.* Effect of soil changes caused by red alder (*Alnus rubra*) on biomass and nutrient status of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings // *Canad. J. For. Res.* 1990. V. 20. № 9. P. 1257–1264.
  28. *Paschke M.W., Dawson J.O., David M.B.* Soil nitrogen mineralization in plantations of *Juglans nigra* interplanted with actinorhizal *Elaeagnus umbellata* or *Alnus glutinosa* // *Plant and Soil*. 1989. V. 118. № 1. P. 33–42.
  29. *Nichols J.D., Bristow M., Vanclay J.K.* Mixed-species plantations: Prospects and challenges: Improving productivity in mixed-species plantations // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 233. № 2. P. 383–390.
  30. *Тумов В.А.* Опыт выращивания ольхи черной и ее почвоулучшающая роль в смешанных с ясенем обыкновенным культурах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л.: ЛТА им. С.М. Кирова, 1980. 19 с.
  31. *Nilsen P.* Fertilization experiments on forest mineral soils: A Review of the Norwegian results // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 541–554.
  32. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2018 and inventory report 2020. Submission to the UNFCCC Secretariat: European Environment Agency. Annual–Brussels, 2020. 997 p.
  33. *Keipi K.* The concept of forest fertilization returns in Norway, Sweden and Finland // *Folia Forest.* 1972. V. 152. P. 38.
  34. *Nohrstedt H.-Ö.* Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A Review of Swedish experiences // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 555–573.
  35. *Saarsalmi A., Mälkönen E.* Forest fertilization research in Finland: A Literature review // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 514–535.
  36. IPCC 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: IGES, 2006.
  37. *Jaakkola T., Mäkinen H., Saranpää P.* Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 237. P. 513–521.
  38. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2019: Reports and assessments/United States Environmental Protection Agency. US EPA O., 2021. 785 p.
  39. *Weetman G.F., Krause H.H., Koller E.* Interprovincial forest fertilization program-results of five-year growth remeasurements in thirty installations: fertilized in 1969, remeasured in 1974. *Canad. Forest Serv. Ottawa, Ont.*, 1976. 27 p.
  40. *Weetman G.F., Krause H.H.* Interprovincial forest fertilization program. Results of five-year growth remeasurements in 17 installations fertilized in 1972 and remeasured in 1976: *Canad. Forest Serv. Ottawa*, 1979. 27 p.
  41. *Weetman G.F., Krause H.H., Koller E., Veilleux J.-M.* Interprovincial forest fertilization trials 5- and 10-year results // *Forest. Chronicle*. 1987. V. 63. № 3. P. 184–192.
  42. *Щепащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Мартыненко О.В.* База данных по применению минеральных удоб-

- рений в лесном хозяйстве и их влиянию на углеродный бюджет лесов. Zenodo, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7693698>
43. *Mälkönen E., Kukkola M.* Effect of long-term fertilization on the biomass production and nutrient status of Scots pine stands // *Fertil. Res.* 1991. V. 27. № 1. P. 113–127.
  44. *Победов В.С.* Применение удобрений в лесном хозяйстве. М.: Лесн. пром-ть, 1972. 201 с.
  45. *Победов В.С.* Исследование и обоснование применения минеральных удобрений в интенсивном лесном хозяйстве (на примере Белорусской ССР): Дис. д-ра с.-х. наук. Гомель, 1981. 450 р.
  46. *Шумаков В.С.* Достижения и проблемы применения минеральных удобрений в лесном хозяйстве СССР // *Агрохимия.* 1972. № 7. P. 145–153.
  47. *Копытков В.В.* Руководство по исследованию и применению композиционных материалов при лесовыращивании. М.: Лесн. пром-ть, 1991. 233 р.
  48. Наставление по системам применения удобрений в лесном хозяйстве на европейской территории СССР. М.: Гос. комитет СССР по лесу, 1991.
  49. *Мойко М.Ф.* Внесение минеральных удобрений – эффективное средство повышения продуктивности лесных насаждений // *Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве.* 1977. P. 23–28.
  50. ОСТ 56-93-87 Питомники лесные постоянные. Технология выращивания посадочного материала в различных лесорастительных зонах СССР. 1987. 27 с.
  51. Рекомендации по диагностике минерального питания сосны на лесосеменных плантациях. М.: ВНИИЛМ Гослесхоза СССР, 1986. 19 с.
  52. Рекомендации по уточнению сроков применения азотных удобрений в хвойных лесах южной тайги и зоны хвойно-широколиственных лесов центральных районов РСФСР. М.: ВНИИЛМ, 1985. 18 р.
  53. *Победов С.В., Булавик И.М., Лебедев Е.А.* Справочник по удобрениям в лесном хозяйстве. 2-е изд. М.: Агропромиздат, 1986. 172 с.
  54. *Богданов П.Л.* Изменение почвенной среды под воздействием извести на замшелых вырубках и сфагновых болотах // *Лесн. журн.* 1964. № 3. С. 31–26.
  55. *Еникеева М.Г., Иваницкая Е.Ф.* Влияние известкования на микрофлору и некоторые свойства лесной почвы // *Лесоведение,* 1971. № 2. P. 58–70.
  56. *Кошельков С.П.* Применение удобрений для улучшения роста сосны // *Лесоведение.* 1969. № 4. P. 64–72.
  57. *Щербаков А.П.* Опыт применения листовой диагностики для определения потребности сосны в азоте и фосфоре // *Физиологическое обоснование системы питания растений.* М.: Наука, 1964. P. 324–331.
  58. *Tamm C.O.* Some experiences from forest fertilization trials in Sweden // *Silva Fennica.* 1965. V. 117. № 3. P. 1–24.
  59. *Viro P.J.* Estimation of the effect of forest fertilization // *Metsantutkimuslaitoksen julk.* 1965. V. 59. № 3. P. 5–42.
  60. *Булавик И.М.* Действие азотных удобрений на режим питания и прирост древесины в сосняках БССР: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1977. 24 с.
  61. *Albaugh T.J., Fox T.R., Cook R.L., Raymond J.E., Rubilar R.A., Campoe O.C.* Forest fertilizer applications in the southeastern united states from 1969 to 2016 // *Forest Sci.* 2019. V. 65. № 3. P. 355–362.
  62. *Бузыкин А.И.* Реакция соснового древостоя на внесение удобрений в условиях Приангарья // *Тез. докл. 1-й Всесоюзн. конф. по физиологии и биохимии древесн. раст.* Красноярск, 1974. С. 46.
  63. *Матюшкин В.А., Скороходова О.Н.* Изменение видового состава и обилия живого напочвенного покрова в сосняках травяно-сфагновых под влиянием проведения комплекса лесохозяйственных мероприятий // *Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты.* Петрозаводск: ИЛ КарНЦРАН, 2004. С. 230–233.
  64. *Morrison I.K., Foster N.W.* Effect of nitrogen, phosphorus and magnesium fertilizers on growth of a semimature jack pine forest, northwestern Ontario // *Forest Chronicle.* 1995. V. 71. № 4.
  65. *Гелес И.С., Шубин В.И., Коржицкая З.А.* Влияние удобрений на некоторые свойства древесины сосны // *Лесоведение.* 1987. № 4. С. 72–77.
  66. *Воронкова А.Б.* Потери азота в форме аммиака из удобрений при подкормке еловых древостоев // *Агрохимия.* 1981. № 2. С. 3–9.
  67. *Zobel B.* Wood quality from fast-grown plantations // *Tappi.* 1981. V. 64. № 1. P. 71–74.
  68. *Hagner M.* Strategier for ett norrlandskt industris kogsbruk // *Skogs – Lantbruk Sakad. Tidskr.* 1989. V. 128. № 415. P. 345–349.
  69. *Коржицкий В.Д.* Влияние азотных удобрений (мочевины) на рост и развитие сосновых насаждений в условиях южной Карелии: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Петрозаводск, 1977. 24 с.
  70. *Puro T.* Effect of fertilization time on growth reaction of different tree species // *Folia Forestalia.* 1982. V. 507. P. 1–14.
  71. *Капост В.Я., Сацениекс В.Я.* Применение минеральных удобрений в насаждениях хвойных пород Латвийской ССР // *Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве.* Тарту, 1977. С. 8–12.
  72. *Schmidt W.C.* Zur techik der dungerausbringung im wald // *Allgemeine Forstzeitschrift.* 1983. V. 38. № 41. P. 1103–1104.
  73. *Sefatsson J.* Arbetsmetoder vid skogs-godsling. 1966. V. 1. № 22. P. 27–32.
  74. *Воронкова А.Б.* Роль азотных удобрений в оптимизации почвенного звена азотного питания хвойных пород // *Повышение плодородия лесных почв.* М.: ВНИИЛМ, 1989. С. 63–73.
  75. *Posey C.E.* The effects of fertilization upon wood properties of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) // *Tree Improv. Genet. – Southern Forest Tree Improv. Conf. School of Forestry, North Carolina Agricult. Exp. Station.* 1964. P. 126–130.

76. Fox T.R., Lee Allen H., Albaugh T.J., Rubilar R., Carlson C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States // Southern J. Appl. Forest. 2007. V. 31. № 1. P. 5–11.
77. Zhao D., Kane M., Teskey R., Fox T.R., Albaugh T.J., Allen H.L., Rubilar R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States // Forest Ecol. Manag. 2016. V. 375. P. 105–111.
78. Gao W., Yang H., Kou L., Li S. Effects of nitrogen deposition and fertilization on N transformations in forest soils: a review // J. Soils Sediment. 2015. V. 15. № 4. P. 863–879.
79. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // Forest. Ecol. Manag. 2020. V. 466. Tamm Review 118127.
80. Miller H.G. Forest fertilization: Some guiding concepts // Forestry: Inter. J. Forest Res. 1981. V. 54. Forest Fertil. № 2. P. 157–167.
81. Johnson D.W. Effects of forest management on soil carbon storage // Water Air Soil Pollut. 1992. V. 64. № 1. P. 83–120.
82. Colombo S.J., Parker W.C., Luckai N., QingLai D., Tie-Bo C. The effects of forest management on carbon storage in Ontario's forests // Climate Change Res. Rep. – Ontario Forest Research Institute. 2005. № CCRR-03.
83. Грязькин А.В., Мельников Е.С. Естественное возобновление ели на участках, пройденных комплексным уходом // Лесн. журн. 1995. № 2–3. С. 195–197.
84. Мельников Е.С. Лесоводственные основы теории и практики комплексного ухода за лесом: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб., 1999. 45 с.
85. Шубин В.И., Гелес И.С., Крутов В.И. Повышение производительности культур сосны и ели на вырубках. Петрозаводск: КарелНЦ АН СССР, 1991. 176 с.
86. Granheim P.O., Braekke F.H. Vegetation changes on a soligenous mire complex after fertilization and liming // Res. Paper Skogforsk, 1993. P. 15.
87. Haywood J.D., Thill R.E. Long-term responses of understory vegetation on a highly erosive Louisiana soil to fertilization. V. 382. Asheville (NC): The Station, 1995. 6 p.
88. Stewart H.S.D. Reviewing the scientific use of fertilizers in forestry // J. Forest. 1965. V. 63. № 7. P. 501–508.
89. Heinsdorf D. Beitrag über die Beziehungen zwischen dem Gehalt an Makronährstoffen N, P, K, Mg in Boden und Nadeln und der Wuchsleistung von Kiefern-kulturen in Mittelbrandenburg // Arch. Agron. Soil Sci. 1963. V. 7. № 4. P. 331–353.
90. Ладейщикова Е.И., Побегайло А.И., Белый Г.Д., Черных А.Г. К вопросу о применении удобрений в сосняках, предрасположенных к поражению корневой губкой // Лесоведение. 1980. № С. 3–9.
91. Johnson D.W., Curtis P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis // Forest Ecol. Manag. 2001. V. 140. № 2. P. 227–238.
92. Polge H. Contribution de la densitométrie à la science du bois // Xylorama: Trends in Wood Research / Tendenzen in der Holzforschung / Ed. L.J. Kučera. Basel: Birkhäuser, 1985. P. 146–154.
93. Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А., Полянский Е.В., Бельков В.П., Гладков Е.Г., Головачанский И.Н., Рябинин Б.Н., Морозов В.А., Шиманский П.С. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесн. пром-ть, 1984. 248 с.
94. Шумаков В.С. О применении минеральных удобрений в лесном хозяйстве // Лесн. хоз-во. 1981. № 5. С. 17–20.
95. Scarratt J.B. Forestry practices in Scandinavia. P. 1. Sweden // Forest Newsletter. 1988. Summer. P. 3–7.
96. Laakkonen O. Toistuvan lannoituksen kannattavuus etelasuomen Kuivahkon kankaan mannikoissa // Folia Forest. 1989. № 741. P. 1–26.
97. Fight R.D., Briggs D.G., Fahey T.D. Silvicultural regimes to enhance wood quality and economic return in coast Douglas-fir // 19<sup>th</sup> World Congr. “Sci Forest IUFRO's 2<sup>nd</sup> Century”, Montreal, 5–11 Aug., 1990. Div.5/Int. Union Forest Res. Organ. Montreal, 1990. P. 425.
98. Победов В.С. Экономическая эффективность использования минеральных удобрений в лесном хозяйстве. М.: ЦБНТИ лесхоз, 1975. 43 с.
99. Вярбила В.В. Влияние минеральных удобрений на рост и продуктивность сосновых насаждений в связи с колебанием климата и разреживанием: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1983. 20 с.
100. Клинов М.А., Грудинин И.В. Лесоводственная эффективность применения азотных удобрений в сосновых насаждениях // Удобрения и гербициды в лесных питомниках и культурах. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1987. С. 100–107.
101. Newton P.F., Amponsah I.G. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments // Forest Ecol. Manag. 2006. V. 237. № 1. P. 1–14.
102. Allen H.L. Forest fertilizers // J. Forestry. 1987. V. 85. № 2. P. 37–46.
103. Kawana A., Xydias G.K., Leaf A.L. Response of *Pinus resinosa* ait. Plantations to potassium fertilization on a potassium-deficient site // Plant and Soil. 1969. V. 30. № 3. P. 439–445.
104. Mitchell A.K., Barclay H.J., Brix H., Poltlard D.F.W., Benton R., deJong R. Biomass and nutrient element dynamics in Douglas-fir: effects of thinning and nitrogen fertilization over 18 years // Canad. J. Forest Res. 1996. V. 6. № 3. P. 376–388.
105. Yang R.C. Foliage and stand growth responses of semi-mature lodgepole pine to thinning and fertilization // Canad. J. Forest Res. 1998. V. 28. № 12. P. 1794–1804.
106. Stegemoeller K.A., Chappell H.N. Effects of fertilization and thinning on 8-year growth responses of second-growth Douglas-fir stands // Canad. J. Forest Res. 2011. V. 21. № 4. P. 516–521.
107. Valinger E. Effects of thinning and nitrogen fertilization on growth of Scots pine trees: total annual biomass increment, needle efficiency, and aboveground allocation of biomass increment // Canad. J. For. Res. 2011. V. 7. № 1. P. 219–228.

108. Safford L.O., Czapowskyj M.M. Fertilizer stimulates growth and mortality in a young *Populus-Betula* stand: 10-year results // *Canad. J. Forest Res.* 1986. V. 16. № 4. P. 807–813.
109. Wilmot T.R., Ellsworth D.S., Tyree M.T. Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands // *Forest Ecol. Manag.* 1996. V. 84. № 1. P. 123–134.
110. Fyles J.W., Côté B., Courchesne F., Hendershot W.H., Savoie S. Effects of base cation fertilization on soil and foliage nutrient concentrations, and litter-fall and throughfall nutrient fluxes in a sugar maple forest // *Canad. J. Forest Res.* 1994. V. 24. № 3. P. 542–549.
111. Long R.P., Horsley S.B., Lilja P.R. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods // *Canad. J. Forest Res.* 1997. V. 27. № 10. P. 1560–1573.
112. Wang J.-J., Bowden R.D., Lajtha K., Washko S.E., Wurzbacher S.J., Simpson M.J. Long-term nitrogen addition suppresses microbial degradation, enhances soil carbon storage, and alters the molecular composition of soil organic matter // *Biogeochemistry.* 2019. V. 142. № 2. P. 299–313.
113. Cleve K.V., Oliver L.K. Growth response of postfire quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) to N, P, and K fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1982. V. 12. № 2. P. 160–165.
114. Foster N.W., Morrison I.K. Soil fertility, fertilization and growth of Canadian forests. Great Lakes Forest Research Centre, 1983. O-X-353. 21 p.
115. Chappell H.N., Cole D.W., Gessel S.P., Walker R.B. Forest fertilization research and practice in the Pacific Northwest // *Fertil. Res.* 1991. V. 27. № 1. P. 129–140.
116. Cole D.W. Soil nutrient supply in natural and managed forests // *Plant and Soil.* 1995. V. 168. № 1. P. 43–53.
117. Leggett Z.H., Kelting D.L. Fertilization effects on carbon pools in loblolly pine plantations on two upland sites // *J. Soil Sci.* 2006. V. 70. № 1. P. 279–286.
118. Nohrstedt H.-Ö. Effects of repeated nitrogen fertilization with different doses on soil properties in a *Pinus sylvestris* stand // *Scand. J. Forest Res.* 1990. V. 5. № 1–4. P. 3–15.
119. Cleve K.V., Moore T.A. Cumulative effects of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer additions on soil respiration, pH, and organic matter content // *J. Soil Sci.* 1978. V. 42. № 1. P. 121–124.
120. Berg B., Staaf H., Wessen B. Decomposition and nutrient release in needle litter from nitrogen-fertilized scots pine (*Pinus sylvestris*) stands // *Scand. J. Forest Res.* 1987. V. 2. № 1–4. P. 399–415.
121. Magill A.H., Aber J.D. Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems // *Plant and Soil.* 1998. V. 203. № 2. P. 301–311.
122. Хайниш Э.Е., Паукке Х., Нагель Х.Д. Агрехимикаты в окружающей среде. Пер.с нем. Н.Г. Ракипова. М.: Колос, 1979. 357 с.
123. Победов В.С. Потери азота с инфильтрационными водами из обычных и медленней действующих форм азотных удобрений в сосновых культурах // *Агрехимия.* 1988. № 4. С. 11–15.
124. Smethurst P.J. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture // *Plant and Soil.* 2010. V. 335. P. 83–100.
125. Brumme R., Beese F. Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from a temperate forest // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 1992. V. 97. № D12. P. 12851–12858.
126. Binkley D., Burnham H., Lee Allen H. Water quality impacts of forest fertilization with nitrogen and phosphorus // *Forest Ecol. Manag.* 1999. V. 121. № 3. P. 191–213.
127. Fahey T.J., Battles J.J., Wilson G.F. Responses of early successional northern hardwood forests to changes in nutrient availability // *Ecol. Monograph.* 1998. V. 68. № 2. P. 183–212.
128. Thomas S.C., Halpern C.B., Falk D.A., Liguori D.A., Austin K.A. Plant diversity in managed forests: Understorey responses to thinning and fertilization // *Ecol. Appl.* 1999. V. 9. P. 864–879.
129. Turkington R., John E., Watson S., Secombe-Hett P. The effects of fertilization and herbivory on the herbaceous vegetation of the boreal forest in north-western Canada: a 10-year study // *J. Ecol.* 2002. V. 90. № 2. P. 325–337.
130. Auchmoody L.R. Response of young black cherry stands to fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1982. V. 12. № 2. P. 319–325.
131. Amponsah I.G., Comeau P.G., Brockley R.P., Lieffers V.J. Effects of repeated fertilization on needle longevity, foliar nutrition, effective leaf area index, and growth characteristics of lodgepole pine in interior British Columbia, Canada // *Canad. J. Forest Res.* 2005. V. 35. № 2. P. 440–451.
132. Матюшкина А.П., Агеева М.И., Сарелайнен А.Н., Левкина Г.М. Влияние макроструктуры древесины сосны обыкновенной на свойства целлюлозы // *Биологическая и хозяйственная продуктивность лесных фитоценозов Карелии.* Петрозаводск: КФ АН СССР Ин-т леса, 1977. С. 130–136.
133. Вярбила В.В., Шлейнис Р.И. Влияние удобрения сосновых насаждений на качество древесины // *Лесн. хоз-во.* 1981. № 12. С. 8–11.
134. Mälkönen E., Derome J., Kukkola M. Effects of nitrogen inputs on forest ecosystems estimation based on long-term fertilization experiments // *Acidification in Finland.* Springer, 1990. P. 325–347.
135. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2018 гг: ИГКЭ. Нац. докл. М., 2020.
136. Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D. A Modelling system for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia // *Forests.* 2023. V. 14. № 1. 45.
137. Markewitz D. Fossil fuel carbon emissions from silviculture: Impacts on net carbon sequestration in forests // *Forest Ecol. Manag.*, 2006. V. 236. № 2. P. 153–161.

## **Application of Mineral Fertilizers in Forests with Respect to Forest Carbon Budget**

**D. G. Schepaschenko<sup>a,b,#</sup>, L. V. Mukhortova<sup>c</sup>, O. V. Martynenko<sup>d</sup>,  
V. N. Korotkov<sup>e</sup>, and V. N. Karminov<sup>f</sup>**

<sup>a</sup>*International Institute for Applied Systems Analysis  
Schlossplatz 1, Laxenburg A-2361, Austria*

<sup>b</sup>*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS  
ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow 117997, Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Forest, Siberian Branch RAS  
Akademgorodok 50 (28), Krasnoyarsk 660036 Russia*

<sup>d</sup>*All-Russian Institute of Continuous Education in Forestry  
ul. Institutskaya 17, Moscow region, Pushkino 141202 Russia*

<sup>e</sup>*Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology  
ul. Glebovskaya 20B, Moscow 107258, Russia*

<sup>f</sup>*Mytishchi Branch of, Bauman Moscow State Technical University  
ul. 1st Institutskaya 1, Mytishchi, 141005 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: schepd@iiasa.ac.at*

Carbon sequestration and conservation is one of the important ecosystem functions of the forest. The task of modern science is to explore the possibilities of enhancing this function in order to counter the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Sustainable and climate smart forestry, in particular the use of mineral fertilizers, are an effective way to increase the productivity of forests and enhance their carbon-sequestration capacity. This review aims to summarize the experience of using mineral fertilizers in boreal and temperate forests. It is concluded that fertilization should be selective, and it is most effective in combination with other forest management operations. A significant effect is observed on sites with medium-productivity conditions on sites with sufficient, but not excessive moisture, at the age of the maximum current increment of biomass or commercial wood (40–70 years for coniferous species). The most common (inexpensive, but effective) are N-fertilizers, but it is necessary to control the content of other nutrients, in particular P, K and B. We have collected and published a database of long-term experiments on the application of mineral fertilizers. Experiments have shown that the absorption of 1 t of CO<sub>2</sub>-eq. requires from 5.6 to 10.3 kg (on average 7.2) of nitrogen. The results of a fertilizer application project should be compared against the baseline (without fertilizer application), and the difference can be counted in emission reduction units.

*Keywords:* nitrogen, phosphorus, potassium, increment, carbon uptake, forest growth, carbon sequestration.