УДК 633.72:631.816:631.445.35 (470.62) DOI: 10.25680/S19948603.2026.151.07

БАЛАНС ФОСФОРА В АГРОСИСТЕМАХ, СОДЕРЖАНИЕ И СОСТАВ ФОСФАТОВ В ПОЧВАХ ДЛИТЕЛЬНО УДОБРЯЕМЫХ ЧАЙНЫХ ПЛАНТАЦИЙ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Н.В. Козлова, В.В. Керимзаде, ФГБУН ФИЦ «Субтропический научный центр Российской академии наук»
354002, г. Сочи, ул. Я. Фабрициуса, 2/28, e-mail: kozlovanvagro@yandex.ru

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СНЦ РАН FGRW-2024-0001, № госрегистрации 124022000098-6

В длительном опыте с NPK-*удобрениями на чае во влажных субтропиках России установлено, что при выносе 13-23 кг* P_2O_5*/га в год с урожаем 44-76 ц/га ежегодное внесение 60, 120, 180 кг* P_2O_5*/га привело к значительному накоплению фосфора в бурых лесных кислых почвах. Общее его содержание за 26 лет выросло в 2-3/1,5-2,5 раза (до 1950-3200/1650-2700 мг/кг, в слое почвы 0-20/20-40 см) за счёт минеральных соединений (преимущественно* Al-P *при снижении доли* Ca-P*) при стабильном содержании органических (550-650 мг/кг). Содержание подвижного фосфора выросло в 6-14 раз (с 6-10 до 20-35 % от общего). Доза* P_{60} *поддерживала оптимальный для чая уровень 400-600 мг/кг; на фоне* $P_{120,180}$ *он был избыточно высоким (до 1100-1200/780-850 мг/кг). Содержание легкоподвижных фосфатов выросло в 3-15 раз, составляя 0,5-1 % от подвижного (а рыхлосвязанные – 10-15 %). Агрогенное подкисление почвы под чаем достоверно влияло на изменение фосфатных параметров. Дозы* $P_{120,180}$ *с низким коэффициентом использования и высоким профицитом, не приводящие к росту урожайности и вызывающие зафосфачивание, нецелесообразны в многолетнем режиме. Накопленный почвами фосфор – потенциально доступный для чая резерв, позволяющий минимизировать применение удобрений в дальнейшем.*

Ключевые слова: кислые бурозёмы, агроценоз чая, фосфор минеральный и органический, фракционный состав фосфатов, подвижность фосфора, вынос урожаем, баланс фосфора.

Для цитирования: *Козлова Н.В., Керимзаде В.В.* Баланс фосфора в агросистемах, содержание и состав фосфатов в почвах длительно удобряемых чайных плантаций Черноморского побережья Западного Кавказа//Плодородие. – 2026. - №4. – С. 35-44. DOI: 10.25680/S19948603.2026.151.07.

Актуальность изучения фосфатного состояния/режима почв в целом и при возделывании чая в частности, определяется несколькими аспектами.

Во-первых, незаменимой ролью фосфора как важнейшего биогенного элемента и специфичностью его поведения в почвах (и в системе почва – растение - удобрение); разнообразием видов и форм его соединений различного химического состава, лабильности, растворимости и доступности растениям; многообразием факторов, влияющих на трансформацию и подвижность фосфатов; способностью в больших количествах фиксироваться почвами в виде труднодоступных соединений, но при этом и возможностью обратимого их перераспределения, мобилизации [6, 7, 11].

Во-вторых, промышленными масштабами выращивания чая в регионе влажных субтропиков России (с 1950-х г.) и спецификой используемых под культуру тяжелых кислых/сильнокислых почв (буроземов, желтоземов), богатых оксидами/гидроксидами железа и алюминия. Это обуславливает высокую степень поглощения и фиксации фосфора, интенсивное его закрепление в труднорастворимых соединениях [6, 7] и ведет к снижению эффективности фосфорных удобрений и существенному росту содержания фосфора в почвах чайных плантаций, длительно возделываемых на постоянном месте [8, 10] (что характерно и для других чаепроизводящих регионов мира [18, 19]).

В-третьих, биологической спецификой растений чая (типичного ацидо- и алюмофила), исключающей известкование для повышения доступности фосфора и при этом дополнительно способствующей связыванию фосфора в труднорастворимые Al-P-комплексы (на фоне биогенного накопления Al и роста его подвижности при агрогенном подкислении, свойственных почвам чайных плантаций [3, 9, 19]). В то же время устойчивостью растений чая к дефициту фосфора в почвах в связи с высокой эффективностью внутреннего использования, а также способностью усиливать мобилизацию слаборастворимых фосфатов за счет кислых корневых выделений [17, 18]. Это позволяет минимизировать применение фосфорных удобрений и рассчитывать на использование запаса почвенного фосфора, ранее сформированного длительным внесением удобрений.

Цель исследований - изучить общее содержание, состав и подвижность фосфатов в почвах многолетних агроценозов чайных плантаций влажных субтропиков России в зависимости от нагрузки фосфорными удобрениями (в сочетаниях с NK) и хозяйственного баланса фосфора, а также в связи с изменением кислотно-основных свойств и элементного состава почвы.

Понимание объемов, структуры и свойств сформированных запасов почвенного фосфора имеет практическое значение для оценки потенциальной возможности их дальнейшего использования.

Методика. Проведена сравнительная оценка содержания и состава фосфатов в бурой лесной кислой почве естественного лесного массива и ряда модельных плантаций чая с различной нагрузкой NPK-удобрениями – вариантов длительного полевого опыта. Схема 1/4 (4 х 4 х 4), градации: 0, 1, 2, 3 единичные дозы. Чайные насаждения представлены районированным сортом Колхида интенсивного типа; заложены специально под опыт, охватывающий все этапы развития растений (молодые, полновозрастные). Район исследований – окрестности п. Уч-Дере

(Лазаревский р-н Сочи), Черноморское побережье Западного Кавказа, прибрежно-предгорная зона, климат влажно-субтропический; почвообразующая порода – кислые глинистые сланцы (аргиллиты). Оценивали действие разных доз фосфорных удобрений на формирование запаса почвенного фосфора, а также азотных удобрений, влияющих на продуктивность плантаций (и биогенное накопление фосфора из растительных остатков) и кислотно-основное состояние почв (и подвижность фосфатов). Длительность опыта 26 лет. При ежегодном внесении 60, 120 и 180 кг P_2O_5/га (1, 2 и 3 одинарные дозы соответственно) общее количество достигло 1,6; 3,1 и 4,7 т P_2O_5/га. Одинарная доза азотных удобрений составляла 70-90-120-200 кг N/га в год (увеличивалась с возрастом плантации); общее количество внесенного азота достигло 3,8, 7,6 и 11,4 т/га (с 1, 2 и 3 одинарными дозами).

На чайной плантации по вариантам опыта и под буково-грабовым лесом рядом с плантацией провели отбор образцов верхних слоёв почвы (0-20 и 20-40 см) в шести точках на каждой опытной делянке (площадь 50 $м^2$) для учета полевой пространственной вариабельности показателей.

В лабораторных исследованиях использовали общепринятые методики [2]. Общее содержание фосфора, его минеральных и органических соединений в почвах определяли методом Сэндерса и Вильямса, который позволяет выделять 75-95 % валового фосфора [2]. Фракционно-групповой состав, дающий представление о содержании и соотношении в разной степени доступных/труднодоступных соединений фосфора (рыхлосвязанных, Al-P, Fe-P, Ca-P) определяли по методу Чанга-Джексона в варианте Аскинази и др. (учитывая в определенной мере условное выделение фракций из-за засорения вытяжек фосфатами, частично переосажденными из предыдущих, согласно пояснениям к методу [2]). Содержание подвижных фосфатов, как общепринятый показатель плодородия почв, определяли методом Ониани – стандартным при анализе кислых субтропических почв, в т.ч. применительно к культуре чая (согласно [10]). Также определяли общий запас подвижных фосфатов – серией 10-ти последовательных вытяжек по Ониани, обеспечивающих полноту извлечения. Методом Карпинского, Замятиной (предложенным в т.ч. для кислых почв) определяли концентрацию фосфора в слабосолевых вытяжках (как аналоге почвенного раствора), что характеризует степень подвижности фосфора и содержание легкоподвижных фосфатов, полностью доступных растениям. Экстрагирующие растворы и их соотношения с почвой в данных методах для удобства сопоставления результатов указаны в примечаниях к рисункам. Фосфор во всех вытяжках определяли в виде фосфорно-молибденового синего комплекса (по Дениже), колориметрически. Параллельно определяли содержание гумуса (по Тюрину в модификации Орлова и Гриндель, с колориметрическим окончанием) и кислотно-основные показатели: pH_{KCl} – потенциометрически; гидролитическая кислотность (по Каппену) и подвижный/обменный алюминий (по Соколову) – титриметрически; обменные кальций и магний – трилонометрически.

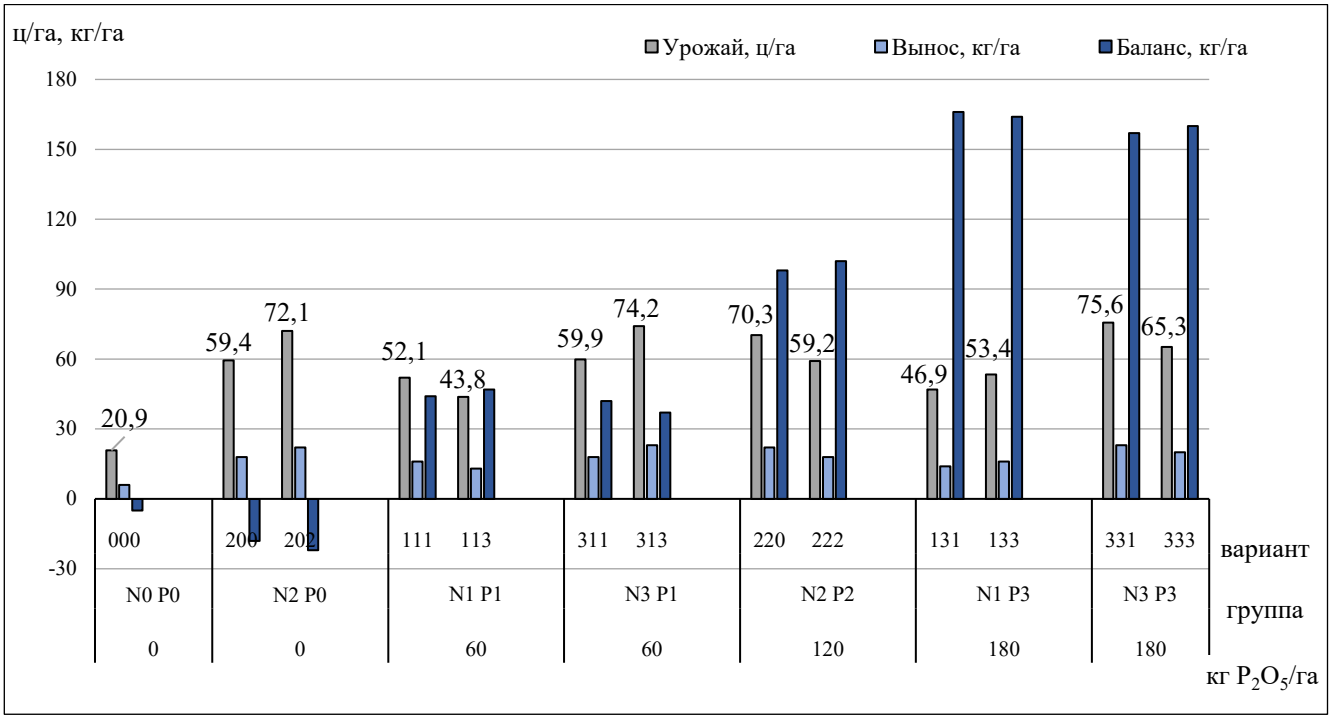
Большинство определений выполнено в индивидуальных образцах (n = 6). Общий запас подвижного фосфора (серией 10-кратных вытяжек) и фракционный состав минеральных фосфатов устанавливали по вариантам в репрезентативных смешанных пробах (из одинаковых объемов шести индивидуальных), в 2-3-кратной аналитической повторности. В них же определили элементный состав (валовое содержание) ICP-MS и ICP-AES методами.

Объёмы выноса фосфора урожаем чая рассчитывали исходя из средней многолетней урожайности модельных плантаций (включая молодой возраст) и среднего содержания общего фосфора в чайном сырье (2-3-листные флеши) основных периодов сбора на разных этапах исследования (по данным [10]). Хозяйственный баланс фосфора рассчитан по разнице объемов его поступления с удобрениями и выноса урожаем.

Обработка данных выполнена с использованием описательной статистики и корреляционного анализа в программе Microsoft Excel (при P = 0,95). В диаграммах представлены средние $\pm$ стандартные отклонения. Варианты опыта закодированы по количеству одинарных доз NPK.

Результаты и их обсуждение. Фосфор как структурный элемент энергетических компонентов клетки является важным в минеральном питании чая, особенно в молодом возрасте. Он в большом количестве концентрируется в чайном растении (особенно в корнях и каркасной древесине); в биомассе взрослой плантации закрепляется около 1800 кг P_2O_5/га, 870 кг N/га и 625 кг K_2O/га [10]. Окультуривание почвы с внесением высоких доз фосфорных удобрений было обязательным приемом при закладке чайных плантаций в регионе. В дальнейшем ежегодно вносили 100-150 кг P_2O_5/га. Основным фактором получения высоких урожаев для листосборной культуры чая, с многократным удалением верхушки однолетних побегов с 2-3 листьями и почкой (флешей), являются азотные удобрения – источник легкодоступного растениям азота, стимулирующего ростовые процессы. В зависимости от возраста и урожайности плантаций вносили от 75-150 до 250-350 кг N/га, а при орошении - до 500 кг N/га. В большинстве чаепроизводящих стран применяют 100-300 кг N/га, а в Китае и Японии ещё более высокие дозы – от 300-500 до 750-800 кг N/га [10, 15].

В длительном многофакторном опыте с удобрениями (далее МФУ-опыт) одинарные дозы азотных удобрений (70-90-120-200 кг N/га в год в сочетаниях с PK) обеспечили в 2-2,5 раза более высокую среднемноголетнюю урожайность чая сорта Колхида (44-53 ц/га в год) в сравнении с неудобряемым контролем; внесение 2-3-х доз N повысило её ещё в 1,3-1,4 раза (до 60-76 ц/га в год) (рис. 1). Сопоставимый уровень урожайности при двойных и тройных дозах азота в многолетнем аспекте связан с отсутствием положительного эффекта от повышения дозы до 600 кг N/га (в течение 12-ти из 26 лет). Расчетная доза, дававшая максимальную урожайность чая в разные годы, даже при благоприятных погодных условиях не превышала 400-460 кг N/га [10].



Доля выноса от поступления, %	27 22	30 38	18 15	8 9	13 11
Отношение поступления к выносу, разы	3,8 4,6	3,3 2,6	5,5 6,7	12,9 11,3	7,8 9,0

Рис. 1. Средние годовые показатели урожайности чая, выноса и хозяйственного баланса фосфора (P_2O_5) в модельных агроценозах чайных плантаций МФУ-опыта в зависимости от нагрузки удобрениями (по усредненным многолетним данным 26-летнего периода)

Сравнение урожайности плантаций (в разрезе среднемноголетних данных) для вариантов с одинаковыми дозами азота и разными дозами фосфора (0, 60, 120, 180 кг P_2O_5/га) показало отсутствие выраженного влияния фосфорных удобрений, сопоставимый уровень в парах: N1P1 и N1P3; N2P0 и N2P2; N3P1 и N3P3 (рис. 1). В работе [10] показано, что урожайность чая коррелировала с дозами азота, погодными условиями, pH почвы, содержанием подвижного калия, но не имела достоверной связи с дозами фосфорных удобрений и подвижным фосфором в почве при исходно повышенном его содержании (в результате предпосадочного внесения). При этом, как видно из сравнения в паре N2P0 и N2P2, исходно созданный окультуриванием запас фосфора в почве был длительно эффективен в последействии; дальнейшее отсутствие фосфорных удобрений не привело к снижению урожайности чая. Это объясняется высокой эффективностью внутреннего использования фосфора, свойственного растениям чая, в сочетании с их способностью к мобилизации почвенных фосфатов за счет кислых корневых выделений [17, 18], что усиливается подкислением аммонием. При этом на определенном этапе в опыте отмечался положительный эффект от внесения 30-50 кг фосфора на 100 кг азота (т.е. в соотношении 0,3-0,5). При более высоком соотношении урожайность чая существенно снижалась [10].

Вынос фосфора определялся в первую очередь объемом урожая, при том, что содержание фосфора в чайном сырье (в отличие от зрелых листьев) практически не зависело от доз и содержания подвижного фосфора в почве, и колебалось в разное время в пределах 1,0-1,4 % [10]. Годовой вынос фосфора в низкоурожайном варианте без удобрений в среднем равен около 6 кг P_2O_5/га. В удобряемых азотом урожайных вариантах он был в 2,5-3,5 раза выше и составлял от 13-16 до 20-23 кг P_2O_5/га в год (см. рис. 1), что ниже выноса азота и калия (55-100 и 25-40 кг/га в год с урожаем чая 50-80 ц/га) [10]. Внесение 60 кг P_2O_5/га было достаточным для полной компенсации выноса (даже при наиболее высокой урожайности), превышая его в 2,5-4,5 раза; средний годовой профицит баланса в таких агросистемах составлял 37-47 кг P_2O_5/га (рис. 1, группы N1P1, N3P1). Внесение 120 и 180 кг P_2O_5/га, превышавшее вынос урожаем, соответственно, в 5,5-6,5 и 8-13 раз, создавало в 2,5-4 раза более высокий профицит – в среднем 100 и 155-165 кг P_2O_5/га в год (рис. 1, группы N2P2; N1P3 и N3P3). В отсутствии фосфорных удобрений складывался отрицательный баланс фосфора в агросистеме, равный его выносу урожаем (группа N2P0: 18-22 кг P_2O_5/га в год). Наиболее высокий коэффициент использования фосфора удобрений получен при сочетании минимальных доз фосфора с максимальными дозами азота (группа N3P1) – доля выноса урожаем составляла 30-38 % от поступления; на фоне низких доз азота (группа N1P1) он снижался до 22-27 % (см. рис. 1). Самый низкий коэффициент (8-13 %) был в вариантах с тройными дозами фосфора (группа N3P3 и N1P3), особенно при более низкой урожайности на фоне невысоких доз азота.

Стандартный контроль обеспеченности почв подвижным фосфором (по Ониани) в МФУ-опыте показал [8], что ежегодное внесение 60 кг P_2O_5/га поддерживало оптимальный для чая уровень (400-500 мг/кг, согласно [10]) или несколько выше этого (до 600-650 мг/кг); исходный уровень, достигнутый предпосадочным окультуриванием, был превышен за 23-25 лет только в 1,5 раза. Длительное внесение 120 и 180 кг P_2O_5/га привело к 2-3-кратному росту показателей – в среднем до 1100-1200/780-850 мг/кг (в слоях 0-20/20-40 см), а естественный лесной уровень был превышен в 10 раз и более. В верхнем слое избыточно высокие значения отмечены уже в первые 5-7 лет, в дальнейшем накопление происходило и в нижележащих слоях.

Отсутствие выраженного повышения урожайности чая, высокий профицит баланса, низкий коэффициент использования фосфора удобрений, избыточно высокое содержание подвижного фосфора в почве (явное зафосфачивание) показывают нецелесообразность внесения повышенных доз фосфорных удобрений в многолетнем режиме. Современная система удобрения чая в субтропиках России [10] (в отличие от ранее принятой) ограничивает их применением 50-60 кг P_2O_5/га, полностью исключая их в случае избыточной обеспеченности почв. Несмотря на низкие объёмы внесения удобрений (часто полное отсутствие) в последние 2-3 десятилетия, для почв производственных чайных плантаций до сих пор характерно очень высокое содержание подвижного фосфора (от 700-900 до 1 200-1400 мг/кг, а часто и выше – до 1600 мг/кг), превосходящее уровень его в лесной почве в 6-10 раз и более [8]. Это сопоставимо с показателями длительно удобряемых фосфором вариантов МФУ-опыта, что делает их прекрасными модельными объектами для изучения структуры и свойств запаса почвенных фосфатов и возможностей их мобилизации в дальнейшем.

Определение общего содержания фосфора (минерального и органического, методом Сэндерса и Вильямса) в почвах МФУ-опыта показало, что за 26 лет ежегодного внесения 60-120-180 кг P_2O_5/га (в различных сочетаниях с NK) оно выросло относительно почвы леса в 2-3/1,5-2,5 раза (с 1030/1050 до 1950-2000/1650-1850 и 2670-3200/2350-2700 мг/кг, на фоне 1- и 2-3-х доз Р-удобрений, в слоях 0-20/20-40 см) (рис. 2). Сопоставимый уровень, достигнутый на фоне P_{120} и P_{180} (максимум до 3400-3600 мг/кг, в слое 0-20 см), по-видимому, характеризует потенциально возможное для данных почв поглощение фосфора, затем происходит насыщение нижележащих слоев. Рост запасов общего фосфора на фоне P_{60} и P_{120} (в среднем на 950 и 1800 мг/кг за 26 лет, в слое 0-20 см) вызван профицитом 960-1220 и 2550-2650 кг/га за 26 лет; т.е. к накоплению в почве 100 мг P_2O_5/кг привёл избыток в 115-145 кг P_2O_5/га. При отрицательном балансе фосфора в варианте без удобрений (000; дефицит около 155 кг/га за 26 лет) и вариантах с азотными удобрениями без фосфорных (200, 202; дефицит 470-570 кг/га за 26 лет) общее содержание фосфора было выше, чем под лесом на 20-40/10-25 %. Это объясняется внесением фосфорных удобрений при закладке плантации, а в удобряемых азотом вариантах ещё и последующим биогенным накоплением в результате разложения больших объемов растительных остатков.

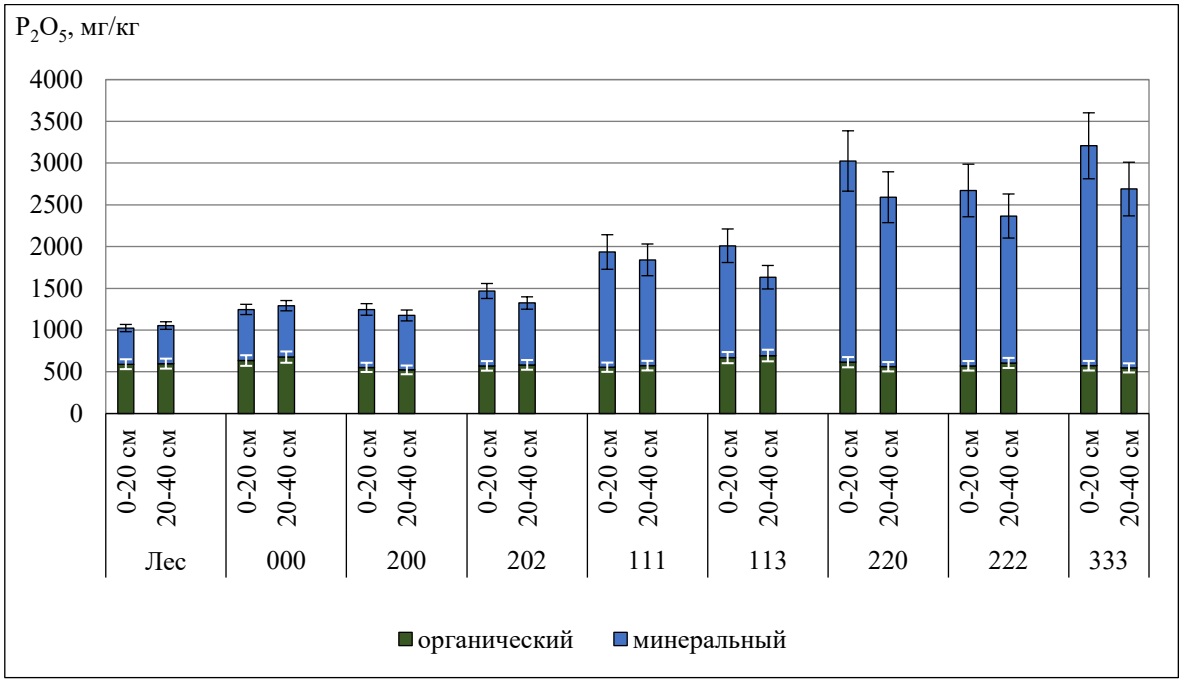


Рис. 2. Общее содержание фосфора, его минеральных и органических соединений в почве при различной нагрузке удобрениями (по методу Сэндерса и Вильямса: экстракция 0,2 н. H_2SO_4 в течение 16-18 ч.; почва : раствор = 1 : 50)

Количество органических и минеральных соединений фосфора в лесной почве и почве неудобрявшейся чайной плантации (000) сопоставимо, с небольшим преобладанием органических (50-60 к 40-50 %) (см. рис. 2). В результате длительного применения удобрений содержание органических фосфатов существенно не изменилось, во всех исследованных почвах оно составляло 550-650 мг/кг. Содержание минеральных фосфатов в результате их внесения с удобрениями выросло в 3-6/2-4,5 раза, а их доля увеличилась до 65-85/55-80 % (в слоях 0-20/20-40 см, в зависимости от доз), превысив содержание органических фосфатов в 2-4,5/1,5-4 раза (см. рис. 2). Значительное увеличение минеральных соединений и относительное уменьшение органических (при большей стабильности их запасов) характерны для систематически удобряемых фосфором почв, до 80 % его остается в виде минеральных соединений [7, 13, 16]. В вариантах с интенсивным азотным питанием без фосфорных удобрений (200 и 202) содержание минеральных фосфатов также несколько превышало количество органических (55-60 и 40-45 %, соответственно). По-видимому, фосфор минерализованной части органических соединений закреплялся преимущественно в форме минеральных соединений. Следует отметить, что для исследованных почв не выявлено корреляции между содержанием почвенного органического вещества и органического фосфора, при относительно небольших диапазонах их колебаний в выборке: по содержанию гумуса – от 3,6-3,7 до

4,2-4,3 % / от 3,2-3,4 до 3,6-3,9 %; фосфора органического – 550-670/520-690 мг/кг (в слоях 0-20/20-40 см).

Изучение фракционного состава минеральных фосфатов методом Чанга-Джексона показало, что суммарное содержание различных фракций (рис. 3) в целом сопоставимо с содержанием минерального фосфора (по Сэндерсу, Вильямсу, см. рис. 2), но при высоком содержании ближе к общему минерально-органическому фосфору (на 85-95/75-85 % в слоях 0-20/20-40 см), поскольку некоторые фракции (ФР2 – Al-P и ФР3 – Fe-P) могут быть частично или даже значительно представлены органофосфатами [2].

Оценка содержания отдельных фракций (см. рис. 4) и их соотношения (см. рис. 5) показала, что для исследованных бурых лесных кислых почв (как и для других кислых почв [4, 6, 11]), характерно преобладание фосфатов железа и алюминия, связанное с высоким содержанием в почвенной массе их полуторных оксидов. Так в почве леса и неудобрявшейся (000) чайной плантации минеральные фосфаты на 45-50 % представлены фосфатами железа (ФР3 – Fe-P) и на 20-30 % фосфатами алюминия (ФР2 – Al-P). Содержание и доля фосфатов кальция (ФР4 – Ca-P) сопоставимы с количеством алюмофосфатов, что связано с определенным уровнем насыщенности почвы основаниями (45-50/40 % в слоях 0-20/20-40 см, при pH_{KCl} 4,0-4,2/3,9-4,0), где более половины составлял обменный кальций. Если высокое валовое содержание оксидов железа и алюминия (5,7 и 7,7 % в слое 0-20 см) унаследовано от почвообразующей породы (кислых аргиллитов), то для кальция (0,3 % CaO) при его интенсивном выщелачивании большую роль играло биогенное накопление. Мощный азотно-кальциевый круговорот веществ широколиственных и хвойно-широколиственных лесов – одно из условий формирования буроземов [5]. Содержание рыхлосвязанных фосфатов (ФР1 – Р рыхл.) было незначительным (5-6/2-3 % в слое 0-20/20-40 см).

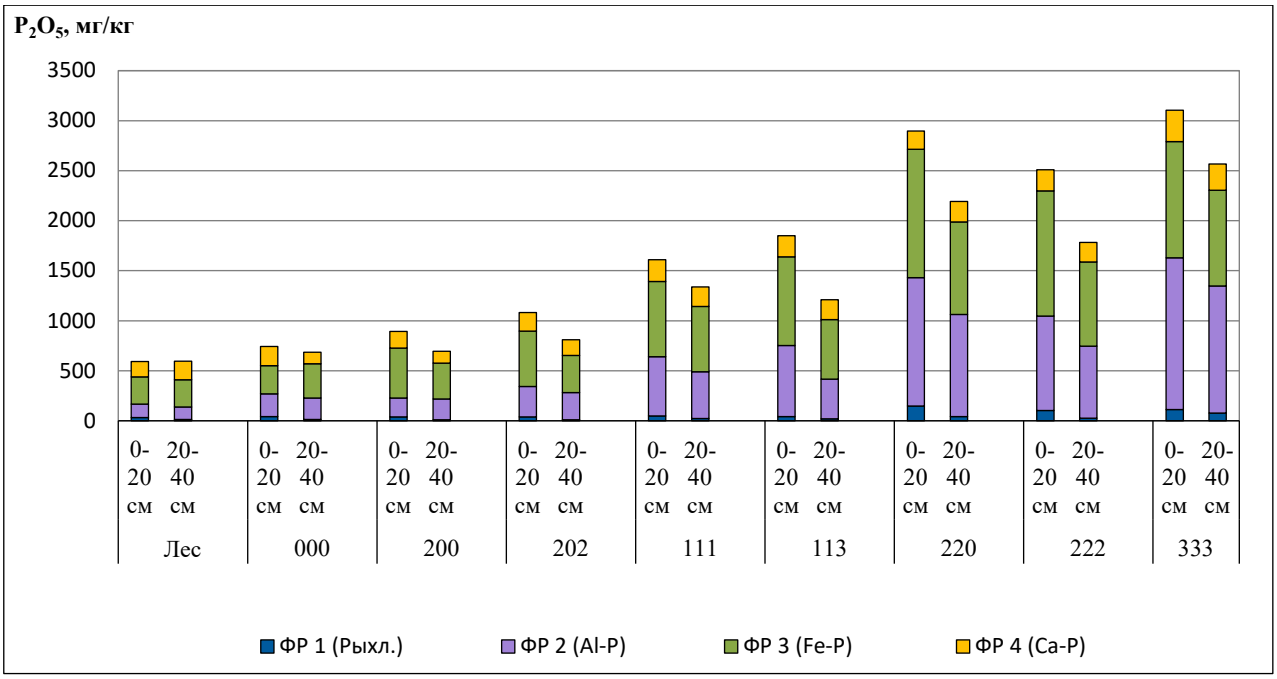
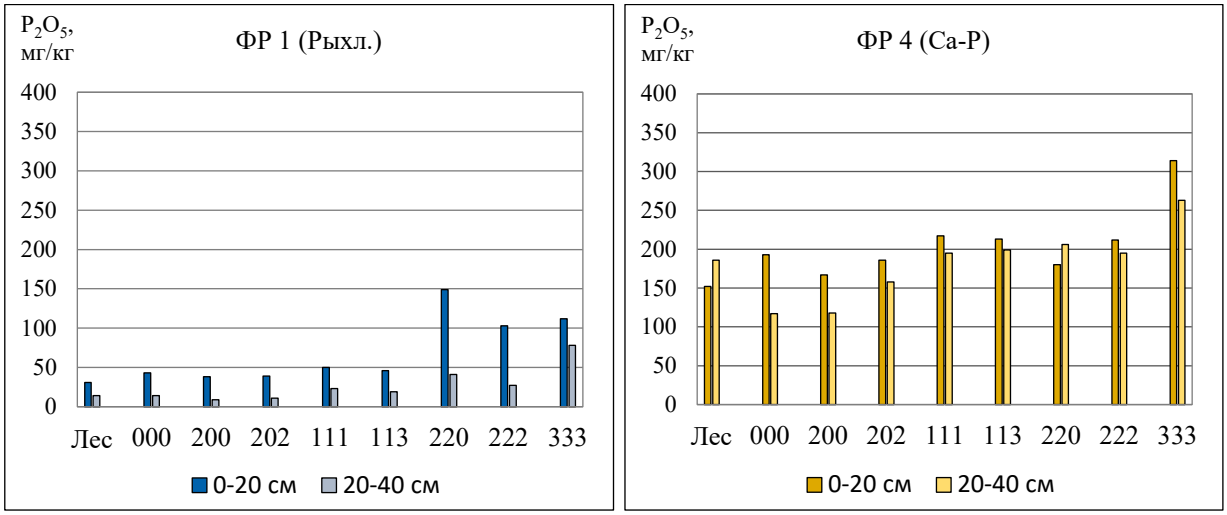
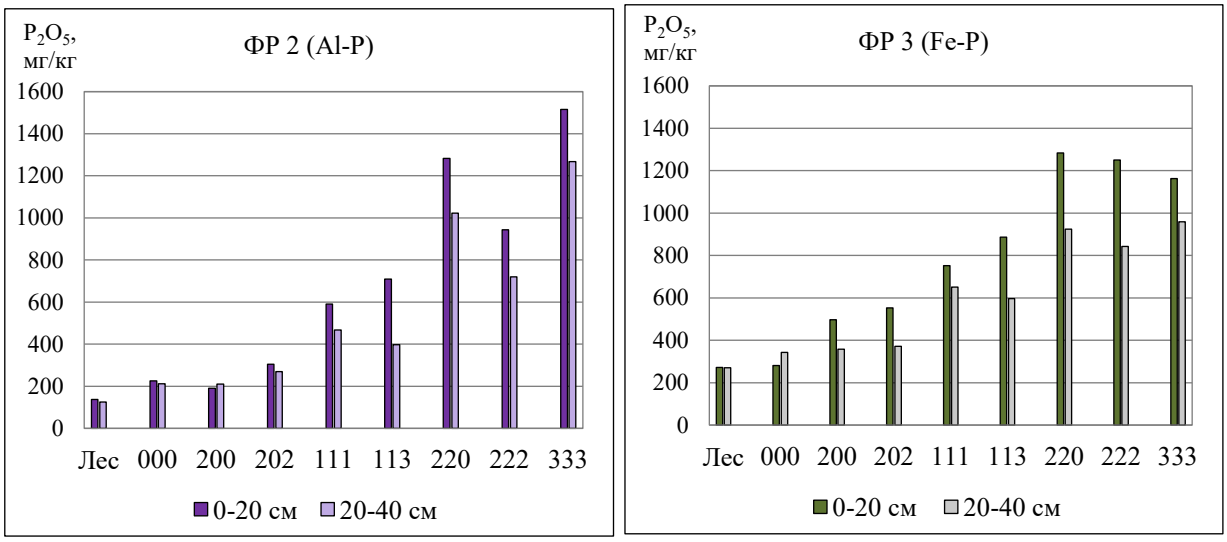


Рис. 3. Суммарное содержание минеральных фосфатов различных фракций в почве в зависимости от нагрузки удобрениями (по методу Чанга-Джексона: последовательная экстракция 1 н. NH_4Cl, 0,5 н. H_2SO_4, 0,5 н. NH_4F, 0,1 н. NaOH; почва : раствор = 1 : 50)

Накопление фосфора в почве при внесении фосфорных удобрений шло в большей мере за счет фосфатов алюминия и фосфатов железа; их содержание выросло пропорционально Р-нагрузке до сопоставимых между собой значений (рис. 4). Однако содержание Al-P выросло в 4,5-11/3-10 раз (в слоях 0-20/20-40 см) относительно почвы леса; их доля увеличилась в 1,5-2/1,5-2,5 раза и достигла 40-50/35-50 %, став часто преобладающей (рис. 5). Содержание Fe-P увеличилось лишь в 3-4,5/2-3,5 раза, а их доля в сумме фракций почти не изменилась или даже уменьшилась. Содержание Ca-P выросло в среднем в 1,5 раза, при этом их доля снизилась в 2-3 раза (до 12-17 и 6-10 % на фоне 1- и 2-3-х доз Р-удобрений). Содержание рыхлосвязанных фосфатов увеличилось в 1,3-1,6 и в 3,5-5 раз относительно почвы леса, но их доля в сумме фракций составляла не более 4-5/2-3 % (см. рис. 4, 5). В вариантах без внесения фосфора (200, 202), но с его биогенным накоплением, также отмечены накопление в первую очередь фосфатов алюминия и железа и снижение доли рыхлосвязанных фосфатов и фосфатов кальция.



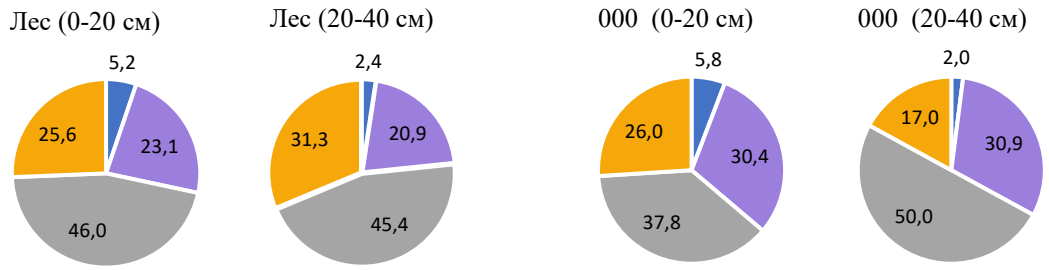
Экстракция 1 н. NH_4Cl Экстракция 0,5 н. H_2SO_4



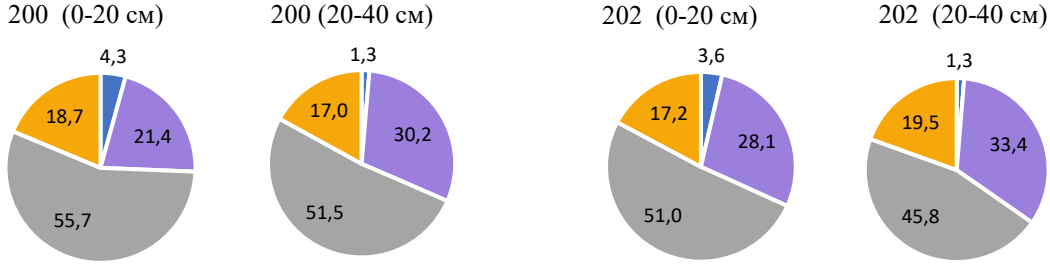
Экстракция 0,5 н. NH_4F (pH 8,5) Экстракция 0,1 н. NaOH

Рис. 4. Содержание в почве минеральных фосфатов различных фракций
(по методу Чанга-Джексона; почва : раствор = 1 : 50)
в зависимости от нагрузки удобрениями

Фон (лес) и контроль без удобрений (000)



Без фосфорных удобрений. Двойные дозы N (140-400 кг N/га в год, всего 7,6 тонны N/га)



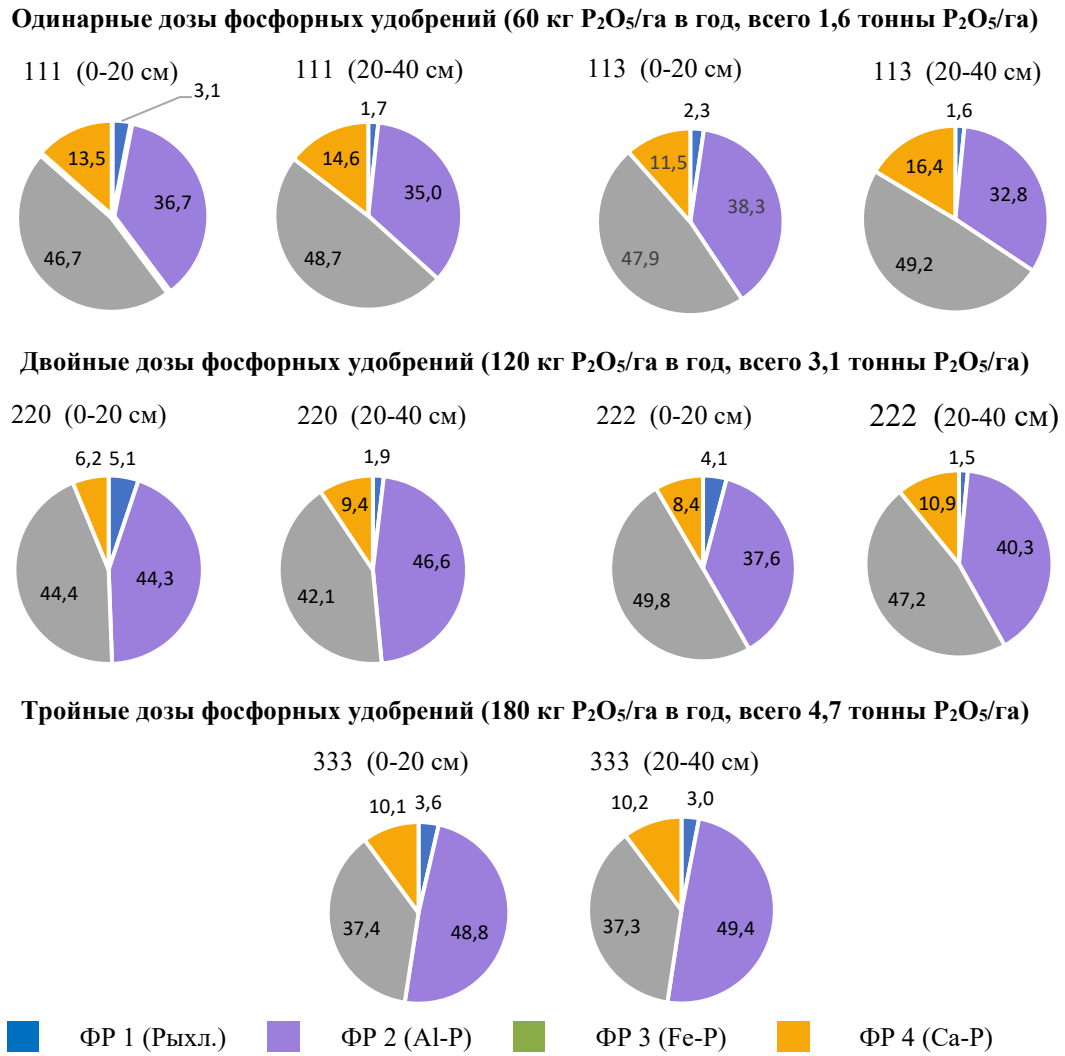


Рис. 5. Соотношение и долевое участие (% от суммы) различных фракций минеральных фосфатов в почвах в зависимости от нагрузки удобрениями

Закрепление остаточного фосфора удобрений преимущественно в виде фосфатов алюминия и железа (в меньшей степени) в бурой лесной кислой почве под чаем (что в целом свойственно кислым почвам [4, 7, 11]) дополнительно усугублялось агрогенным её подкислением, которое тем сильнее, чем выше нагрузка азотными удобрениями (главный прямой и косвенный факторы подкисления [3, 9, 19]). Так на фоне 1- и 2-3-х доз N-удобрений отмечены следующие изменения относительно почвы леса и неудобрявшегося контроля (для слоя 0-20/20-40 см соответственно): снижение pH_{KCl} с 4,0-4,1/3,9-4,0 до 3,5-3,7/3,7-3,8 и 3,0-3,3/3,1-3,4; рост гидролитической кислотности с 12-16/15-17 до 23-25/20-22 и 30-32/28-31 смоль(экв)/кг; рост содержания подвижного алюминия (и обменной кислотности) с 2-4/4-5 до 8-9/6-8 и 11-13/10-13 смоль(экв)/кг, что объясняет существенное увеличение содержания Al-P. Подкисление усиливало выщелачивание обменных оснований (в первую очередь Ca); их содержание снизилось с 12-13/10-12 до 7-9/9-10 и 2-4/3-6 смоль(экв)/кг, а насыщенность почв основаниями – с 44-50/40-42 до 22-28/29-31 и 7-12/10-16 %, что объясняет существенное уменьшение доли Ca-P.

Увеличение количества обменного алюминия связано не только с ростом его подвижности при подкислении почвы, но и с биогенным накоплением под чаем. Алюминий играет ведущую роль в зольном составе листьев чая (Al_2O_3 – 18-28 %, CaO – 7-12 % [3]), в отличие от преобладающей доли кальция в золе листьев такой лесообразующей породы как бук восточный (CaO – 14,5 %, Al_2O_3 – 3,6 % [5]). В итоге биогенного накопления алюминия и выщелачивания кальция верхние горизонты почвы под чаем характеризовались повышенным на 15-20 % валовым содержанием алюминия и в 2-3 раза более низким содержанием кальция (табл.).

Изменение валового содержания Al, Fe, Ca, Mg в почве модельных чайных плантаций МФУ-опыта относительно их содержания в почве леса

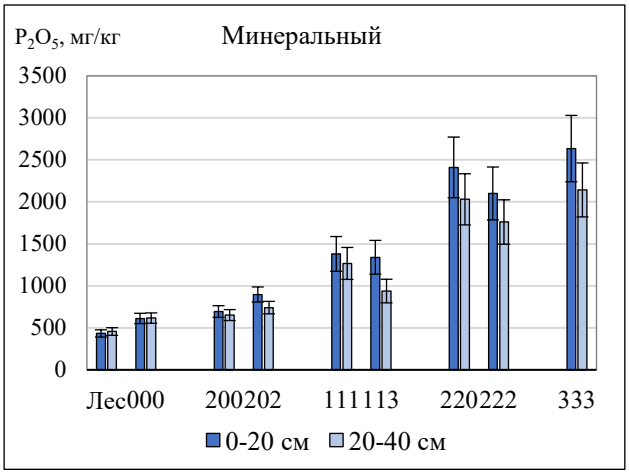
Элементы (*оксиды*)	**Лес** (слой 0-20 см), мг/кг (*%*)	Коэффициент концентрации (кратность изменения) по вариантам опыта (слой почвы 0-20 см)						
		111	**113**	**200**	**202**	**220**	**222**	**333**
Al (Al_2O_3)	40 741 (*7,70*)	1,14	1,16	1,15	1,22	1,16	1,14	1,16
Fe (Fe_2O_3)	39 580 (*5,66*)	0,97	0,93	0,95	0,93	0,94	0,97	0,93
Ca (CaO)	2 000 (*0,28*)	0,48	0,49	0,30	0,36	0,34	0,38	0,39
Mg (MgO)	4 337 (*0,72*)	1,01	1,01	0,95	1,05	1,01	1,03	1,03

Высокая устойчивость к активным формам алюминия в почве, даже большая потребность в них являются

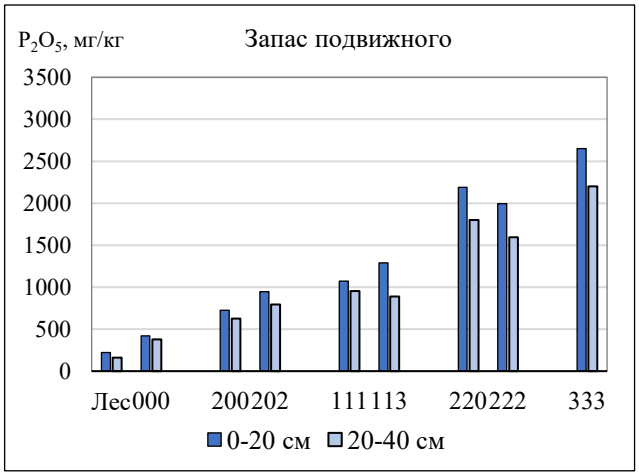
особенностью чайного растения – гипераккумулятора алюминия, первого в ряду видов, филогенетически приспособленных к кислым почвам с высоким его содержанием [15]. Для чая верхний предел подвижного алюминия в почвах не установлен. Так под чайными плантациями нашего региона он колеблется от 400-700 до 1000-1400 мг/кг, не приводя к снижению урожайности. Из культур, выращиваемых в субтропиках России, устойчивы к повышенной кислотности почв (но менее чем чай) мандарин, инжир, фейхоа, фундук. Чаепригодные земли, в связи с их особой ценностью и ограниченностью площадей, не переводят под другие культуры. Для многих зерновых и овощных культур критическим является содержание подвижного алюминия в почве от 30-50 до 80-100 мг/кг (в зависимости от вида), поэтому при выращивании на дерново-подзолистых почвах (с содержанием 150-300 мг Al/кг) требуется известкование [1, 14]. Механизмы устойчивости растений к алюминиевой токсичности широко изучают в различных аспектах (физиологическом, агрохимическом, генетическом, биохимическом) [12, 14, 15]. Отмечается, что усиление фосфорного питания снижает токсичность алюминия за счет связывания его фосфат-ионом. Этим же объясняется дефицит фосфора, возникающий при высоком содержании алюминия в почве; растворимость фосфатов алюминия регулируется реакцией среды [12].

Полученные данные по содержанию органических и минеральных фосфатов, их фракционно-групповому составу дают определенное представление об общем запасе и соотношении более или менее лабильных и труднодоступных соединений фосфора в исследованных почвах. Но с точки зрения актуального плодородия важны содержание подвижного фосфора (как общепринятый показатель) и степень его подвижности (концентрация наиболее легкоподвижных фосфатов в почвенном растворе), поскольку применение удобрений направлено в первую очередь на увеличение доступных растениям соединений [13].

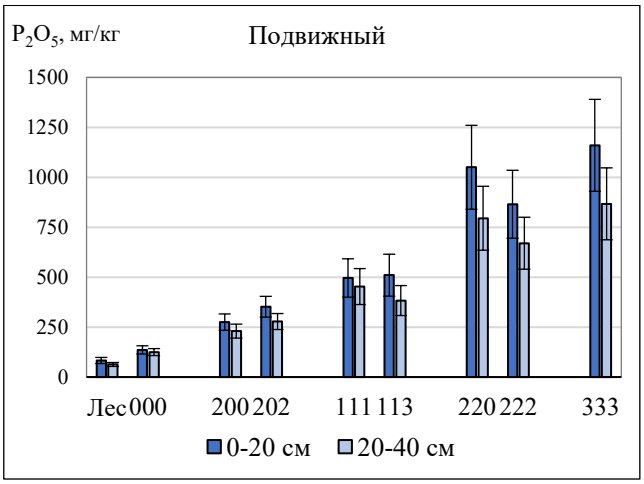
В почве чайной плантации без удобрений (контроль) содержание подвижного фосфора (по Ониани) и его запас (в 10-кратных вытяжках по Ониани) были в 2 раза выше, чем в почве леса (но относительно исходного при закладке плантации содержание снизилось в 1,5-2 раза), при этом степень его подвижности или концентрация легкоподвижных фосфатов (по Карпинскому, Замятиной) была одинаково низкой (рис. 6).



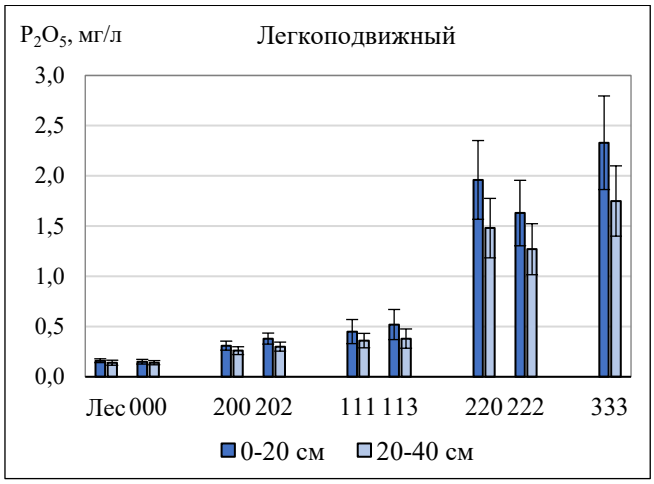
по Сэндерсу и Вильямсу
экстракция 0,2 н H_2SO_4 16-18 часов
почва : раствор = 1 : 50



по Ониани
10-кратная экстракция 0,1 н H_2SO_4
почва : раствор = 1 : 25



по Ониани экстракция 0,1 н H_2SO_4
почва : раствор = 1 : 25



по Карпинскому, Замятиной экстракция 0,03 н K_2SO_4
почва : раствор = 1 : 5

Рис. 6. Содержание различных форм фосфора в исследованных почвах
в зависимости от нагрузки удобрениями

В вариантах 200 и 202 на фоне биогенного накопления фосфора и подкисления почвы содержание подвижных фосфатов и их запас были в 2-2,5 раза выше контроля (и в 4-5 раз выше леса). О повышении подвижности свидетельствует и в 2 раза более высокое содержание легкоподвижных фосфатов в слабосолевой вытяжке. В вариантах с длительным применением фосфорных удобрений содержание подвижного фосфора увеличилось относительно почвы леса в 6-14 раз; его общий запас был повышен в 5-12 раз; степень подвижности фосфатов выросла в 3-15 раз соответственно дозам (рис. 6).

Все параметры фосфатного состояния исследованных почв в процессе их изменения при длительном возделывании чая (за исключением органических соединений фосфора, содержание которых было стабильным) ожидаемо коррелировали между собой в очень сильной или сильной степени (r = 0,70-0,99). Интересно было сравнить между собой разные количественные характеристики видов и форм соединений фосфора в исследуемых почвах, учитывая определенную условность (различную избирательность методов). Известно, что при внесении фосфора сначала образуются рыхлосвязанные фосфаты кальция и аморфные соединения фосфатов алюминия и железа, фосфор которых сравнительно легко доступен растениям и некоторое время сохраняет мобильность, увеличивая запас подвижных фосфатов и концентрацию в почвенном растворе. В дальнейшем свежеосажденные фосфаты кристаллизуются и переходят в труднорастворимые соединения [7, 16].

При сопоставлении разных параметров установлено, что доля подвижных фосфатов от общего содержания фосфора (минерального и органического) составляла 6-10 % в лесу и на контроле (000); на фоне 1- и 2-3-х доз Р-удобрений она увеличилась до 20-25 и 25-35 %. Относительно содержания минерального фосфора доля подвижного составляла 15-25 % в лесу и на контроле, а при удобрении достигла 35-45 %. Запас подвижного фосфора практически полностью (на 90-100 %) совпадал с содержанием минерального фосфора, только в лесу и на контроле он был меньше (40-50 и 60-70 % соответственно). Содержание легкоподвижных фосфатов (от 1-3/1-2 до 8-12/6-9 мг/кг, в слоях 0-20/20-40 см, в пересчете из мг/л, см. рис. 6) для всех образцов составляло не более 0,5-1 % от подвижного фосфора. Содержание рыхлосвязанных фосфатов (часть водорастворимых фосфатов, согласно пояснениям к методу Чанга-Джексона [2]), оказалось на порядок выше (от 30-45/10-15 до 100-150/40-80 мг/кг, см. рис. 4); относительно подвижного фосфора их доля составляла 30-35/15-20 % в почве леса и контроля, и только 10-15/5-10 % в удобряемых фосфором почвах.

Поскольку фосфатный режим и трансформация соединений фосфора в почве во многом определяются её кислотностью [7, 11], для исследуемых почв с разной степенью подкисления была проанализирована корреляция между фосфатными и кислотно-основными параметрами. Наиболее выраженная связь для большинства фосфатных параметров установлена с показателями pH_{KCl} (r = -0,72-0,82), в меньшей степени с гидролитической кислотностью (r = 0,61-0,73) и насыщенностью основаниями (r = -0,52-0,66, достоверная средняя связь для данной выборки). Содержание и запасы подвижного фосфора коррелировали с кислотно-основными свойствами в большей степени, чем другие показатели.

Заключение. Таким образом, проведенные исследования позволили выявить особенности накопления фосфора (объемы, состав, подвижность) в бурых лесных кислых почвах при длительном возделывании чая в зависимости от доз фосфорных удобрений, выноса урожаем и складывающегося баланса фосфора, а также в связи с изменениями кислотно-основных свойств и элементного состава почвы. При небольших объемах выноса (в среднем 13-23 кг P_2O_5/га в год с урожаем 44-76 ц/га) показана нецелесообразность ежегодного внесения 120 и 180 кг P_2O_5/га с высоким профицитом и низким коэффициентом использования, не приводящего к повышению урожайности и вызывающего зафосфачивание почвы. Установлено, что агрогенное подкисление (с ростом обменного алюминия и выщелачиванием оснований) усиливало характерное для кислых почв закрепление минеральных фосфатов преимущественно в форме фосфатов алюминия при сокращении доли Са-фосфатов. Показан существенный рост содержания легкоподвижных и подвижных фосфатов (и их доли от общего фосфора). Отмечено, что в связи с обратимостью перераспределения соединений фосфора и способностью растений чая усиливать мобилизацию слаборастворимых фосфатов, накопленный почвами фосфор следует рассматривать как потенциально доступный резерв, позволивший в дальнейшем минимизировать применение фосфорных удобрений.

Литература

1. *Авдонин Н.С.* Повышение плодородия кислых почв. – М.: Колос, 1969. – 304 с.
2. *Агрохимические* методы исследования почв. - М.: Наука, 1975.-656 с.
3. *Баджелидзе А.Ш.* Влияние длительного удобрения чайных плантаций на химический состав почвенных растворов красноземов и золы листьев чая // Бюллетень ВНИИЧиСК. – 1957. – № 2. – С. 51-66.
4. *Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е.* Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021. – № 107. – С. 92-115.
5. *Владыченский А.С.* Особенности горного почвообразования. – М.: Наука, 1998. – 189 с.
6. *Гинзбург К.Е.* Фосфор основных типов почв СССР. – М.: Наука, 1981. – 244 с.
7. *Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М.* Агробиогеохимический цикл фосфора. – М.:, 2012. – 512 с.
8. *Козлова Н.В., Керимзаде В.В.* Обеспеченность фосфором почв многолетних агроценозов чая в условиях влажных субтропиков России // Субтропическое и декоративное садоводство. – 2022. – № 83. – С. 198-214.
9. *Козлова Н.В., Керимзаде В.В.* Скорость агрогенной ацидизации бурых лесных почв чайных плантаций в условиях влажных субтропиков России // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – № 51. – С. 259-267.
10. *Малюкова Л.С.* Оптимизация плодородия почв и применения минеральных удобрений при выращивании чая в России. – Сочи: ВНИИЦиСК, 2014. – 416 с.
11. *Налиухин А.Н., Кирпичников Н.А., Бижан С.П., Гусева Ю.Е.* Эффективность фосфорных удобрений: результаты исследований в длительных полевых опытах России, Великобритании и Китая // Агрохимия. – 2024. – № 12. – С. 89-100.
12. *Пухальская Н.В.* Проблемные вопросы алюминиевой токсичности // Агрохимия. – 2005. – № 8. – С. 70-82.
13. *Сычев В.Г., Кирпичников Н.А.* Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. – М.: ВНИИА, 2009. – 176 с.
14. *Яковлева О.В.* Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2018. – № (3). – С. 315-331.
15. *Bojórquez-Quintal E., Escalante-Magaña C., Echevarría-Machado I., Martínez-Estévez M.* Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils // Frontiers in Plant Science. – 2017. – Vol. 8. – Art. 1767.
16. *Fresne M., Jordan P., Fenton O., Mellander P.E., Daly K.* Soil chemical and fertilizer influences on soluble and medium-sized colloidal phosphorus in agricultural soils // Science of the total environment. – 2021. – V. 754. – 142112.
17. *Neumann G., Römheld V.* Rhizosphere Chemistry in Relation to Plant Nutrition // Mineral Nutrition of Higher Plants. – 2012. – V. 3. – P. 347-368.

18. *Salehi S.Y., Hajiboland R. A* high internal phosphorus use efficiency in tea (Camellia sinensis L.) plants // Asian Journal of Plant Sciences. – 2008. – V. 7(1). – P. 30-36.

19. *Yan P., Shen C., Fan L., Li X., Zhang L., Zhang L., Han W.* Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2018. – V. 254. – P. 20-25.

PHOSPHORUS BALANCE IN AGROSYSTEMS, PHOSPHATE CONTENT AND COMPOSITION IN SOILS UNDER LONG-TERM FERTILIZED TEA PLANTATIONS ON THE BLACK SEA COAST OF THE WESTERN CAUCASUS

Kozlova N.V. – Candidate of Biological Sciences, Kerimzade V.V.
Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
354002, Sochi, Yana Fabritsiusa str., 2/28, e-mail: kozlovanvagro@yandex.ru

The research was conducted in a long-term experiment with NPK fertilizers applied on tea plants in the humid subtropics of Russia. It was found that when removing 13-23 kg of P_2O_5/ha per year with a yield of 44-76 kg/ha, the annual application of 60, 120, 180 kg of P_2O_5/ha led to a significant accumulation of phosphorus in brown forest acid soils (Dystric Cambisols, SSSA). Over the past 26 years, its total content has increased by 2-3/1,5-2,5 (up to 1950-3200/1650-2700 mg/kg, in 0-20/20-40 cm) due to mineral compounds with a stable organic content (550-650 mg/kg). The accumulation of Al-P was predominant, while the proportion of Ca-P decreased. The content of mobile phosphorus increased by 6-14 times (from 6-10 to 20-35% of total phosphorus). The dose of P60 maintained the optimal level for tea plants (400-600 mg/kg); against the background of P120,180, it was excessively high (up to 1100-1200/780-850 mg/kg). The content of easily mobile phosphates increased by 3-15 times, accounting for 0.5-1% of mobile phosphorus (while loosely bound phosphates accounted for 10-15%). Agrogenic acidification of the soil under tea plants significantly affected the change in phosphate parameters. Doses of P120,180 with a low utilization rate and a high proficit, which do not lead to an increase in yield and cause soil overphosphating, are impractical in a multi-year regime. The phosphorus accumulated by the soils is a reserve potentially available for tea plants, which makes it possible to minimize fertilizers application in the future.
Key words: brown forest acid soils, tea agrocenosis, mineral and organic phosphorus, fractional composition of phosphates, phosphorus mobility, yield removal, phosphorus balance, soil overphosphating.