УДК 631.4:63:633.72 doi: 10.31360/2225-3068-2024-90-171-189
EDN WINCES

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ АГРОБИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ПОЧВ ПРИ МНОГОЛЕТНЕМ ВОЗДЕЛЫВАНИИ КУЛЬТУРЫ ЧАЯ

Малюкова Л.С.

Федеральный исследовательский центр
«Субтропический научный центр Российской академии наук»,
Сочи, Россия, e-mail: malukovals@mail.ru

Малюкова Л.С. orcid.org/0000-0003- 1531-5745

Основой для разработки концептуальных положений оптимизации агробиоэкологического статуса почв под насаждениями чая в зоне влажных субтропиков России послужили материалы многолетних научных результатов в области изучения эффективности применения ряда макро- и микроудобрений (их влияния на урожай, качество продукции, состояние почв), а также научный опыт других чаепроизводящих регионов мира. В рамках предложенной концепции определены генеральные направления и обобщённый инструментарий их реализации, представляющий собой задачи, необходимые для достижения поставленной цели – оптимизации агробиоэкологического состояния почв при многолетнем возделывании чая. Основными блоками концепции являются следующие: эффективное использование исходного потенциального плодородия почв; регулирование круговорота питательных элементов как минеральными (оптимизация размера минеральных пулов питательных элементов; закрепление подвижных или мобилизация труднодоступных биогенных элементов), так и органическими (поддержание пулов биогенных элементов в органическом веществе; активизация гумификации и обеспечение почвенной секвестрации углерода; максимизация азотфиксации) компонентами; охрана почв путём мониторинга её состояния и соблюдения регламентов применения удобрений; получение новых знаний путём концентрации научных исследований на наиболее перспективных направлениях (генотипическая специфика взаимодействия растений с почвой,

мобилизация труднодоступных пулов биогенных элементов, альтернативные виды удобрений). Данный подход объединил современную и экосистемную модель управления питательными элементами в агросистемах, которые являются теоретическим фундаментом для их устойчивого функционирования. Реализация этой концепции позволит обеспечить устойчивое функционирование агрогенно-изменённых почв и наиболее эффективное использование их ресурсного потенциала при возделывании культуры чая в России.

Ключевые слова: культура чая, агрогенно-изменённые почвы, концепция, агробиоэкологический статус почв, минеральные удобрения.

Введение. Для агломерации Сочи чаеводство является системно значимой отраслью сельского хозяйства, устойчивое функционирование которой признано обеспечить население и гостей курортной зоны брендовым экологически чистым продуктом (Краснодарским чаем) и оказать поддержку местному населению путём создания рабочих мест. При возделывании чая в России, как и в других чаепроизводящих регионах мира, требуется применение достаточно высоких доз азотных (75–400 кг д.в./га), фосфорных (60–180 кг/га д.в.) и калийных (50–200 кг/га д.в.) удобрений [11]. Их длительное систематическое использование оказывает существенное влияние на состояние почв, их экологию и плодородие. К наиболее существенным изменениям почв следует отнести следующие: ацидизацию верхних горизонтов, увеличение подвижности ряда биогенных элементов (кальций, магний, калий, железо, медь, марганец, цинк), рост доли алюминия в почвенно-поглощающем комплексе, «зафосфачивание», изменение качественного состава гумуса [9, 11, 32] и ряда параметров биологической активности [12, 15]. Также следует отметить, что интенсивные системы минерального питания, обеспечивая высокую продуктивность, существенно меняют качество продукции, его вкусовые и лечебные свойства [13, 18].

Учитывая это, сохранение природной целостности и функциональности чаепригодных почв, как уникального природного объекта и основного средства производства, должно рассматриваться как первоочередная задача при их эксплуатации. Нужно отметить, что рациональному использованию чаепригодных почв в зоне влажных субтропиков России всегда уделялось особое внимание. Были изучены различные агротехнологические аспекты возделывания чая в России: технология вегетативного размножения [22], система орошения [3] и удобрения чайных плантаций [1, 14], оценочные критерии чаепригодности и уровня плодородия почв [4, 2], эффективность применения различных видов и доз макро- и микроудобрений

[11, 5], диагностика минерального питания чая [11], критерии оценки агрогенной трансформации почв при длительном возделывании чая [9], эффективность некорневого применения микроэлементов [17], диагностика устойчивости чая к засухе и низкотемпературному стрессу [41], биотехнологические работы по сохранению и размножению ценных генотипов чая [6], молекулярно-генетические исследования [42], направленные на поиск наиболее информативных маркеров устойчивости к различным стресс-факторам.

В последние десятилетия эпоха интенсификации сельскохозяйственного производства, направленная на увеличение количества производимой продукции, сменилась запросом на качество продукции и сохранение плодородия почв. С учётом этого в исследованиях чаепригодных почв большое внимание стали уделять влиянию агрохимических средств и в целом технологии возделывания чая на биологические свойства почв (ферментативную активность, «дыхание», состав и структуру микробоценоза) [12, 15]. Большой блок исследований посвящён вопросам восстановления чаепригодных почв в постагрогенный период [7, 8]. Также возрастает актуальность исследований в области биологизации и экологизации приёмов регулирования круговорота элементов в агроэкосистемах за счёт внедрения более эффективных сортов [42], повышения азотофиксации, регулирования растительно-микробных ассоциаций [19].

В целом все вышеизложенное определило ***цель исследований***, которая заключалась в разработке новой системы понимания устойчивого функционирования агрогенно-изменённых почв под культурой чая, включающей интеграцию современной и экосистемной моделей управления питательными элементами в агросистемах.

Объекты и методы исследования. В качестве материалов для проведения анализа агробиоэкологического состояния почв под многолетними насаждениями чая и разработки концептуальных положений их устойчивого функционирования, были использованы научные данные, полученные в полевых опытах с макро- и микроудобрениями в зоне влажных субтропиках России [5, 7–9, 11–16], научные публикации российских и зарубежных авторов, а также опыт удобрения чая в других регионах мира. На этой основе сформулированы основные направления концепции, реализация которых позволит обеспечить устойчивое функционирование агрогенно-изменённых почв и наиболее эффективное использование их ресурсного потенциала при возделывании культуры чая в России. Задачи вытекают как из практических наработок, полученных автором в этой

области, так теоретических и практических исследований, полученных другими исследователями на различных культурах, включая чай.

Результаты и их обсуждение. Научный анализ потребностей чайного растения в комплексе экологических факторов, а также основных проблем функционирования агроэкосистем чайных плантаций и деградации агрогенно-изменённых почв позволили выделить нескольких генеральных направлений в предложенной концепции (рис. 1). В рамках каждого направления рассмотрен обобщённый инструментарий их реализации, представляющий собой сформулированные задачи, необходимые для достижения поставленной цели – оптимизации агробиоэкологического состояния почв при многолетнем возделывании чая.

Эффективное использование природных ресурсов (растений, почв, метеоусловий) возможно только путём соблюдения базовых принципов, которые сводятся к следующему: учёту базовой природной специфики почв и растений чая; ориентации на модели плодородия почв для различных этапов культивирования чая; учёту метеозависимости параметров плодородия почв и эффективности удобрений на основе построения прогностических моделей.

Чайное растение (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) является уникальным биологическим видом, предъявляющим, в отличие от ряда других культур, особенные требования к почвенно-климатическим условиям. К основным лимитирующим факторам произрастания чая отнесены: температурный режим, суммарное количество осадков, наличие мощных кислых выщелоченных почв, обогащенных подвижными железом и алюминием [11]. Используемые под закладку чайных плантаций типы и подтипы почв, среди которых желтозёмы, бурые лесные почв (подтипы кислые, оподзоленные и слабоненасыщенные), характеризуются разной пригодностью для чая [2]. Поэтому при исходной оценке чаепригодности почв или целесообразности их дальнейшей эксплуатации важно ориентироваться на модели плодородия почв (эталонные параметры почв) для различных этапов культивирования чая. На сегодняшний день разработаны оптимальные параметры почв для полновозрастных чайных плантаций, при сочетании которых могут быть максимально реализованы жизненные функции растительного организма, обеспечивающие получение стабильно высокого урожая хорошего качества при минимальных экономических затратах [11]. Значения граничных показателей оптимальных свойств и режимов почв для возделывания культуры рассматриваются своеобразными нормативами, отклонение от которых ведёт, как правило, к снижению производительности почв.

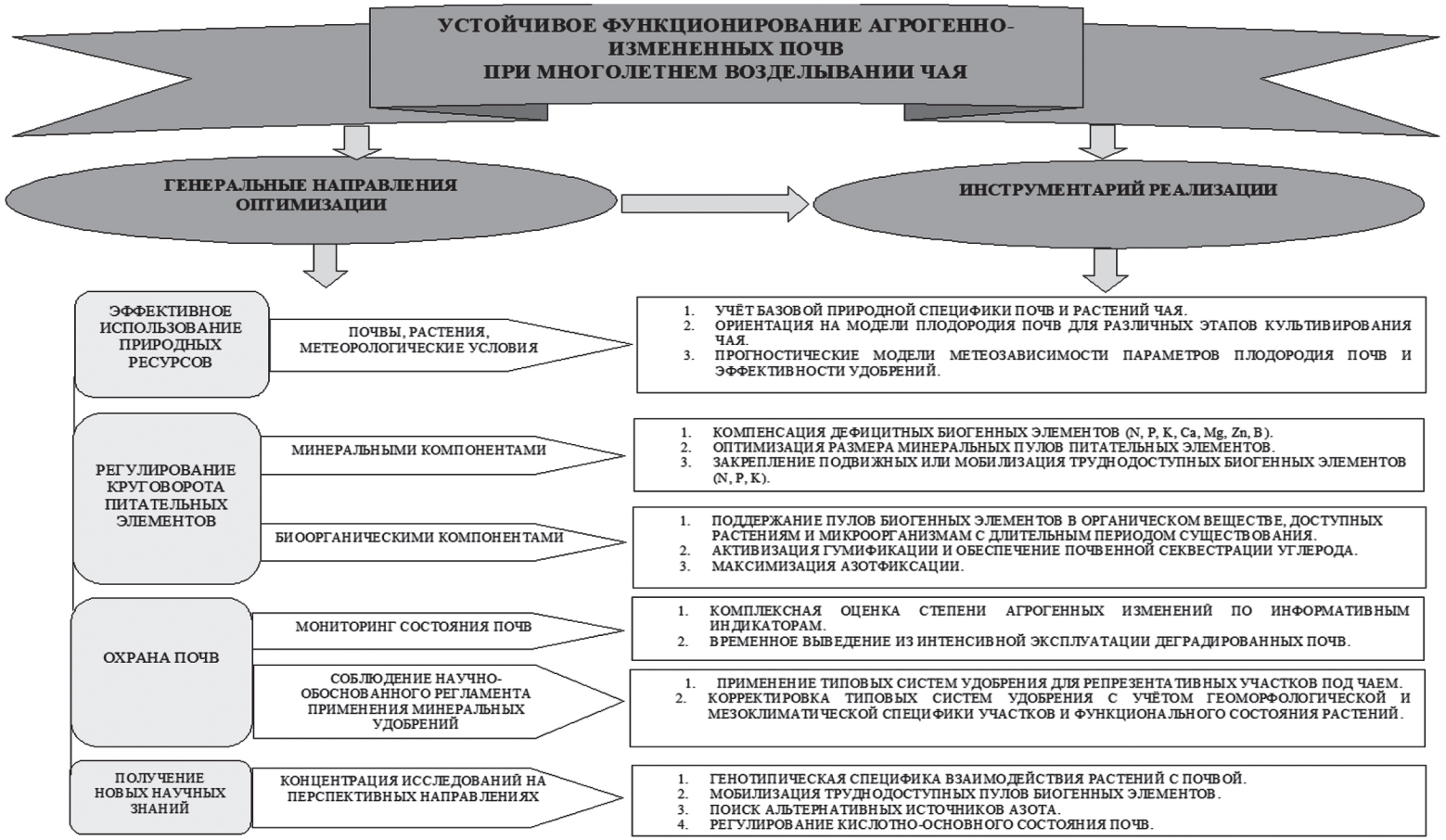

Рис. 1. Концептуальные положения оптимизации агробиоэкологического статуса почв при многолетнем возделывании чая

Fig. 1. Conceptual provisions for optimizing the soils agrobioecological status within long-term tea cultivation

Модель плодородия почв под культуру чая включает оптимальные геоморфологические особенности территории, определяющие тепловой и водный режим почв, на которой должна быть расположена чайная плантация: высоту над уровнем моря, экспозицию и крутизну склона, выход на поверхность внутрипочвенных вод, наличие эрозии или оползневых процессов. Характеристика почвы охватывает показатели, необходимые для её всесторонней оценки с точки зрения степени чаепригодности и уровня её плодородия – возможности реализации биологического потенциала культуры: мощность почвенного профиля, наличие признаков оглеения; некоторые физические свойства основного корнеобитаемого слоя почвы (такие как содержание физической глины, объёмная масса) и основные агрохимические свойства (комплекс кислотно-основных свойств, содержание гумуса и подвижных форм питательных макро- и микроэлементов).

Черноморское побережье России относится к зоне неустойчивого чаеводства, поскольку вероятность проявления неблагоприятных метеорологических условий для возделывания чая составляет около 70 %. Агрометеорологические факторы являются наиболее значимыми абиотическими компонентами в сложных динамических процессах функционирования в целом агроэкосистемы чая, включая формирование её растительной и микробной биомассы, скорости процессов минерализации-гумификации органических вещества, а также доступности питательных элементов. В этой связи важнейшей задачей является выявление физико-статистических зависимостей между метеорологическими условиями и урожайностью чайной плантации, эффективностью удобрений, питательным режимом и процессами гумусообразования. Разработанные математические модели количественных зависимостей величины урожая от среднемесячной температуры марта-апреля-мая, суммы осадков за март и май, а также кислотности почв и доз азотных удобрений позволяют осуществлять заблаговременный прогноз (в апреле) урожаев первых и валовых сборов чайного листа на текущий год [16]. Такого рода прогноз позволяет корректировать систему удобрения чайных плантаций в направлении повышения устойчивости растений к экстремальным условиям (за счёт применения соответствующих видов удобрений), а также с учётом эффективности использования удобрений в тех или иных условиях. В более экстремальные годы (дефицит влаги, высокие температуры, заморозки) дозы азотных удобрений выше 200–240 кг/га д. в. являются неэффективными [11].

Вторым важным направлением является *регулирование кругооборота питательных элементов* в агроэкосистемах чайных плантаций

минеральными и биоорганическими компонентами. К основным механизмам реализации этой задачи отнесены важнейшие агрохимические приёмы регулирования питательного режима растений чая: компенсация дефицитных биогенных элементов (N, P, K, Ca, Mg, Zn, B); оптимизация размера минеральных пулов питательных элементов; закрепление подвижных или мобилизация труднодоступных биогенных элементов. Также этот блок дополнен рядом агротехнических и биологических приёмов оптимизации круговорота углерода, а также органических соединений азота и фосфора: поддержание пулов биогенных элементов в органическом веществе, доступных растениям и микроорганизмам с длительным периодом существования; активизация гумификации и обеспечение почвенной секвестрации углерода; максимизация азотфиксации. Несмотря на то, что бурые лесные кислые и бурые лесные кислые оподзоленные почвы по целому ряду своих свойств удовлетворяют основным требованиям культуры чая (мощность почвенного профиля, тепловой режим, кислотно-основное состояние, механический состав почв), недостаток питательных элементов в почве определяет необходимость систематического применения минеральных удобрений, особенно азотных. В составе минеральных удобрений на чайных плантациях изучена эффективность применения таких элементов, как азот, фосфор, калий, марганец, железо, медь, цинк, бор [1, 5, 14, 17]. Количество компонентов в системах удобрения чайных плантаций различных регионов варьирует в зависимости от обеспеченности почв их доступными формами, а также климатических условий зоны. В последние десятилетия в исследованиях был сделан упор на изучение ряда других биогенных элементов, в частности магния, серы, кальция, бора при корневом применении.

Основываясь на комплексном изучении эффективности применения макро-, мезо- и микроудобрений в агроценозах чайных плантаций Черноморского побережья России, отражающем особенности влияния изученных видов и доз минеральных удобрений на урожай чая, его стабильность, качество чайного сырья и готовой продукции, а также сохранение и воспроизводство плодородия почв была разработана многокомпонентная дифференцированная система удобрения листосборных плантаций чая [11, 14]. Разработка этой системы удобрения базировалась на дифференцированном подходе к подбору доз минеральных удобрений для конкретного производственного участка, с учётом всех агроэкологических аспектов применения удобрений, конечным итогом которой являлось получение экономически оправданного урожая высокого качества, поддержание и воспроизводство плодородия почв и минимизацию воздействия на сопредельные среды. Расчёт доз ми-

неральных удобрений для листосборных плантаций чая (молодых и полновозрастных) проведён исходя из комплекса критериев: возраст плантации, потенциальная (максимально возможная) урожайность возделываемого сорта или формы, планируемые урожай и качество продукции, кислотно-основное состояние почв, степень обеспеченности почв и растений чая элементами питания, степень агрогенной трансформации почв, экономическая целесообразность. В итоге были разработаны базовые дозы удобрений для молодых и полновозрастных чайных плантаций интенсивных сортов чая (с урожайностью не менее 50 ц/га), для почв среднего уровня потенциального плодородия по кислотно-основному состоянию, которые обеспечивают получение относительно высокой урожайности при сохранении (либо незначительном снижении) качества чайного сырья, воспроизводство плодородия почв и в наименьшей степени влияют на её экологическое состояние. Установленные базовые дозы минеральных удобрений рекомендуется дополнительно корректировать с учётом ряда других важных критериев путём введения соответствующих поправочных коэффициентов [11, 14]. Так, например, исходный уровень плодородия почв, определяемый её кислотно-основным состоянием, изначально предопределяет возможность получения низкой, средней или высокой урожайности чайной плантации. Для почв с кислотно-основными характеристиками, соответствующими высокой градации дозы удобрений увеличиваются на 20 % (k = 1,2) в связи с высокой эффективностью их использования в оптимальном для чайного растения диапазоне кислотности. Для почв низкой градации, дозы снижаются на 20 % (k = 0,8). При подборе доз для менее продуктивных сортов и форм чая (урожайность менее 50 кг/га) следует также ввести поправочный коэффициент k = 0,8 (дозы удобрений снижаются на 20 %). В случае сверхвысокого (избыточного) содержания подвижных форм фосфора в почве (1 000–2 000 мг/кг), что часто бывает характерно для длительно эксплуатируемых чайных плантаций, следует отказаться от применения фосфорных удобрений. Разработанная схема подбора доз минеральных удобрений применима для наиболее типичных чаепригодных почв – бурых лесных кислых, а также с некоторым приближением для бурых лесных оподзоленных с относительно мощным почвенным профилем, без признаков оглеения. В случае низкобонитетных почв (среднемощных или (и) оглеенных) дозы удобрений должны быть снижены и дополнительно скорректированы с учётом средней многолетней урожайности плантации, поскольку эффективность применения минеральных удобрений в данном случае будет в первую очередь лимитироваться неблагоприятными физическими свойствами почвы.

При длительной эксплуатации чайных плантаций (более 20 лет) необходимо отслеживать в почвах уровень содержания обменных форм кальция, магния, цинка и водорастворимого бора для принятия решения по их компенсации. При выявлении низкой обеспеченности почв длительно эксплуатируемых чайных плантаций Zn (менее 3 мг/кг) и B (менее 0,2 мг/кг) с целью восстановления их плодородия, стабилизации продукционного процесса, сохранения качества чайного сырья в традиционную систему удобрения (NPK) следует включать эти элементы в количествах, приближенных к изученным дозировкам (Zn – 4 кг д.в./га (не более 10 лет), B – 6 кг д.в./га) при периодическом контроле подвижного цинка в почвах и биологической активности почв [5]. Эффективным для чайной плантации (при снижении содержания обменного кальция в почвах до уровня 2–4 ммоль(экв)/100 г) показал себя кальцийсодержащий природный материал, образующийся при дроблении известняков на мелкие фракции щебня (карьер, Адлерский район) (эффективная норма 250 кг/га), обладающий низкой нейтрализующей способностью. При этом для этого нетрадиционного вида удобрений необходимо разработать технологический регламент, включающий элементы его транспортировки, хранения и внесения в почву. Магнийсодержащие удобрения (в дозе Mg 60) необходимо вводить в систему удобрения чайных плантаций с содержанием в почвах обменного магния менее 1,0 ммоль(экв)/100 г. В целом применение многокомпонентных удобрений позволит значительно интенсифицировать продукционные процессы чая за счёт оптимизации функционального состояния чайных растений в неблагоприятных условиях, а также сохранения и некоторого повышения качества чайного сырья и готовой продукции. Для внедрения микроудобрений в практику чаеводства, необходимо создавать научные и материально-технические предпосылки, в частности формировать на основе исследований химическую формулу модифицированного многокомпонентного вида удобрений для чайного растения и регламент его применения.

Гумусное состояние почв является одним из интегральных показателей её плодородия, т. к. определяет особенности функционирования эдафического компонента и продуктивность агроэкосистем. Режим формирования органического вещества почв играет важную роль в устойчивом развитии агроэкосистем. Так, с позиций эколого-биохимической устойчивости агроэкосистем стабильные показатели урожайности, как правило, должны сочетаться с обязательным поддержанием средообразования, как минимум, на уровне простого воспроизводства

гумуса почвы [10]. При интенсивном сельскохозяйственном производстве, особенно в условиях горного рельефа, происходят значительные потери гумуса, как за счёт усиления минерализации органических веществ, так и за счёт эрозионных процессов. Это определяет важность поддержания пулов биогенных элементов в органическом веществе, доступных растениям и микроорганизмам с длительным периодом существования. Чайные агроценозы выделяются значительным объёмом поступления в почву органических веществ (до 100 т/га) после ежегодной корректирующей шпалерной и периодической омолаживающей подрезки. Последующие за этим процессы минерализации или гумификации органических веществ зависят от многих факторов: свойств почвы (в их числе pH, содержание органического углерода, общий азот, отношение C : N, микробная биомасса) и климатических условий (годовые осадки и температура). Большое влияние на разложение органического вещества с выделением углекислого газа или секвестрацию углерода в почве оказывает использование неорганических азотных удобрений. Повышение количества азота в почвах может существенно повлиять на баланс углерода в экосистеме за счёт изменения круговорота питательных веществ, скорости поступления углерода (первичное производство) и выхода углерода (разложение органического вещества), а также секвестрации углерода в экосистеме [27]. Азотные удобрения могут оказывать ингибирующий или стимулирующий эффект на процессы минерализации органических веществ. В ряде исследований показано, что добавление азота вызывала существенное снижение дыхания почв и увеличение наземной секвестрации углерода [24], которая возрастала с увеличением продолжительности внесения удобрений [49].

Фиксация молекулярного азота (симбиотическая и несимбиотическая) является одним из главных источников вовлечения в круговорот связанного азота. При этом, следует отметить, что азотфиксирующая активность кислых почв под чаем очень низкая и существенно ингибируется под действием минеральных удобрений [19]. Поэтому активизация процессов азотфиксации почв под чаем достаточно сложная задача, требующая новых современных подходов, среди которых наиболее эффективным считается создание сортов, способных к симбиозу с ризобиями [52].

Ещё одним важнейшим направлением предлагаемой концепции является *охрана почв*, включающая мониторинг их состояния по комплексу новых информативных параметров и соблюдение научно-обоснованного регламента применения минеральных удобрений. В этом направлении было выделено несколько инструментариев, позволяющих обеспечить

выполнение этой задачи: оценка степени агрогенных изменений по информативным индикаторам; временное выведение из интенсивной эксплуатации деградированных почв; применение типовых систем удобрения для репрезентативных участков под чаем; корректировка типовых систем удобрения с учётом геоморфологической и мезоклиматической специфики участков и функционального состояния растений.

Для диагностики биофункционального состояния агрогенно-изменённых почв чайных плантаций в зоне влажных субтропиков России разработаны допустимые и критические уровни изменения параметров биологической активности почв (критериально значимые величины и градации), позволяющие нормировать агрогенную нагрузку [12]. К наиболее чувствительным и информативным почвенным биологическим показателям отнесены: микробный метаболический коэффициент, активность инвертазы, уреазы и каталазы, а также численность актиномицетов и микромицетов в верхних почвенных слоях, наиболее подверженных агрогенному воздействию. Обоснованы этапы выполнения полевых и лабораторных работ: основной диагностический почвенный слой, сроки и техника отбора почвенных образцов, их хранение, методика лабораторных исследований.

Также эффективной мерой охраны почв является соблюдение землепользователями научно-обоснованного регламента применения минеральных удобрений. Научно-обоснованные годовые нормы удобрений для чайных плантаций, рекомендуемые к применению в настоящее время были дифференцированы по зонам чаеводства, поскольку их эффективность в разных условиях будет различной [2]. Они должны быть рассчитаны для каждой конкретной плантации согласно научно-обоснованным системам диагностики минерального питания и удобрения чая [11, 15] по результатам почвенно-агрохимического обследования, включающего обязательную оценку показателей, лимитирующих урожайность и определяющих уровень плодородия почв применительно к культуре (кислотность, степень обеспеченности основными макроэлементами – азот, фосфор, калий), с учётом бонитета земель и зоны чаеводства. Для сбора и обобщения всей актуальной информации по каждой плантации целесообразно введение специального агропроизводственного документа («Паспорт чайной плантации»), ведение и хранение которого должно осуществляться землевладельцами и землепользователями (с привлечением соответствующих специалистов) по единой утверждённой форме [20].

Под временным выведением из интенсивной эксплуатации деградированных почв под культурой чая понимается переход на экстенсивное

культивирование чая без применения минеральных удобрений. Исследования в области последействия минеральных удобрений показывают, что несмотря на снижение в почвах уровня азота и гумуса, а также урожайности плантаций, происходит восстановление биологической активности почв, которая является наиболее важным функциональным показателем оздоровления почв [7].

И заключительным направлением концептуальных положений является важность *получения новых научных знаний* путём концентрации исследований на наиболее перспективных направлениях, таких как: генотипическая специфика взаимодействия растений с почвой; мобилизация труднодоступных пулов биогенных элементов; поиск альтернативных источников азота; регулирование кислотно-основного состояния почв.

На сегодняшний день достаточно перспективным является изучение генотипической специфики взаимодействия растений с почвой и эффективности использования питательных элементов [40]. Корневая система, которая функционирует как связующее звено между растениями и почвой, влияет на доступность питательных веществ для растений и их распределение в почве [39, 43]. Для некоторых растений (таких как бобовые и облепиха) корневая система с её уникальной функцией фиксации азота помогает ускорить процесс круговорота питательных веществ в почве [28]. На доступность питательных веществ в почве влияет биохимический состава экссудатов и активность корневых микроорганизмов [35]. Помимо межвидовой специфики взаимодействия растений с почвой, существует и генотипическая разница в пределах одного вида [23]. Так, например, выявлены два генотипа чайного растения (LJ43 и LY002), которые наделены различной способностью поглощать питательные вещества [40]. Отмечается, что растения в процессе эволюции сформировали различные адаптивные механизмы: сенсоры для определения концентрации азота в почве [35]; систему сигналов между различными органами растений [36]; гормональную регуляцию морфологических и физиологических реакций растений при изменении концентрации нитратов в почвенном растворе [37]. Выявленная для многих культур генотипическая специфика определила развитие направления по созданию генотипов с наиболее эффективным использованием азота почв и удобрений [34].

На сегодняшний день существует ряд альтернативных методов управления азотом в агроэкосистемах: использование органических удобрений, комбинирование органических и неорганических удобрений; использование удобрений с контролируемым высвобождением азота, ингибиторов нитрификации, биоудобрений, гуминовых ве-

ществ. Перспективным приёмом является фертигация – внесение питательных веществ с поливной водой [33]. Органические удобрения, которые являются источником азота и углерода, являются менее эффективными в сравнении с минеральными, а также увеличивают выброс парниковых газов [44]. Более эффективным приёмом является комбинирование органических и неорганических удобрений [47]. Для улучшения азотного режима почв наряду с органическими удобрениями, используют биоудобрения, полученные из веществ, содержащих живые микроорганизмы, которые колонизируют ризосферу растений чтобы помочь увеличить запас или доступность питательных веществ [25]. Так, было установлено, что применение биоудобрения *Trichoderma viride* привело к снижению выщелачивания азота на 45 % по сравнению с применением обычных удобрений [48]. На молодых насаждениях чая (с разомкнутой шпалерой) эффективно использование бобовых растений, которые в симбиозе с бактериями фиксируют атмосферный N_2 [31]. Предложено также создание сортов, способных фиксировать N посредством симбиоза с *Rhizobia* [26], которые могут фиксировать атмосферный азот (N_2) [45] и повышать эффективность его использования. Для управления процессами преобразования NH_4^+ в почве успешно используют ингибиторы нитрификации путём подавления активности бактерий *Nitrosomonas*. Применение гуминовых веществ повышало урожайность чая и доступность азота, увеличивая популяции нитрифицирующих, аммонифицирующих и денитрифицирующих бактерий [38]. Биоуголь увеличил годовой урожай чая, а также разнообразие почвенных микромицетов и бактерий [51]. Также сообщали об увеличении среднегодовых урожаев чая на 17–26 % при применении на чайных плантациях биоугля, полученного из пшеничной соломы [46]. Наконец, в полевом исследовании установили, что применение известкового азотного удобрения значительно снизило выбросы N_2O из почвы по сравнению с обычными удобрениями [50]. В совокупности все эти методы могут сыграть важную роль в снижении доз минеральных азотных удобрений, однако необходимы дополнительные доказательства, прежде чем они найдут широкое применение в удобрении чайных плантаций.

Оптимизация фосфатного питания растений, может быть достигнута путём улучшения эффективности поглощения фосфора и/или через повышение эффективности использования фосфора (способность производить более высокую долю сухого вещества на единицу фосфора) [29]. Этого можно достигнуть путём создания более эффективных сортов (за счёт хорошо развитой корневой системы, через

формирование ассоциаций с микоризой), которые характеризуются высокой урожайностью при низком уровне фосфатов в почве, в том числе за счёт выделения экссудатов, способных осуществлять минерализацию органических источников фосфора [30].

С точки зрения расширения производственных возможностей/площадей возделывания субтропических культур, предъявляющих особенные требования к кислотности почв (на примере чая, требующего кислые и сильно кислые почвы), интересны вопросы химической мелиорации («кислования») малопригодных почв, в частности бурых лесных слабоненасыщенных.

Заключение. Таким образом, в рамках представленной концепции обобщены основные задачи, которые необходимо реализовать с целью достижения указанной цели – устойчивого функционирования почв при многолетнем возделывании чая. Традиционные направления для агроэкосистем чайных плантаций зоны, касающиеся эффективного использования исходного потенциального плодородия почв; регулирования круговорота питательных элементов минеральными удобрениями; охраны почв путём мониторинга её состояния и соблюдения регламентов применения удобрений, требуют продолжения и развития с учётом современных тенденций. В отношении новых направлений, касающихся регулирования круговорота питательных элементов органическими компонентами путём активизации гумификации и азотфиксации, гармонизации микробоценоза и его ферментативной активности, а также генотипической специфики взаимодействия растений с почвой, мобилизации труднодоступных пулов биогенных элементов требуется получение дополнительных экспериментальных доказательств их эффективности.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СНЦ РАН FGRW-2024-0001, № госрегистрации 1022040700970-8-4.1.1;4.1.4.

Список литературы/References

1. Аргунова В.А. Бушин П.М., Притула З.В. Система удобрений молодых листосборных плантаций чая сорта ‘Колхида’: рекомендации. Сочи: ВНИИЦиСК, 1990, 16. [Argunova V.A. Bushin P.M., Pritula Z.V. Fertilizer system for young leafy tea plantations of the Kolchida variety: recommendations. Sochi: VNIICiSK, 1990, 16. (In Rus)].

2. Беседина Т.Д., Козлова Н.В. Методика бонитировочной оценки земель и зонирования территории влажных субтропиков России для культуры чая. Сочи: ФИЦ СНЦ РАН, 2021, 41. [Besedina T.D., Kozlova N.V. Methodology for land assessment and zoning of the territory of the humid subtropics of Russia for tea culture. Sochi: FRC SSC RAS, 2021, 41 (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-42-7.

3. Бушин П.М. Водный режим почв чайных плантаций и обоснование поливного ре-

жима чая во влажных субтропиках РСФСР. Автореф. дис. Краснодар, 1982. [Bushin P.M. Water regime of soils of tea plantations and rationale for the irrigation regime of tea in the humid subtropics of the RSFSR. Author's abstract. dis. Krasnodar, 1982. (In Rus)].
4. Бушин П.М., Беседина Т.Д., Копылов С.С. О критериях бонитировки почв чайных плантаций субтропиков России, Цветочные, субтропические и плодовые культуры на юге России: сб. науч. тр. Сочи: ВНИИЦиСК, 1994; 38 : 128-141. [Bushin P.M., Besedina T.D., Kopylov S.S. On the criteria for grading soils of tea plantations in the subtropics of Russia, Flower, subtropical and fruit crops in the south of Russia: collection. scientific works Sochi: VNIICiSK, 1994; 38 :128-141. (In Rus)].
5. Великий А.В. Влияние корневого применения биогенных элементов (Mg, Ca, B, Zn) на плодородие бурых лесных кислых почв, урожай и качество зелёного чайного листа в условиях влажных субтропиков России. Канд. дис. Сочи, 2022. [Velikiy A.V. The influence of root application of nutrients (Mg, Ca, B, Zn) on the fertility of brown forest acidic soils, the yield and quality of green tea leaves in the humid subtropics of Russia. Cand. dis. Sochi, 2022. (In Rus)].
6. Гвасалия М.В. Микроразмножение и депонирование ценных генотипов чая (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) в культуре *in vitro*, Плодоводство и ягодоводство России. 2016; 47 : 87-93. [Gvasalia M.V. Micropropagation and deposition of valuable genotypes of tea (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) in in vitro culture, Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2016; 47 : 87-93. (In Rus)]. ISSN: 2073-4948.
7. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Дыхательная активность агрогенно-изменённых почв чайных плантаций в постэксплуатационный период, Субтропическое и декоративное садоводство. 2019; 69 : 192-200. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. Respiratory activity of agrogenic soils of tea plantations in the post-exploitation period, Subtropical and ornamental horticulture. 2019 ;69 : 192-200. (In Rus)]. DOI: 10.31360/2225-3068-2019-69-192-200.
8. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Фосфатный статус почв при длительном применении и после отмены минеральных удобрений в чайных агроценозах влажных субтропиков России, Агрохимический вестник. 2023; 5 : 60-67. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. Phosphate status of soils during long-term use and after the abolition of mineral fertilizers in tea agrocenoses in the humid subtropics of Russia, Agrochemical Herald. 2023; 5 : 60-67. (In Rus)]. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-5-011.
9. Козлова Н.В., Малюкова Л.С., Струкова Д.В. и др. Методика оценки бурых лесных кислых почв чайных плантаций Черноморского побережья России по степени агрогенных изменений, Инновационные разработки в области возделывания субтропических и южных плодовых культур [Электронное издание] / ВНИИЦиСК [редсов.: А.В. Рындин (гл. ред.) и др.]. Сочи: ВНИИЦиСК, 2016; 165-189. [Kozlova N.V., Malyukova L.S., Strukova D.V., et al. Methodology for assessing brown forest acidic soils of tea plantations on the Black Sea coast of Russia by the degree of agrogenic changes, Innovative developments in the field of cultivation of subtropical and southern fruit crops [Electronic edition] / VNIICiSK [editor: A.V. Ryndin (chief editor), etc.]. Sochi: VNIICiSK, 2016; 165-189. (In Rus)].
10. Кормилицин В.Ф. Влияние азотсодержащих удобрений на эколого-биохимическую устойчивость агроэкосистем в каштановой зоне Поволжья, Агрохимия. 2006; 11 : 35-44. [Kormilitsin V.F. The influence of nitrogen-containing fertilizers on the ecological and biochemical stability of agroecosystems in the chestnut zone of the Volga region, Agrochemical chemistry. 2006; 11 : 35-44. (In Rus)].
11. Малюкова Л.С. Оптимизация плодородия бурых лесных почв и применения минеральных удобрений при выращивании чая в условиях Черноморского побережья России. Докт. дис. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. [Malyukova L.S. Optimization

of the fertility of brown forest soils and the use of mineral fertilizers in the cultivation of tea in the conditions of the Black Sea coast of Russia. Dr. dis. M.: Moscow State University. M.V. Lomonosov, 2013. (In Rus)].
12. Малюкова Л.С., Рогожина Е.В., Струкова Д.В. Диагностика биофункционального состояния агрогенно-изменённых почв под многолетними насаждениями в зоне влажных субтропиков России. Сочи: ФИЦ СНЦ РАН, 2022, 86. [Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V. Diagnostics of the biofunctional state of agrogenically modified soils under perennial plantations in the zone of humid subtropics of Russia. Sochi: FRC SSC RAS, 2022, 86. (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-45-8.
13. Малюкова Л.С., Великий А.В. Регуляторное действие азота на образование и накопление вторичных метаболитов у разных генотипов *Camellia Sinensis* (L), Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024; 1 : 61-69. [Malyukova L.S., Velikiy A.V. Regulatory effect of nitrogen on the formation and accumulation of secondary metabolites in different genotypes of Camellia Sinensis (L), Bulletin of Moscow University. 17: Soil Science. 2024; 1 : 61-69. (In Rus)]. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-1-61-69.
14. Малюкова Л.С., Козлова Н.В., Притула З.В. Система удобрения плантаций чая в субтропиках России. Сочи: ВНИИЦиСК, 2010, 45. [Malyukova L.S., Kozlova N.V., Pritula Z.V. Fertilizer system for tea plantations in the subtropics of Russia. Sochi: VNIICiSK, 2010, 45. (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-09-0.
15. Малюкова Л.С., Рогожина Е.В., Струкова Д.В. Биологическая активность агрогенно-изменённых почв влажных субтропиков России. Сочи: ФИЦ СНЦ РАН, 2023, 286. [Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V. Biological activity of agrogenically modified soils in the humid subtropics of Russia. Sochi: FRC SSC RAS, 2023, 286. (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-68-7.
16. Малюкова Л.С., Козлова Н.В. Анализ влияния гидрометеорологических условий и минеральных удобрений на урожайность листосборных плантаций чая сорта ‘Колхида’ в условиях субтропиков России, Субтропическое и южное садоводство России. 2010; 43 : 52-63. [Malyukova L.S., Kozlova N.V. Analysis of the influence of hydrometeorological conditions and mineral fertilizers on the yield of leafy plantations of the Colchis tea variety in the subtropical conditions of Russia, Subtropical and southern horticulture of Russia. 2010; 43 : 52-63. (In Rus)].
17. Притула З.В., Белоус О.Г. Методические рекомендации по внекорневой подкормке микроэлементами растений чая для молодых чайных плантаций. Сочи: ВНИИЦиСК, 2003, 14. [Pritula Z.V., Belous O.G. Methodological recommendations for foliar feeding of tea plants with microelements for young tea plantations. Sochi: VNIICiSK, 2003, 14. (In Rus)].
18. Притула З.В., Великий А.В., Малюкова Л.С. Влияние мезо- и микроудобрений на качество чайного сырья в условиях Черноморского побережья России, Плодоводство и ягодоводство России. 2014; 38 : 52-58. [Pritula Z.V., Velikiy A.V., Malyukova L.S. The influence of meso- and microfertilizers on the quality of tea raw materials in the conditions of the Black Sea coast of Russia, Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2014; 38 : 52-58. (In Rus)].
19. Рогожина Е.В. Структурно-функциональное состояние микробного комплекса бурых лесных кислых почв влажно-субтропической зоны России при длительном агрогенном воздействии. Канд. дис. Петропавловск-Камчатский, 2019. [Rogozhina E.V. Structural and functional state of the microbial complex of brown forest acidic soils of the humid subtropical zone of Russia under prolonged agrogenic exposure. Cand. dis. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2019. (In Rus)].
20. Рындин А.В., Беседина Т.Д., Туов М.Т. и др. Инвентаризационный паспорт чай-

ной плантации. Методика и нормативная документация. Сочи: ВНИИЦиСК, 2011, 30. [Ryndin A.V., Besedina T.D., Tuov M.T., et al. Inventory passport of a tea plantation. Methodology and regulatory documentation. Sochi: VNIICiSK, 2011, 30. (In Rus)].
21. Рындин А.В., Малюкова Л.С., Цюпко Т.Г. и др. Особенности элементного состава Краснодарского чая сорта 'Колхида', Новые технологии. 2018; 4 : 224-229. [Ryndin A.V., Malyukova L.S., Tsyupko T.G., et al. Features of the elemental composition of Krasnodar tea of the Colchis variety, New technologies. 2018; 4 : 224-229. (In Rus)].
22.Туов М.Т. Научные основы повышения качества и продуктивности чайных плантаций России: Докт. дис. Сочи, 1997. [Tuov M.T. Scientific basis for improving the quality and productivity of tea plantations in Russia: Doc. dis. Sochi, 1997. (In Rus)].
23. Arenas S., Campo J., Mastretta-Yanes A., Jaramillo-Corre J.P. Within-population genotype – Soil interactions drive phenotypic variation in a recovering fir forest from central Mexico, For. Ecol. Manag. 2021; 494 : 119293. DOI: 10.1016/J.foreco.2021.119293.
24. Boetius A. Global change microbiology – big questions about small life for our future. Nature Reviews, Microbiology. 2019; 17(6) : 331. DOI: 10.1038/s41579- 019-0197-2.
25. Bhattacharjee R., Dey U. Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review, Afr. J. Microbiol. Res. 2014; 8 : 2332-2343.
26. Biswas J., Ladha J., Dazzo F. Rhizobia Inoculation Improves Nutrient Uptake and Growth of Lowland Rice, Soil Sci. Soc. Am. J. 2000; 64 : 1644-1650.
27. Ciais P., Yao Y., Gasser T., et al. Empirical estimates of regional carbon budgets imply reduced global soil heterotrophic respiration, National Science Review. 2021; 8(2). DOI: 10.1093/nsr/nwaa145.
28. Depablos L., Homem B., Ferreira I.M., et al. Nitrogen cycling in tropical grass-legume pastures managed under canopy light interception, Agroecosys. 2021; 121 : 51-67.
29. Gahoonia T.S., Nielsen N.E. Variation in acquisition of soil phosphorus among wheat and barley genotypes, Plant and Soil. 1996; 178 : 223-230.
30. Gerke J. The acquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by the roots. A critical review, J. Plant Nutr. Soil Sci. 2015; 178 : 351-364.
31. Graham P.H., Vance C.P. Legumes: Importance and Constraints to Greater Use, Plant Physiol. 2003; 131 : 872-877.
32. Kozlova N.V., Malyukova L.S. Change in the soils' fertility level of tea agrocenoses in the transition to cultivation without mineral fertilizers in the humidsubtropical zone of Russia, E3S Web of Conferences. 2021, 254. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202125405009.
33. Liu R., Kang Y., Zhang C., et al. Chemical fertilizer pollution control using drip fertigation for conservation of water quality in Danjiangkou Reservoir, Nutr. Cycl. Agroecosystems, 2014; 98 : 295-307.
34. Liu X., Hu B., Chu C. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects, Journal of Genetics and Genomics. 2021. DOI: 10.1016/j.jgg.2021.12.006.
35. Medici A., Krouk G. The primary nitrate response: a multifaceted signalling pathway, J. Exp. Bot. 2014; 65(19). DOI: 10.1093/jxb/eru245.
36. O'Brien J.A., Vega A., Bouguyon E., et al. Nitrate transport, sensing, and responses in plants, Mol. Plant. 2016; 9: DOI: 10.1016/j.molp.2016.05.004.
37. Ohkubo Y., Tanaka M., Tabata R., et al. Shoot-to-root mobile polypeptides involved in systemic regulation of nitrogen acquisition, Nat. Plants. 2017; 3. DOI: 10.1038/nplants.2017.29.
38. Pramanik P., Safique S., Jahan A. Humic substrates facilitated nitrogen uptake in tea bushes by influencing biochemical and microbiological properties in soil of Northeast India, J. Plant Nutr. 2018; 41 : 2376-2385.
39. Ruan L., Cheng H., Ludewig U., et al. Root foraging strategy improves the adaptability of tea plants (*Camellia sinensis* L.) to Soil Potassium Heterogeneity, Int. J. Mol. Sci. 2022; 23 : 8585.
40. Ruan L., Wang L.Y., Wei K., et al. Comparative analysis of nitrogen spatial heterogene-

ity responses in low nitrogen susceptible and tolerant tea plants (*Camellia sinensis*), Sci. Hortic. 2019; 246 : 182-189.
41. Ryndin A.V., Belous O.G., Abilfazova Yu.S., Pritula Z.V. The regulation of the functional state of subtropical crops with micronutrients, Potravinarstvo. 2017; 11(1) : 175-182.
42. Samarina L., Fedorina J., Malyukova L., et al. Analysis of Functional Single-Nucleotide Polymorphisms (SNPs) and Leaf Quality in Tea Collection under Nitrogen-Deficient Conditions, Int. J. Mol. Sci. 2023; 24 : 14538. DOI: 10.3390/ijms241914538.
43. Semchenko M., Xue P., Leigh T. Functional diversity and identity of plant genotypes regulate rhizodeposition and soil microbial activity, New Phytol. 2021; 232 : 776-787.
44. Singh R.P. Organic Fertilizers: Types, Production and Environmental Impact, Nova Science Publishers: Hauppauge, NY, USA, 2012.
45. Urquiaga S., Cruz K.H.S., Boddey R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: Nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates, Soil Sci. Soc. Am. J. 1992; 56 : 105-114.
46. Wu Y., Li Y., Wang H., et al. Response of N_2O emissions to biochar amendment on a tea field soil in subtropical central China: A three-year field experiment, Agric. Ecosyst. Environ. 2021; 318 : 107473.
47. Xie S., Feng H., Yang, et al. Does dual reduction in chemical fertilizer and pesticides improve nutrient loss and tea yield and quality? A pilot study in a green tea garden in Shaoxing, Zhejiang Province, China, Environ. Sci. Pollut. Res. 2019; 26 : 2464-2476.
48. Xu S., Zhou S., Ma S., et al. Manipulation of nitrogen leaching from tea field soil using a *Trichoderma viride* biofertilizer, Environ. Sci. Pollut. Res. 2017; 24 : 27833-27842.
49. Xu C., Xu X., Ju C., et al. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide, Global Change Biol. 2021; 27(6) : 1170-1180. DOI: 10.1111/gcb.1548.
50. Yamamoto A., Akiyama H., Naokawa T., et al. Lime-nitrogen application affects nitrification, denitrification, and N_2O emission in an acidic tea soil, Biol. Fertil. Soils. 2014; 50 : 53-62.
51. Yang W., Li C., Wang S., et al. Influence of biochar and biochar-based fertilizer on yield, quality of tea and microbial community in an acid tea orchard soil, Appl. Soil Ecol. 2021; 166 : 104005.
52. Yanni Y.G., Rizk R.Y., Corich V., et al. Natural endophytic association between *Rhizobium leguminosarum bv. trifolii* and rice roots and assessment of its potential to promote rice growth, Plant Soil. 1997; 194 : 99-114.

CONCEPTUAL PROVISIONS FOR OPTIMIZING THE SOILS AGROBIOECOLOGICAL STATUS WITHIN LONG-TERM TEA CULTIVATION

Malyukova L.S.

Federal Research Centre
the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Sochi, Russia, e-mail: malukovals@mail.ru

The development of conceptual provisions for optimizing the agrobioecological status of soils under tea plantations in the humid subtropical zone of Russia was based on the long-term scientific results in the field of studying the effectiveness of certain macro- and micro-fertilizers (their effects on yield, product quality, soil condition), as well as on the scientific experience from other tea-producing regions throughout the world. Within the framework of the proposed concept, general directions and generalized tools for their implementation are defined,

which represent the tasks necessary to achieve the set goal – optimization of the soils agrobioecological state within long-term tea cultivation. The main blocks of the concept are the following: effective use of the initial potential soil fertility; regulation of the nutrient cycle by both mineral (optimization of the mineral nutrient pools size; fixation of mobile or mobilization of hard-to-reach biogenic elements) and organic (maintenance of biogenic element pools in organic matter; activation of humification and provision of soil carbon sequestration; maximization of nitrogen fixation) components; protection of soils by monitoring their condition and compliance with fertilizers application regulations; new knowledge by concentrating scientific research on the most promising areas (genotypic specificity of plant-soil interaction, mobilization of hard-to-reach pools of biogenic elements, alternative types of fertilizers). This approach combines a modern and ecosystem model of nutrient management in agricultural systems, which are the theoretical foundation for their sustainable functioning. The implementation of this concept will ensure the sustainable functioning of agrogenically modified soils and the most effective use of their resource potential within tea crop cultivation in Russia.

Key words: tea crop, agrogenically-modified soils, concept, agrobioecological status of soils, mineral fertilizers.