

**Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений /
Agricultural Chemistry, Soil Science,
Plant Protection and Quarantine**

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819)EDN: [LVJHXT](https://www.edn.ru/LVJHXT)

УДК 631.8:633.72 (631.415.2+631.415.8)



**Влияние кислотно-основных свойств бурой лесной
кислой почвы на урожайность зеленого чайного листа
(*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) сорта Колхида
в условиях субтропиков России**

А.В. Великий

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Чай – напиток, объединяющий миллиарды людей. Его мировое производство и потребление продолжает увеличиваться, несмотря на строгие ограничения к условиям к окружающей среды: специфический климат, уровень кислотности почвы и её минеральный состав. Благодаря своей высокой экономической ценности, площадь чайных плантаций в отдельных странах мира быстро расширяется. Установлено, что оптимальный диапазон pH почвы для выращивания растений чая составляет 4,5–6,0.

Однако выращивание чайных растений зачастую сопряжено с дополнительным подкислением почвенного покрова, что является нарастающей проблемой для таких стран, как Япония, Шри-Ланка, Руанда и Китай. С целью увеличения объемов производства чая в сельскохозяйственных угодьях часто применяют большое количество аммиачно-азотных удобрений, что способствует усилению кислотности почвы, особенно в условиях влажного климата. В контексте почвоведения, экологии и агрономии, закисление почвенного покрова представляет собой серьезную проблему для отрасли чаеводства в мировом масштабе.

Впервые в субтропической зоне России были изучены вопросы закисления почв чайных плантаций, в частности определение нижнего предела актуальной кислотности ($pH_{\text{КСЛ}}$), являющегося оптимальным для нормального роста и разви-

тия растений чайных растений, а также выявлены закономерности между другими кислотно-основными свойствами почв и урожайностью зеленого чайного листа. Это позволит быстрее оценивать уровень чаепригодности земель, а также приведет к оптимизации минерального питания чайных плантаций.

Цель исследования. Определение закономерностей между кислотно-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) в условиях субтропиков РФ.

Материалы и методы. Исследования были проведены в зоне Черноморского побережья Краснодарского края на чайной плантации сорта Колхида. Опыт включает 7 вариантов: контрольный и 6 вариантов с микроэлементами. С целью оценки влияния кислотно-основных свойств на урожайность чайного листа проводились отборы почвенных проб на глубину 0–20 см в осенний период. Лабораторные исследования выполнены по общепринятым методикам: pH_{KCl} – потенциометрически (ионометр pH-121, Россия); алюминий по Соколову; содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} – трилонометрически.

Результаты. Установлено, что снижение уровня кислотности почвы pH_{KCl} с 2,8 до 3,8 ед. приводит к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз с 1400 кг/га до 11498 кг/га. В свою очередь увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г напротив приводит к снижению урожайности чая в 3,5 раза. При повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза, а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – в 2,1 раза. В ходе детального изучения была получена модель кислотно-основных параметров почвы, что отражает в себе связи актуальной кислотности с другими почвенными характеристиками, в которой отображен механизм получения высоких урожаев чайного листа. Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $Ca^{2+}+Mg^{2+}/pH_{KCl}$ и Ca^{2+}/Mg^{2+} при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Заключение. Полученные результаты показывают сложную взаимосвязь между кислотно-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа.

Ключевые слова: кислотность; урожайность; зеленый чайный лист; алюминий; кальций; магний

Для цитирования. Великий, А. В. (2026). Влияние кислотно-основных свойств бурой лесной кислой почвы на урожайность зеленого чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) сорта Колхида в условиях субтропиков России. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 254–276. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819>

The effect of acid-base properties of brown forest acid soil on the yield of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) of the Colchis variety in the subtropical conditions of the Russian Federation

A.V. Velikii

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russian Federation

Abstract

Background. Tea is a drink that unites billions of people. Its global production and consumption continues to increase, despite strict restrictions on environmental conditions: the specific climate, the level of soil acidity and its mineral composition. Due to its high economic value, the area of tea plantations in some countries of the world is rapidly expanding. It has been established that the optimal pH range of the soil for growing tea plants is 4,5–6,0.

However, the cultivation of tea plants is often associated with additional acidification of the soil cover, which is an increasing problem for countries such as Japan, Sri Lanka, Rwanda and China. In order to increase tea production in agricultural lands, large amounts of ammonia-nitrogen fertilizers are often used, which helps to increase soil acidity, especially in humid climates. In the context of soil science, ecology and agronomy, acidification of the soil cover is a serious problem for the tea industry on a global scale.

For the first time in the subtropical zone of Russia, the issues of acidification of tea plantation soils were studied, in particular, the determination of the lower limit of actual acidity (pH_{KCl}), which is optimal for the normal growth and development of tea plants, and patterns between other acid-base properties of soils and the yield of green tea leaves were identified. This will make it possible to quickly assess the level of tea suitability of the lands, and will also lead to the optimization of the mineral nutrition of tea plantations.

Purpose. Determination of the patterns between the acid-base properties of brown forest acidic soil and the yield of tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) in the subtropical conditions of the Russian Federation.

Materials and methods. The research was conducted in the area of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory on a Colchis tea plantation. The experience includes 7 options: control and 6 options with trace elements. In order to assess the effect of acid-base properties on the yield of tea leaves, soil samples were taken to a depth of 0-20 cm in the autumn period. Laboratory studies were performed according to generally accepted methods: pH_{KCl} – potentiometrically (ionometer pH-121, Russia); aluminum according to Sokolov; the content of exchange forms of Ca^{2+} and Mg^{2+} – trilometrically.

Results. It was found that a decrease in pH_{KCl} soil acidity from 2,8 to 3,8 units leads to a 6-8-fold increase in tea leaf yield from 1400 kg/ha to 11498 kg/ha. In turn, an increase in the level of Al^{3+} in the soil from 7,5 to 14,2 mmol(eq)/100g, on the contrary, leads to a 3,5-fold decrease in tea yield. With an increase in the level of Ca^{2+} in the soil from 1,0 to 5,0 mmol (eq)/100g, there was a tendency for yield growth by 3-4 times, and with an increase in the level of Mg^{2+} in the soil from 1,0 to 7,0 mmol(eq)/100g – by 2,1 times. In the course of a detailed study, a model of acid-base soil parameters was obtained, which reflects the relationship of current acidity with other soil characteristics, which reflects the mechanism of obtaining high yields of tea leaves. The importance of such parameters as $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{KCl}}$ and $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ at the level of 1,44 and 1,36, respectively, in obtaining high tea yields of about 4200 kg/ha was established, and it was also revealed that at their level of 1,54–2.15 and 1,33–1,63, respectively, the increase in tea yield can range from 1980 to 4120 kg/ha.

Conclusion. The results obtained show a complex relationship between the acid-base properties of acidic brown forest soil and the yield of tea leaves.

Keywords: acidity; yield; green tea leaves; aluminum; calcium; magnesium

For citation. Velikii, A. V. (2026). The effect of acid-base properties of brown forest acid soil on the yield of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) of the Colchis variety in the subtropical conditions of the Russian Federation. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 254-276. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1819>

Введение

Почва является основным элементом сельскохозяйственного производства для обеспечения человечества продуктами питания [12; 20]. В агрохимии и почвоведении одним из важнейших показателей для оценки продуктивной способности почвы является pH почвы [11; 28], оказывающий непосредственное воздействие на развитие растений [11]. Обширные территории, приблизительно 3,9 миллиарда гектаров, характеризуются как кислые почвы, составляя 30% от общей площади суши [35]. При этом повышенная кислотность почвы негативно влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур, так как приводит к повышенным концентрациям токсичного алюминия (Al^{3+}) и марганца (Mn), и к снижению необходимых для растений кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}) и калия (K^{+}) [18].

Использование удобрений для повышения содержания питательных веществ, повысило урожайность сельскохозяйственных культур во всем мире, однако нерациональное управление системами минерального питания привело к значительному подкислению почвы, что негативно сказалось на урожайности, особенно в Китае [16; 43]. На сегодняшний день по

оценкам ученых в результате не правильного применения минеральных удобрений около половины пахотных земель в мире перешли в категорию кислых с $\text{pH} \leq 6,5$ [14]. Снижение pH почвы приводит к недоступности важных для растений элементов, таких как фосфор, калий, кальций и магний, изменяет структуру и функции почвенных микроорганизмов [13; 17], при этом увеличивает доступность токсичных тяжелых металлов (например, кадмия и свинца) и других вредных элементов (например, алюминия и марганца), особенно при уровнях pH ниже 4,5 [31; 38].

В агросистемах с интенсивным земледелием подкисление почв в основном провоцируется не только избыточным внесением удобрений, в особенности азотных [32; 41], но также является результатом удаления продуктов и вымывания N, P, K и Mg из корневой зоны растений [15; 40].

Чай – напиток, объединяющий миллиарды людей. Его мировое производство и потребление продолжает увеличиваться, несмотря на строгие ограничения к условиям к окружающей среды: специфический климат, уровень кислотности почвы и её минеральный состав [2-4; 8; 24; 27; 34]. Благодаря своей высокой экономической ценности, площадь чайных плантаций в отдельных странах мира быстро расширяется [30]. Установлено, что оптимальный диапазон pH почвы для выращивания растений чая составляет 4,5–6,0 [33]. Рост чайных растений постепенно снижается, когда pH почвы превышает 6,5, и они погибают, когда pH превышает 7,0 [29]. При pH ниже 4,0 рост чайных растений также замедляется, что влияет как на качество чайного сырья, так и на его урожайность [29]. При этом в Китае, самом главном производителе чая, средний показатель pH почвы на чайных плантациях составлял 4,68 по всей стране, а диапазон его варьирования был от 3,96 до 5,48 в разных провинциях [39].

Выращивание чайных растений зачастую сопряжено с дополнительным подкислением почвенного покрова, что является нарастающей проблемой для таких стран, как Япония [23], Шри-Ланка, Руанда [22] и Китай [10; 19].

С целью увеличения объемов производства чая в сельскохозяйственных угодьях часто применяют большое количество аммиачно-азотных удобрений [26]. Кроме того, чайные кусты обладают высокой способностью к активному поглощению алюминия (Al) из грунта, концентрируя значительную его часть в листьях [25]. Этот процесс биогеохимической циркуляции Al в системе «чай-почва» способствует усилению кислотности почвы, особенно в условиях влажного климата [37]. В контексте почвоведения, экологии и агрономии, закисление почвенного покрова представляет собой серьезную проблему для отрасли чаеводства в мировом масштабе.

В современном мире для стабильного и устойчивого развития сельскохозяйственного хозяйства и решения задач в рамках продовольственной безопасности в условиях роста населения на планете и возрастания потребностей в пище крайне важно предпринимать меры по снижению кислотности почв [42].

Основным регионом культивирования чая (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) в Российской Федерации является влажная субтропическая зона Черноморского побережья Краснодарского края [2; 3; 8]. Однако в последние годы отмечается ухудшение состояния земель занятых чайными плантациями [3; 7], в частности вызванное сильным подкислением этих почв. Несмотря на то, что чайные растения являются ацидофильными нижний предел актуальной кислотности, являющийся оптимальным для нормального роста и развития растений не установлен. Установление этого параметра, а также выявление закономерностей между другими кислотнo-основными свойствами почв на чайных плантациях поможет более четко определить влияние этих параметров на урожайность зеленого чайного листа. В итоге это позволит быстрее проверять уровень чаепригодности земель, а также приведет к оптимизации минерального питания чайных плантаций.

Целью исследования было определение закономерностей между кислотнo-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)) в условиях субтропиков РФ.

Материалы и методики исследования

Исследования были проведены на Черноморском побережье Краснодарского края на многолетнем опытном участке, который является частью производственной плантации ЗАО «Дагомысчай» (Краснодарский край, г. Сочи, Лазаревский район, поселок Уч-Дере, 43°69'N, 39°64'E) и 1983 году был засажен интенсивным районированным сортом Колхида. Климат региона - влажный субтропический со среднегодовой температурой в пределах 12,8–16,5 °C, годовое количество осадков 1313–2098 мм. В опыте почвы относились к категории бурых лесных кислых окультуренных почв [5; 36].

Изучение микроэлементов в рамках действующего опыта было начато в 2003 году. Опыт включает 7 вариантов: контрольный и 6 вариантов с микроэлементами, которые вносились в почву в виде чистых солей. Вариант смесь – это совместное внесение сульфата цинка, сульфата магния и борной кислоты, в дозах каждого из вариантов. Схема опыта (в кг д. в. / га): 1) контроль – N240P70K90; 2) сульфат магния (MgSO₄) – Mg60; 3) кристаллическая сера (S1000), оба эти варианта с 2015 года изучаются в

последствиями; 4) сульфат цинка (ZnSO_4) – $\text{Zn}_{4,3}$, с 2017 года изучается в последствии в связи с увеличением подвижного цинка в почве в 2–4 раза; 5) борная кислота (H_3BO_3) – B_6 ; 6) смесь $\text{Zn} + \text{B} + \text{Mg}$ (4,3; 6; 60, соответственно); 7) кальцийсодержащий природный материал (40–50 % CaO) вносится в количестве 250 кг/га [3]. Площадь чайных делянок – 10 м^2 , повторность трехкратная. Каждый год эти вещества вносили на едином фоне $\text{N}_{240}\text{P}_{70}\text{K}_{90}$ кг д. в. / га в весенний период с заделкой в верхний слой почвы. Дозы мезо- (Mg , Ca) и микроэлементов (Zn , B) подобраны с учетом результатов, полученных в полевых опытах в условиях Западной Грузии [4; 9]. Исследования проводились на выровненном агрофоне, содержание подвижных форм фосфора и калия согласно грациям обеспеченности почв находилось на высоком уровне. С 2022 г. на всех вариантах изучается эффект последствия от вносимых ранее микроэлементов.

С целью оценки влияния кислотно-основных свойств на урожайность чайного листа проводились отборы почвенных проб на глубину 0–20 см в осенний период. Лабораторные исследования выполнены по общепринятым методикам [1]: pH_{KCl} – потенциметрически (ионметр pH -121, Россия); алюминий по Соколову; содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} – трилонометрически. Обобщение данных, полученных в период 2010–2023 гг., проведено с помощью Microsoft Excel и методов статистической обработки в программе Statistica 10.

Результаты исследования и обсуждение

Кислотно-основное состояние почв является определяющим показателем её чаепригодности и уровня плодородия применительно к ацидофильной культуре чая [4; 7], поэтому при подборе системы минерального питания важен контроль комплекса этих показателей. Исследования показали, что через 7 лет применения макроудобрений (с 2003 по 2010 гг.), а также макроудобрений в различных сочетаниях с микроэлементами отмечалось существенное подкисление почв на 0,5–1,0 ед. в сравнении с её исходными значениями (pH_{KCl} 3,75±0,14 до закладки опыта) [3], что привело к изучению взаимосвязей кислотно-основных свойств почв и урожайности чайного листа.

В результате исследований было установлено, что наиболее значимыми показателями кислотно-основных свойств бурых лесных почв являются: актуальная кислотность (pH_{KCl}), подвижный алюминий Al^{3+} , сумма поглощенных оснований $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, так как они отражают уровень её плодородия и являются основой критерия чаепригодности почв [3]. В ходе многолетних исследований (2011–2023) эффективности внесения биоген-

ных элементов (S, Mg, Ca, B, Zn) на чайной плантации проводился постоянный мониторинг этих показателей, что позволило собрать достаточный объём данных для анализа влияния каждого из представленных параметров почвы на урожайность чайного листа, и установления суммарных закономерностей взаимодействия всех показателей (рис. 1–3, табл. 1–2.).

Растения чая относятся к ацидофилам, растениям, произрастающим исключительно на почвах с низкими значениями кислотности, однако и у них имеются как оптимальные, так и неблагоприятные, а порой и экстремальные условия для произрастания. В ходе анализа влияния кислотности почвы на урожайность зеленого чайного листа была установлена обратная зависимость между изучаемыми параметрами (рис. 1а). Так при снижении уровня кислотности почвы с 2,8 до 3,8 ед. отмечена явная тенденция к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз (рис. 1а).

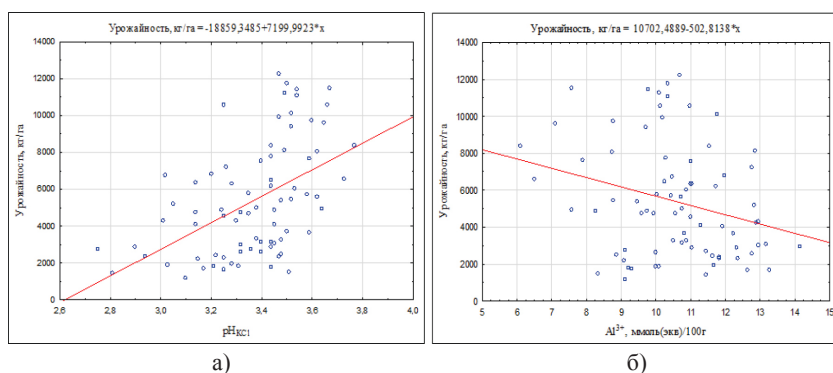


Рис. 1. Урожайность чайного листа в зависимости от уровня pH_{KCl} (а) и подвижного алюминия Al^{3+} (б) в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 1. Tea leaf yield as a function of pH_{KCl} (a) and available aluminum (Al^{3+}) (b) in brown forest acidic soil during 2012–2023.

В почвах чайных плантаций содержится повышенное количество подвижного алюминия, что является вторым фактором определяющим уровень её чаепригодности. Однако дополнительное подкисление почвы приводит к росту содержания ионов алюминия, что может быть причиной снижения урожая чайного листа. В ходе анализа многолетних данных была установлена обратная зависимость между содержанием подвижного алюминия Al^{3+} в почве и урожайностью чайного листа. Увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г приводит к резкому снижению урожайности чая в 3,5 раза (рис. 1б).

Изучение актуальной кислотности (pH_{KCl}) и подвижного алюминия Al^{3+} в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные о кислотных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 1).

Для показателя pH_{KCl} было выделено 5 групп с шагом 0,2 ед. от 2,8 до 3,8 ед. (табл. 1). Минимальная урожайность, а также минимальный диапазон и прибавка чайного листа получена в 1ой группе при уровне pH_{KCl} от 2,8 до 3,0 ед., максимальная урожайность получена в 5ой группе при уровне pH_{KCl} от 3,6 до 3,8 ед., прибавка средней урожайности между ними составила 5996 кг/га (табл. 1). В целом в каждой следующей группе прослеживается четкая тенденция роста урожайности чайного листа по сравнению с показателями предыдущей группы. Стоит отметить, что в группах 3–5 при уровне pH_{KCl} от 3,2 до 3,8 ед. для отдельных вариантов максимальная урожайность составила более 10000 кг/га, а для 5 группы минимальная урожайность составила 4926 кг/га (табл. 1). Полученные результаты в целом показывают, что почвы с кислотность ниже 3,0 ед. малопригодны для выращивания чая из-за получения не высоких урожаев чайного листа.

Таблица 1.

Урожайность чайного листа в зависимости от уровней pH_{KCl} и подвижного алюминия Al^{3+} в бурой лесной кислой почве

Table 1. Tea Leaf Yield as a Function of pH_{KCl} Levels and Available Aluminum (Al^{3+}) in Brown Forest Acidic Soil

Показатели урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя				
pH _{KCl} , ед					
уровень pH _{KCl}	2,8-3,0	3,0-3,2	3,2-3,4	3,4-3,6	3,6-3,8
средняя+станд. откл.	2324±657	3826±1999	4202±2258	6183±3314	8320±2258
прибавка	-	1502	377	1980	2137
диапазон	14,00-28,72	11,75-67,18	1638-10577	1487-12238	4926-11498
медиана	2512	4177	4250	5682	8393
Al ³⁺ , ммоль(экв)/100г					
уровень Al ³	6,0-9,0	9,0-12,0	12,0-15,0	-	-
средняя+станд. откл.	6442±2848	5543±3274	3780±1929	-	-
прибавка	-	-899	-1763	-	-
диапазон	1487-11498	1175-12238	1631-8136	-	-
медиана	5987	4982	3060	-	-

Для подвижного алюминия Al^{3+} в ходе анализа было выделено 3 группы с шагом 3,0 ммоль(экв)/100г от 6,0 до 15,0 (табл. 1). Максимальная урожайность чайного листа получена в 1ой группе при содержании подвижного алюминия Al^{3+} от 6,0 до 9,0 ммоль(экв)/100г, минимальная урожайность получена в 3ой группе при содержании подвижного алюминия Al^{3+} от 9,0 до 12,0 ммоль(экв)/100г, снижение урожайности между ними составило -2662 кг/га (табл. 1).

Основные свойства в бурой лесной кислой почве в первую очередь выполняют поглощенные её основания (Ca^{2+} , Mg^{2+}), как сами по себе (рис. 2а и 2б), так и их общая сумма ($Ca^{2+}+Mg^{2+}$) (рис. 3). В ходе анализа была установлена прямая зависимость между содержанием Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве и урожайностью чайного листа. Так при повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза (рис. 2а), а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – 2,1 раза (рис. 2б).

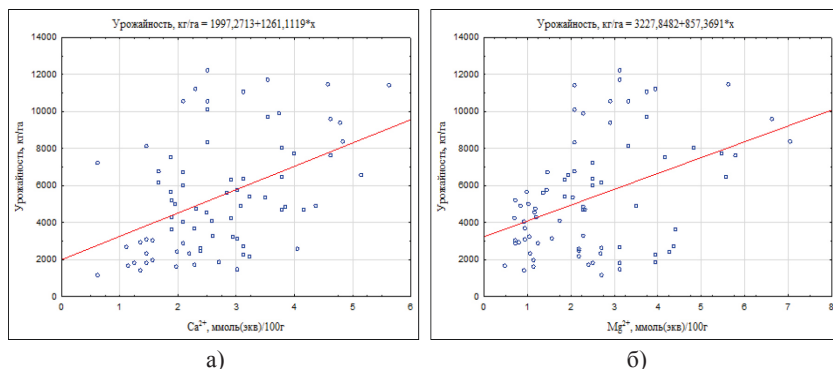


Рис. 2. Урожайность чайного листа в зависимости от уровня Ca^{2+} (а) и Mg^{2+} (б) в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 2. Tea leaf yield as a function of Ca^{2+} (a) and Mg^{2+} (b) levels in brown forest acidic soil during 2012–2023.

Однако практически поглощенные основания всегда рассматриваются в виде общей суммы $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, что обусловлено простотой анализа, а также тем фактом, что в течение долгого времени эти биогенные элементы не считались необходимыми для чайного растения ввиду его ацидофильности, что привело к их существенному выщелачиванию из почвенного профиля [5; 21]. Тем не менее, анализ урожайности и суммы оснований показал наличие между ними прямой связи. Так при повышении суммы

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве с 2,0 до 12,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 4,0 раза (рис. 3).

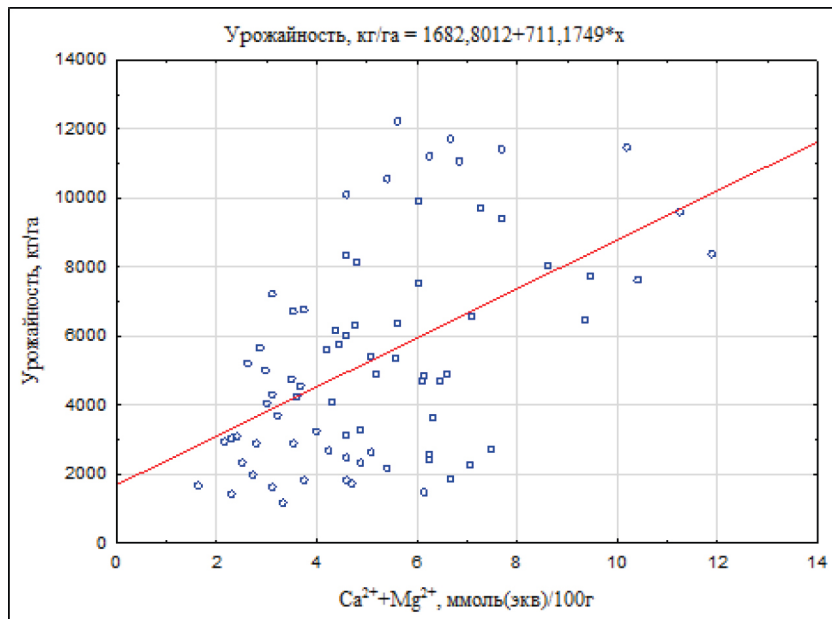


Рис. 3. Урожайность чайного листа в зависимости от суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в бурой лесной кислой почве в 2012–2023 гг.

Fig. 3. Tea leaf yield as a function of the sum of $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ in brown forest acidic soil during 2012–2023.

Изучение поглощенных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные об основных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 2). Для показателей Ca^{2+} , Mg^{2+} было выделено 3 группы с шагом 2 от 0 до 6 ммоль(экв)/100г (табл. 2). Для обоих параметров минимальная урожайность, а также минимальный диапазон и прибавка чайного листа получена в 1ой группе, максимальная урожайность получена в 3ой группе, а прибавка средней урожайности между 3 и 1 группой составила 3862 кг/га для Ca^{2+} и 2851 кг/га для Mg^{2+} (табл. 2). Можно отметить и тот факт, что в группах 1–2 средняя урожайность чайного листа в зависимости содержания Mg^{2+} в почве несколько выше, чем от содержания Ca^{2+} .

Таблица 2.

**Урожайность в зависимости от уровней Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
в бурой лесной кислой почве**

Table 2. Yield as a Function of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ Concentrations
in Brown Forest Acidic Soil

Показатели урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя		
Ca ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень pH _{KCl} , ед	0-2,0	2,0-4,0	4,0-6,0
средняя + станд. откл.	3812±2200	5688±3132	7674±2974
прибавка	-	1876	1986
диапазон	1175-7554	1487-12238	2584-11433
медиана	3020	4862	8014
Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень Al ³⁺ , ммоль(экв)/100г	0-2,0	2,0-4,0	4,0-8,0
средняя + станд. откл.	4035±1530	5998±3660	6886±2858
прибавка	-	1963	888
диапазон	1400-6718	1175-12238	2422-11498
медиана	4076	5366	7635
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100г			
уровень Ca ²⁺ +Mg ²⁺ , ммоль(эк-в)/100г	0-4	4-8	8-14
средняя + станд. откл.	3690±1741	5846±3316	8482±1627
прибавка	-	2156	2636
диапазон	1175-7214	1487-12238	6459-11498
медиана	3261	5366	8035
отношение Ca ²⁺ +Mg ²⁺ /pH _{KCl}	0,93	1,67	2,82
отношение Ca ²⁺ /Mg ²⁺	1,80	1,27	0,74

Для показателя $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ также было выделено 3 группы с шагом 4 от 0 до 14 ммоль(экв)/100г (табл. 1). Изучение суммы поглощенных оснований показало наличие тех же закономерностей, что и при изучении каждого катиона в отдельности. Прибавка средней урожайности между 3 и 1 группой составила 4792 кг/га. Также был проведен сравнительный анализ, который позволил выявить соотношение поглощенных катионов друг к другу, а также суммы оснований к кислотности почвы и сопоставить их с урожайностью чайного листа. Так при отношении $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}=0,93$ и отношении $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}=1,80$ была получена низкая урожайность чайного листа в пределах 3690 кг/га. Оптимальными будут считаться отношение $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}=1,67$ и отношение $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}=1,27$, при которых средняя

урожайность составит порядка 5846 кг/га, а в благоприятные по метеорологическим условиям годы 12238 кг/га.

Изучение актуальной кислотности (pH_{KCl}) и подвижного алюминия Al^{3+} , поглощенных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$) в почве чайной плантации позволило сгруппировать данные о кислотно-основных свойствах почвы по уровням и выделить ряд закономерностей при формировании урожайности чайного листа (табл. 3). Так как большинство кислотно-основных параметров имеют высокую вариабельность, то группировка данных проводилась по показателю pH_{KCl} , в котором ранее было выделено 5 групп с шагом 0,2 ед. от 2,8 до 3,8 ед. (табл. 3). В результате группировки была получена модель кислотно-основных параметров как механизм обеспечения урожайности чайного листа в бурой лесной кислой почве. Анализ модели показал, что все отмеченные ранее закономерности не только сохраняются, но и связаны друг с другом. Так при снижении актуальной кислотности (pH_{KCl}) отмечено снижение содержания алюминия (Al^{3+}) в почве и повышение суммы катионов кальция и магния ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$), что совместно отразилось и на повышении урожайности чайного листа.

Таблица 3.

Модель кислотно-основных параметров как механизм обеспечения урожайности чайного листа в бурой лесной кислой почве

Table 3. A Model of Acid-Base Parameters as a Mechanism for Ensuring Tea Leaf Yield in Brown Forest Acidic Soil

Параметры урожайности, кг/га	Уровень оценочного показателя				
	pH_{KCl} , ед				
уровень pH_{KCl}	2,8-3,0	3,0-3,2	3,2-3,4	3,4-3,6	3,6-3,8
уровень Al^{3+} , ммоль(экв)/100г	11,44-12,35	9,10-12,96	9,13-13,26	7,89-13,17	6,10-10,74
среднее Al^{3+} , ммоль(экв)/100г	11,89±0,51	11,01±1,43	11,20±1,41	10,55±1,34	8,14±1,58
уровень $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, ммоль(экв)/100г	2,28-4,87	1,62-6,65	2,16-7,49	2,28-10,4	4,2-11,87
среднее $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, ммоль(экв)/100г	3,55±1,21	3,97±1,53	4,72±1,58	5,36±2,01	7,90±2,76
уровень $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{pH}_{\text{KCl}}$	1,24	1,28	1,44	1,54	2,15
уровень $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	1,38	1,5	1,36	1,33	1,63
средняя урожайность, кг/га	2324±657	3826±1999	4202±2258	6183±3314	8320±2258

прибавка урожайности, кг/га	-1878	-376	-	1981	4118
диапазон урожайности, кг/га	1400-2872	1175-6718	1638-10577	1487-12238	4926-11498
медианная урожайность, кг/га	2512	4177	4250	5682	8393

Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{ккл}}$ и $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Заключение

Полученные результаты показывают сложную взаимосвязь между кислотнo-основными свойствами бурой лесной кислой почвы и урожайностью чайного листа. Установлено, что наиболее значимыми показателями кислотных свойств бурых лесных почв являются: актуальная кислотность ($\text{pH}_{\text{ккл}}$) и подвижный алюминий Al^{3+} . Так отмечено, что снижение уровня кислотности почвы $\text{pH}_{\text{ккл}}$ с 2,8 до 3,8 ед. приводит к росту урожайности чайного листа в 6–8 раз с 1400 кг/га до 11498 кг/га. В свою очередь увеличение уровня Al^{3+} в почве с 7,5 до 14,2 ммоль(экв)/100г напротив приводит к резкому снижению урожайности чая в 3,5 раза. Основные свойства в бурой лесной кислой почве в первую очередь выполняют поглощенные её основания (Ca^{2+} , Mg^{2+}), а также их сумма ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). В ходе анализа было установлено, что при повышении уровня содержания Ca^{2+} в почве с 1,0 до 5,0 ммоль(экв)/100г отмечена тенденция роста урожайности в 3–4 раза, а при повышении уровня содержания Mg^{2+} в почве с 1,0 до 7,0 ммоль(экв)/100г – 2,1 раза. Для каждого параметра бала проведена группировка по уровням, которая продемонстрировала наглядный рост или снижение урожайности при изменении параметров. В ходе детального изучения была получена модель кислотнo-основных параметров почвы, что отражает в себе связи актуальной кислотности с другими почвенными характеристиками, в которой отображен механизм получения высоких урожаев чайного листа. Установлено значение в получении высоких урожаев чая около 4200 кг/га таких параметров как $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{pH}_{\text{ккл}}$ и $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ при уровне 1,44 и 1,36 соответственно, а также выявлено, что при их уровне 1,54–2,15 и 1,33–1,63 соответственно прибавка урожая чая может составить от 1980 до 4120 кг/га.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ ШЦ РАН FGRW-2024-0001, № государственной регистрации 124022000098-6.

Список литературы

1. Агрохимические методы исследования почв. (1975). В А. В. Соколов (Отв. ред.), *Агрохимические методы исследования почв*. Москва: Наука. 759 с.
2. Белоус, О. Г. (2006). *Микроэлементы на чайных плантациях субтропиков России*. Краснодар: КГАУ. 164 с.
3. Великий, А. В. (2022). *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* (Диссертация на соискание степени кандидата сельскохозяйственных наук). Краснодар. 219 с.
4. Дараселия, М. К., Воронцов, В. В., Гвасалия, В. П., & Цанава, В. П. (1989). *Культура чая в СССР*. Тбилиси: Мецниереба. 558 с. ISBN 5-520-00355-6.
5. Классификация и диагностика почв СССР. (1977). В В. В. Егоров, В. М. Фридланд, Е. И. Иванова и др. (Авт.-сост.), *Классификация и диагностика почв СССР*. Москва: Колос. 223 с.
6. Малюкова, Л. С., Притула, З. В., Козлова, Н. В., Великий, А. В., Керимзаде, В. В., & Самарина, Л. С. (2016). О формировании устойчивости у растений чая (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) при недостаточном водообеспечении на фоне корневого внесения кальция в виде природного удобрения. *Сельскохозяйственная биология*, 51(5), 673–679. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.673eng>. EDN: <https://elibrary.ru/WZJQIT>
7. Малюкова, Л. С., Притула, З. В., Козлова, Н. В., & Великий, А. В. (2020). Влияние кальцийсодержащего природного материала на состояние бурых лесных кислых почв и растений чая (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) в субтропиках России. *Агрохимия*, (12), 3–10. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120054>. EDN: <https://elibrary.ru/JQYEKP>
8. Рындин, А. В. (2016). *Агроэкологические аспекты садоводства влажных субтропиков России*. Сочи. 260 с. EDN: <https://elibrary.ru/YQQIFF>
9. Шавишвили, Л. М. (1973). *Влияние магния и микроэлементов B, Zn, Co и Mo на некоторые физиолого-биохимические процессы чайного растения* (Автореферат диссертации на соискание степени кандидата наук). Тбилиси. 26 с.
10. Alekseeva, T., Alekseev, A., Xu, R. K., Zhao, A. Z., & Kalinin, P. (2011). Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of

- Alfisols in eastern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(2), 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9327-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OIAZQV>
11. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Elements of the nature and properties of soils* (13th ed.). Upper Saddle River. pp. 662–710.
 12. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality — A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. EDN: <https://elibrary.ru/YEFIST>
 13. Chen, D., Lan, Z., Bai, X., Grace, J. B., & Bai, Y. (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101(5), 1322–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12119>
 14. Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification — A critical review. *Science of the Total Environment*, 581, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
 15. Duan, L., Huang, Y., Hao, J., Xie, S., & Hou, M. (2004). Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification. *Science of the Total Environment*, 330(1–3), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.035>
 16. Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
 17. Hao, T., Zhu, Q., Zeng, M., Shen, J., Shi, X., Liu, X., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. *Journal of Environmental Management*, 270, 110888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQRXHT>
 18. Joris, H. A. W., Caires, E. F., Bini, A. R., Scharr, D. A., & Haliski, A. (2013). Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant and Soil*, 365(1), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>. EDN: <https://elibrary.ru/HFEOYF>
 19. Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Lu, J. Y. (2000). Soil pHs in the tea gardens in Jiangsu, Zhejiang, and Anhui provinces and changes of soil pH in the past decade. *Chinese Journal of Soil Science*, 31(5), 205–207.
 20. Maharjan, B., Das, S., & Acharya, B. S. (2020). Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*,

- 23, e01116. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116>. EDN: <https://elibrary.ru/UNDNIX>
21. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Rogozhina, E. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2021). Effects of calcium-containing natural fertilizer on *Camellia Sinensis* (L.) Kuntze. *Bangladesh Journal of Botany*, 50(1), 179–187. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i1.52686>. EDN: <https://elibrary.ru/IJLJRS>
22. Mupenzi, J. P., Li, L., Ge, J., Varennyam, A., Habiyaemye, G., Theoneste, N., & Emmanuel, K. (2011). Assessment of soil degradation and chemical compositions in Rwandan tea-growing areas. *Geoscience Frontiers*, 2(4), 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.003>
23. Oh, K., Kato, T., Li, Z. P., & Li, F. Y. (2006). Environmental Problems From Tea Cultivation in Japan and a Control Measure Using Calcium Cyanamide. *Pedosphere*, 16(6), 770–777. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60113-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60113-6)
24. Pan, Zhu-Cai. (2015). Effect of boron and magnesium fertilization on tea yield, quality and soil fertility of red-soil tea plantations. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 30(9), 877–883.
25. Ruan, J. Y., & Wang, M. H. (2001). Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant. *Environmental Geochemistry and Health*, 23(1), 53–63. <https://doi.org/10.1023/A:1011082608631>. EDN: <https://elibrary.ru/AMPIQD>
26. Ruan, J. Y., Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Zhang, F. S. (2004). Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminum in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 263(1), 283–296. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047744.44940.96>. EDN: <https://elibrary.ru/VRXGNB>
27. Samarina, L., Malyukova, L., Wang, S., Li, Y., Doroshkov, A., Bobrovskikh, A., et al. (2024). Nitrogen deficiency differentially affects lignin biosynthesis genes and flavanols accumulation in tolerant and susceptible tea genotypes (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). *Plant Stress*, 14, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100581>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQWKD>
28. Simek, M., & Cooper, J. E. (2002). The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science*, 53(3), 345–354. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x>
29. Su, H. G. (2012). The improvement measures of soil acidification in tea garden in Anxi. *Guangdong Tea Industry*, 1, 31–32.
30. Su, S., Zhou, X., Wan, C., Li, Y., & Kong, W. (2015). Land use changes to cash crop plantations: Crop types, multilevel determinants and policy implications. *Land Use Policy*, 50, 379–389.

31. Sun, X., Li, Z., Wu, L., Christie, P., Luo, Y., & Fornara, D. A. (2019). Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study. *Plant and Soil*, 436(1), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>. EDN: <https://elibrary.ru/GPIAAP>
32. Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
33. USEPA. (2008). *Registering pesticides*. Washington, D.C. pp. 11–26.
34. Velikii, A. V. (2024). The effectiveness of the combined use of zinc, boron, and magnesium on tea plantations in the humid subtropics of Russia. *BIO Web of Conferences*, 139, 04001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413904001>. EDN: <https://elibrary.ru/UROSKH>
35. Von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>. EDN: <https://elibrary.ru/MROKFZ>
36. Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106). FAO. Rome. 181 p.
37. Wang, H., Xu, R. K., Wang, N., & Li, X. H. (2010). Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. *Pedosphere*, 20(6), 799–806. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60070-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60070-7)
38. Wu, C., Luo, Y., Deng, S., Teng, Y., & Song, J. (2014). Spatial characteristics of cadmium in topsoils in a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential threat to shallow groundwater. *Science of the Total Environment*, 472, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.084>
39. Yan, P., Wu, L., Wang, D., Fu, J., Shen, C., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fan, L., & Wenyan, H. (2020). Soil acidification in Chinese tea plantations. *Science of the Total Environment*, 715, 136963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136963>. EDN: <https://elibrary.ru/DBUZMF>
40. Yang, X. D., Ni, K., Shi, Y. Z., Yi, X. Y., Zhang, Q. F., Fang, L., & Ruan, J. Y. (2018). Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YJXFUZ>
41. Zeng, M. F., De Vries, W., Bonten, L. T. C., Zhu, Q. C., Hao, T. X., Liu, X. J., Xu, M. G., Shi, X. J., Zhang, F. S., & Shen, J. B. (2017). Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 3843–3851. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05491>

42. Zhang, Q., Zhu, J., Wang, Q., Xu, L., Li, M., Dai, H., Mulder, J., Xi, Y., & He, N. (2022). Soil acidification in China's forests due to atmospheric acid deposition from 1980 to 2050. *Science Bulletin*, 67(9), 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AWUIOZ>
43. Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Crop-land acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China. *Environmental Pollution*, 256, 113145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113145>. EDN: <https://elibrary.ru/UQWKRC>

References

1. *Agrochemical Methods for Soil Analysis*. (1975). In A. V. Sokolov (Ed.), *Agrochemical Methods for Soil Analysis*. Moscow: Nauka. 759 p.
2. Belous, O. G. (2006). *Microelements in Tea Plantations of the Russian Subtropics*. Krasnodar: KGAU. 164 p.
3. Velikiy, A. V. (2022). *The Effect of Root Application of Biogenic Elements (Mg, Ca, B, Zn) on the Fertility of Acid Brown Forest Soils, Yield, and Quality of Green Tea Leaves in the Humid Subtropical Conditions of Russia* [Doctoral dissertation, Candidate of Agricultural Sciences]. Krasnodar. 219 p.
4. Daraselia, M. K., Vorontsov, V. V., Gvasalia, V. P., & Tsanova, V. P. (1989). *Tea Cultivation in the USSR*. Tbilisi: Metsniereba. 558 p. ISBN 5-520-00355-6.
5. *Classification and Diagnostics of Soils of the USSR*. (1977). In V. V. Egorov, V. M. Fridland, E. I. Ivanova, et al. (Comps.), *Classification and Diagnostics of Soils of the USSR*. Moscow: Kolos. 223 p.
6. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2016). Formation of drought resistance in tea plants (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) under insufficient water supply with root application of calcium as a natural fertilizer. *Agricultural Biology*, 51(5), 673–679. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.673eng>. EDN: <https://elibrary.ru/WZJQIT>
7. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., & Velikiy, A. V. (2020). The effect of a calcium-containing natural material on the state of acid brown forest soils and tea plants (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) in the subtropics of Russia. *Agrochemistry*, (12), 3–10. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120054>. EDN: <https://elibrary.ru/JQYEKP>
8. Ryndin, A. V. (2016). *Agroecological Aspects of Horticulture in the Humid Subtropics of Russia*. Sochi. 260 p. EDN: <https://elibrary.ru/YQQIFF>
9. Shavishvili, L. M. (1973). *The Effect of Magnesium and Microelements (B, Zn, Co, and Mo) on Certain Physiological and Biochemical Processes in the Tea Plant* [Abstract of doctoral dissertation, Candidate of Sciences]. Tbilisi. 26 p.

10. Alekseeva, T., Alekseev, A., Xu, R. K., Zhao, A. Z., & Kalinin, P. (2011). Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in eastern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(2), 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9327-5>. EDN: <https://elibrary.ru/OIAZQV>
11. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *Elements of the nature and properties of soils* (13th ed.). Upper Saddle River. pp. 662–710.
12. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality — A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. EDN: <https://elibrary.ru/YEFIST>
13. Chen, D., Lan, Z., Bai, X., Grace, J. B., & Bai, Y. (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101(5), 1322–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12119>
14. Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification — A critical review. *Science of the Total Environment*, 581, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
15. Duan, L., Huang, Y., Hao, J., Xie, S., & Hou, M. (2004). Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification. *Science of the Total Environment*, 330(1–3), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.035>
16. Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
17. Hao, T., Zhu, Q., Zeng, M., Shen, J., Shi, X., Liu, X., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. *Journal of Environmental Management*, 270, 110888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQRXHT>
18. Joris, H. A. W., Caires, E. F., Bini, A. R., Scharr, D. A., & Haliski, A. (2013). Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant and Soil*, 365(1), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>. EDN: <https://elibrary.ru/HFEOYF>
19. Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Lu, J. Y. (2000). Soil pHs in the tea gardens in Jiangsu, Zhejiang, and Anhui provinces and changes of soil pH in the past decade. *Chinese Journal of Soil Science*, 31(5), 205–207.

20. Maharjan, B., Das, S., & Acharya, B. S. (2020). Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01116. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116>. EDN: <https://elibrary.ru/UNDNIX>
21. Malyukova, L. S., Pritula, Z. V., Kozlova, N. V., Velikiy, A. V., Rogozhina, E. V., Kerimzade, V. V., & Samarina, L. S. (2021). Effects of calcium-containing natural fertilizer on *Camellia Sinensis* (L.) Kuntze. *Bangladesh Journal of Botany*, 50(1), 179–187. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i1.52686>. EDN: <https://elibrary.ru/IJLJRS>
22. Mupenzi, J. P., Li, L., Ge, J., Varennyam, A., Habiyaemye, G., Theoneste, N., & Emmanuel, K. (2011). Assessment of soil degradation and chemical compositions in Rwandan tea-growing areas. *Geoscience Frontiers*, 2(4), 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.003>
23. Oh, K., Kato, T., Li, Z. P., & Li, F. Y. (2006). Environmental Problems From Tea Cultivation in Japan and a Control Measure Using Calcium Cyanamide. *Pedosphere*, 16(6), 770–777. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60113-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60113-6)
24. Pan, Zhu-Cai. (2015). Effect of boron and magnesium fertilization on tea yield, quality and soil fertility of red-soil tea plantations. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 30(9), 877–883.
25. Ruan, J. Y., & Wang, M. H. (2001). Accumulation of fluoride and aluminum related to different varieties of tea plant. *Environmental Geochemistry and Health*, 23(1), 53–63. <https://doi.org/10.1023/A:1011082608631>. EDN: <https://elibrary.ru/AMPIQD>
26. Ruan, J. Y., Ma, L. F., Shi, Y. Z., & Zhang, F. S. (2004). Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminum in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 263(1), 283–296. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047744.44940.96>. EDN: <https://elibrary.ru/VRXGNB>
27. Samarina, L., Malyukova, L., Wang, S., Li, Y., Doroshkov, A., Bobrovskikh, A., et al. (2024). Nitrogen deficiency differentially affects lignin biosynthesis genes and flavanols accumulation in tolerant and susceptible tea genotypes (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). *Plant Stress*, 14, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100581>. EDN: <https://elibrary.ru/TRQWKD>
28. Simek, M., & Cooper, J. E. (2002). The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science*, 53(3), 345–354. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x>
29. Su, H. G. (2012). The improvement measures of soil acidification in tea garden in Anxi. *Guangdong Tea Industry*, 1, 31–32.

30. Su, S., Zhou, X., Wan, C., Li, Y., & Kong, W. (2015). Land use changes to cash crop plantations: Crop types, multilevel determinants and policy implications. *Land Use Policy*, 50, 379–389.
31. Sun, X., Li, Z., Wu, L., Christie, P., Luo, Y., & Fornara, D. A. (2019). Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study. *Plant and Soil*, 436(1), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>. EDN: <https://elibrary.ru/GPIAAP>
32. Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
33. USEPA. (2008). *Registering pesticides*. Washington, D.C. pp. 11–26.
34. Velikii, A. V. (2024). The effectiveness of the combined use of zinc, boron, and magnesium on tea plantations in the humid subtropics of Russia. *BIO Web of Conferences*, 139, 04001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413904001>. EDN: <https://elibrary.ru/UROSKH>
35. Von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>. EDN: <https://elibrary.ru/MROKFZ>
36. Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106). FAO. Rome. 181 p.
37. Wang, H., Xu, R. K., Wang, N., & Li, X. H. (2010). Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. *Pedosphere*, 20(6), 799–806. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60070-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60070-7)
38. Wu, C., Luo, Y., Deng, S., Teng, Y., & Song, J. (2014). Spatial characteristics of cadmium in topsoils in a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential threat to shallow groundwater. *Science of the Total Environment*, 472, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.084>
39. Yan, P., Wu, L., Wang, D., Fu, J., Shen, C., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fan, L., & Wenyan, H. (2020). Soil acidification in Chinese tea plantations. *Science of the Total Environment*, 715, 136963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136963>. EDN: <https://elibrary.ru/DBUZMF>
40. Yang, X. D., Ni, K., Shi, Y. Z., Yi, X. Y., Zhang, Q. F., Fang, L., & Ruan, J. Y. (2018). Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.004>. EDN: <https://elibrary.ru/YJXFUZ>
41. Zeng, M. F., De Vries, W., Bonten, L. T. C., Zhu, Q. C., Hao, T. X., Liu, X. J., Xu, M. G., Shi, X. J., Zhang, F. S., & Shen, J. B. (2017). Model-based analysis of the

- long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 3843–3851. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05491>
42. Zhang, Q., Zhu, J., Wang, Q., Xu, L., Li, M., Dai, H., Mulder, J., Xi, Y., & He, N. (2022). Soil acidification in China's forests due to atmospheric acid deposition from 1980 to 2050. *Science Bulletin*, 67(9), 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.01.004>. EDN: <https://elibrary.ru/AWUIOZ>
43. Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F., & de Vries, W. (2020). Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China. *Environmental Pollution*, 256, 113145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113145>. EDN: <https://elibrary.ru/UQWKRC>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Великий Андрей Васильевич, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»

ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
kriptooorxon@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Andrey V. Velikii, Candidate of Agricultural Sciences, Research Associate
Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences
2/28, Jan Fabricius Str., Sochi, 354002, Russian Federation
kriptooorxon@mail.ru

Поступила 13.02.2026

После рецензирования 16.03.2026

Принята 01.04.2026

Received 13.02.2026

Revised 16.03.2026

Accepted 01.04.2026