

УДК 631.4+631.8+633.72(470+213.1)

doi: 10.31360/2225-3068-2023-87-143-160

**ПОДВИЖНЫЙ ФОСФОР В ПОЧВАХ ВЛАЖНЫХ  
СУБТРОПИКОВ РФ НА ФОНЕ ДЛИТЕЛЬНОГО  
ПРИМЕНЕНИЯ И ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ФОСФОРНЫХ  
УДОБРЕНИЙ В АГРОЦЕНОЗАХ ЧАЯ**

**Керимзаде В.В., Козлова Н.В.**

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

*Керимзаде В.В. [orcid.org/0000-0001-9288-0399](https://orcid.org/0000-0001-9288-0399)*

*Козлова Н.В. [orcid.org/0000-0002-5669-9493](https://orcid.org/0000-0002-5669-9493)*

Исследования проведены на бурых лесных кислых почвах в условиях влажных субтропиков Черноморского побережья РФ (г. Сочи). В полевом опыте на чайной плантации НРК-удобрения в различных сочетаниях и дозах вносили 26 лет (1986–2011 гг.). С 2012 года внесение удобрений полностью прекращено. Длительное применение фосфорных удобрений в дозах 60-120-180 кг/га (в сочетаниях с НК) привело к повышению содержания подвижного фосфора (в однократной кислотной вытяжке по Ониани) и общего его за-

паса (по сумме 10-ти последовательных вытяжек) в среднем до 620-1125-1210 и 1180-2090-2650 мг  $P_2O_5$ /кг почвы, соответственно, в слое 0–20 см. Эти показатели характеризовали фосфатную ёмкость почв под чаем, что было в 5–9–12 раз выше почвы леса (фон). Доля однократной вытяжки в общем запасе увеличилась с 30 до 38–45 %, а фосфатная буферность (соотношение  $P_2O_5$  однократной и многократных вытяжек) снизилась с 3,5 до 2,6–2,2. Степень подвижности фосфатов (или фактор интенсивности по концентрации  $P_2O_5$  в слабосолевой вытяжке) выросла относительно фона в 3–10–15 раз и составила 0,45–1,70–2,33 мг/л. Спустя 8–10 лет после отмены удобрений на фоне последействия 1–2–3-кратных доз общий запас подвижного фосфора сократился в 1,4–1,5 раза (на 360–650–700 мг/кг, соответственно). Содержание  $P_2O_5$ , извлекаемое однократной вытяжкой, снизилось в 1,5–2 раза (на 210–370–430 мг/кг, соответственно), опустившись на фоне последействия 1-кратных доз до исходного уровня (380 мг/кг при закладке плантации), а на фоне последействия 2–3-кратных доз всё ещё в 1,5–2,2 раза превышая его. Степень подвижности фосфатов снизилась в 2,4–3,4 раза, на фоне последействия 1-кратных доз почти до фонового уровня, а 2–3-кратных доз пока еще превышала его в 3–4,5 раза. Фосфатная буферность имела тенденцию к повышению, но в пределах 0,1–0,2 единиц.

**Ключевые слова:** подвижный фосфор, фактор ёмкости, фактор интенсивности, фосфатная буферность, бурые лесные кислые почвы, чайные плантации, влажные субтропики, минеральные удобрения, последействие.

**Введение.** Изучение фосфатного статуса почв, оценка уровня обеспеченности почвы фосфором, его поглощения и подвижности, доступности растениям является одной из важных проблем агрохимической науки [3, 4, 15]. Фосфатный режим почв и степень доступности фосфора растениям зависит от химических, физико-химических, физических свойств каждого конкретного генетического типа почвы, сезонной динамики её водного, воздушного, теплового режимов, разнообразия и активности почвенного микробного сообщества, биологических особенностей произрастающих растений, агротехнических условий их возделывания (в т. ч. систем применения удобрений) [3, 4]. Процессы превращения фосфора в почве, зависящие от всех вышеперечисленных факторов, очень разнообразны и обусловлены степенью дисперсности, реакцией среды, содержанием в твёрдой фазе почвы и её растворе кальция, полуторных окислов и активной кремнекислоты, и др.

Действительное, эффективное плодородие почв в отношении фосфора традиционно определяется запасом растворимых, подвижных фосфатов, которые составляют различные формы, участвующие в динамическом равновесии между твёрдыми фазами почвы и её раствором. По степени

участия в фосфорном питании растений можно выделить две основные группы: 1) фосфаты, осажденные или адсорбированные на поверхности твердых фаз почвы, способные при нарушении фосфатного равновесия (при поглощении фосфора растениями, внесении с удобрениями) переходить в почвенный раствор и обратно – общий резерв потенциально доступных почвенных фосфатов; 2) фосфаты почвенного раствора, полностью доступные растениям в текущий момент вегетации [1, 3, 4].

Фосфатный режим почв агроценозов при окультуривании и внесении фосфорных удобрений во многом определяет физико-химическое поглощение фосфат-ионов удобрений, которое осуществляется довольно быстро, при этом сорбированные почвой ионы некоторое время сохраняют мобильность и способны к десорбции. В то же время почвы способны довольно быстро поглощать поступивший с удобрениями фосфор с образованием труднорастворимых соединений, недоступных для питания растений [3, 4].

Как правило, при производственных обследованиях почв и в базовых агрохимических исследованиях оценивают содержание подвижных фосфатов, применяя различные методы их извлечения с помощью кислотных, щелочных или буферных растворов (в зависимости от типа почвы) [1, 16]; для каждого из них разработаны соответствующие градации обеспеченности почв фосфором. Считается, что выделенная таким образом фракция  $P_2O_5$  характеризует количество доступных фосфатов – т. е. фосфатную ёмкость почвы (употребляют термин «фактор ёмкости»). При этом однократной вытяжкой не завершается полнота извлечения подвижных фосфатов, выделяется только наиболее растворимая часть их общего запаса, характеризуя лишь определённую меру обеспеченности почвы фосфором. Поэтому также используют извлечение подвижных фосфатов серией многократных последовательных вытяжек (с теми же экстрагирующими растворами, что и в общепринятых стандартных методах) [3, 12]. В этом случае сумма всего извлечённого фосфора будет характеризовать фактор ёмкости почв, а  $P_2O_5$  стандартной однократной вытяжки – только степень его подвижности; соотношение между ними отражает буферность почв к фосфатам [3].

По мнению ряда исследователей, обеспеченность почв подвижным фосфором лучше характеризует концентрация фосфатов в почвенном растворе (краткий обзор по этому вопросу представлен в [3]). Он может служить критерием способности перехода фосфатов из почвы в раствор, а значит и их доступности растениям, и более приемлем для характеристики плодородия почв в отношении фосфора. Но поскольку выделение почвенного раствора очень сложно и трудоёмко, то в качестве адекватного аналога по условиям превращения

фосфора предложено использовать водные и слабосолевые вытяжки при узком отношении почвы к раствору [1, 3, 16]. Определяемые таким способом величины характеризуют степень подвижности доступных фосфатов и интенсивность пополнения  $P_2O_5$  в почвенном растворе. Они получили общепринятое уже название «фактор интенсивности», а Н.П. Карпинский и В.Б. Замятина (1958, цитируется по [3]) использовали понятие «фосфатный уровень» почвы.

Безусловно сопряжённый анализ всего комплекса вышеперечисленных показателей даёт возможность более полного понимания фосфатного состояния почвенных систем, что актуально при углубленных почвенно-агрохимических исследованиях.

Изучению фосфатного статуса уникальных почв влажно-субтропической зоны России (Черноморское побережье Западного Кавказа) в связи с возделыванием чайных плантаций – основной промышленно значимой культуры региона, эксклюзивного с точки зрения возможности чаепроизводства в России, посвящена целая серия работ. В них рассматриваются многолетняя динамика содержания подвижного фосфора в почвах в зависимости от доз, длительности применения и общей нагрузки фосфорными удобрениями; уровни обеспеченности фосфором производственных плантаций региона; особенности изменения фракционного состава фосфатов в почвах; объёмы потребления и выноса фосфора растениями чая; эффективность фосфорных удобрений и оптимизация доз, и др. [2, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 20].

Проблема обеспеченности почв фосфором, поиск методов её диагностики, оценка эффективности и безопасности применения различных видов фосфорных удобрений, подвижность фосфора в почвах и доступность его растениям чая, сортовые особенности поглощения, приёмы мобилизации фосфатов, влияние на качественные показатели сырья и готового продукта являются актуальными вопросами современных исследований в различных чаепроизводящих регионах мира [18, 19, 21–23, 25, 26].

Специфика почв, используемых для выращивания чая на Сочинском побережье Чёрного моря (кислые и сильнокислые, тяжелосуглинистые и глинистые, с высоким содержанием оксидов/гидроксидов железа и алюминия, что согласно [4] определяет высокую степень поглощения фосфора) приводит к значительному накоплению в них фосфора, часто выраженному зафосфачиванию, существенному изменению баланса и соотношения различных форм фосфатов, снижению эффективности фосфорных удобрений [2, 5, 11, 14]. Содержание подвижного фосфора, которое в первую очередь увеличивается при внесении удобрений [4, 15], даёт лишь частичное представление о фосфатном режиме и действительном

уровне обеспеченности почв. Поэтому в рамках более детального изучения поведения фосфора в зональных почвах, обоснования рационального применения фосфорных удобрений в многолетних агроценозах чая актуально изучение широкого комплекса показателей обеспеченности почв фосфором (содержание и общий запас подвижного фосфора – показатели фактора ёмкости; степень его подвижности по концентрации в почвенном растворе – фактор интенсивности; фосфатная буферность) в зависимости от нагрузки фосфорными удобрениями и на фоне их длительного последствия, что и являлось *целью данной работы*.

**Объекты и методы исследования.** Исследовали фосфатный статус бурых лесных кислых почв (согласно [6]), сформированных на элюводелювии кислых глинистых сланцев – аргиллитов. В структуре сельхозугодий г. Сочи около 60 % площади всех чайных насаждений заложены именно на кислых бурозёмах [2], поскольку они являются одними из лучших чаепригодных почв региона. Обеспеченность почв фосфором при длительном применении фосфорных удобрений, а затем в их отсутствии, изучали на примере модельных чайных плантаций, сформированных в строго контролируемых условиях длительного полевого многофакторного опыта с NPK-удобрениями. Опыт был заложен в 1986 году на молодой чайной плантации (сорт 'Колхида', 1983 года посадки) на территории ЗАО «Дагомысчай», в окрестностях пос. Уч-Дере (Лазаревский р-н г. Сочи, координаты участка: 43,69° N и 39,64° E). Схема опыта составляла 1/4 (4\*4\*4) полной факториальной схемы, включала 16 различных сочетаний доз NPK в 4-х градациях (0, 1, 2, 3-одинарные дозы), где одинарные дозы азотных удобрений увеличивались по мере роста габитуса растений, а для фосфорных и калийных удобрений были постоянными (табл. 1). Ежегодное внесение удобрений по схеме опыта продолжалось в течение 26 лет (1986–2011 гг.); общее количество внесённых за этот период фосфорных удобрений, при диапазоне доз от 0 до 60–180 кг д.в./га, составило до 1,6–4,7 тонн  $P_2O_5$ /га. С 2012 года внесение удобрений в опыте полностью прекращено, начато изучение состояния и плодородия почв на фоне последствия удобрений.

Уровень обеспеченности почв фосфором оценивали по содержанию подвижных фосфатов, традиционно извлекаемых однократной кислотной вытяжкой (соответствующим типу почв методом) и общему их запасу, извлекаемому аналогичными многократными последовательными вытяжками. Эти показатели характеризуют фосфатную ёмкость (фактор ёмкости). Степень подвижности фосфатов (фактор интенсивности или фосфатный уровень) оценивали по концентрации наиболее подвижных (легкоподвижных) фосфатов в слабосолевой вытяжке.

Таблица 1. Дозы и общее количество минеральных NPK-удобрений в опыте

Table 1. Doses and total amount of mineral NPK fertilizers in the experiment

Доза код*	Азотные					Фосфорные		Калийные	
	Дозы по периодам, кг д.в./га в год				Σ за 1986–2011 гг., т д.в./га	Дозы, кг д.в./га в год	Σ за 1986–2011 гг., т д.в./га	Дозы, кг д.в./га в год	Σ за 1986–2011 гг., т д.в./га
	1986–1988 гг.	1989–1992 гг.	1993–1999 гг.	2000–2011 гг.					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	70	90	120	200	3,8	60	1,6	50	1,3
2	140	180	240	400	7,6	120	3,1	100	2,6
3	210	270	360	600	11,4	180	4,7	150	3,9

Примечание: \* – NPK в 4-х градациях: 0-, 1-, 2-, 3-одинарные дозы; повторность в опыте 2-кратная, размер опытных делянок 50 м<sup>2</sup>

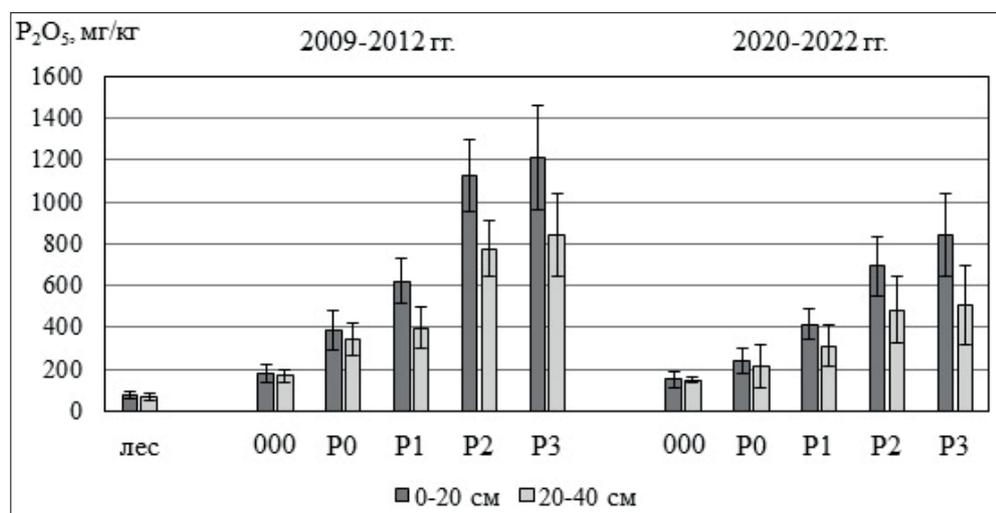
Показатели, достигнутые в результате длительного применения различных доз фосфорных удобрений (в сочетании с НК), оценивали по архивным данным и путём анализа архивных образцов 2009–2012 гг., т. е. заключительного этапа активной фазы опыта с внесением удобрений. С ними сравнивали показатели 2020–2022 гг., т. е. спустя 8–10 лет после полной отмены применения удобрений. Также сравнение вели с фоном – почвой буково-грабового леса, сопряжённого с опытным участком, и с исходным уровнем обеспеченности фосфором почвы участка при закладке опыта. Учитывались показатели контрольного варианта опыта (000-без удобрений).

Анализировали образцы почв верхних горизонтов (0–20 и 20–40 см), представляющих в совокупности основной корнеобитаемый слой, которые отбирали ежегодно ранней весной по вариантам опыта и в лесу.

При проведении лабораторных исследований использовали общепринятые методики [1, 16]. Подвижный фосфор определяли по методу Ониани (экстракция 0,1 н. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при соотношении почва : раствор = 1 : 25), являющемуся стандартным методом при анализе кислых субтропических почв, а также базовым для оценки фосфатной обеспеченности почв применительно к культуре чая (согласно [13]). Для определения общего запаса подвижных фосфатов после получения первой вытяжки по Ониани производили серию последовательных

вытяжек в количестве 10 шт. (также с экстракцией 0,1 н.  $H_2SO_4$ ), заливая каждый раз одну и ту же пробу почвы в воронке на фильтре необходимым количеством экстрагирующего раствора. Концентрацию легкоподвижного фосфора определяли по методу Карпинского и Замятиной (экстракция 0,03 н.  $K_2SO_4$  при соотношении почва : раствор = 1 : 5), предложенного для определения степени подвижности фосфатов (фосфатного уровня или фактора интенсивности) на кислых и нейтральных почвах. Во всех случаях содержание  $P_2O_5$  в полученных экстрактах (с последующим пересчётом на кг почвы) количественно определяли с колориметрическим окончанием по Дениже в виде фосфорно-молибденового синего комплекса (прибор УСФ-01, Россия).

Обработка полученных экспериментальных данных, а также их визуализация выполнены в программе Microsoft Excel (при  $P = 0,95$ ). В диаграмме (рис. 1) представлены средние  $\pm$  стандартные отклонения. Варианты группировались по ведущему фактору – доза фосфорных удобрений. Для обозначения вариантов или групп вариантов использованы коды по количеству одинарных доз соответствующих элементов (N, P, K) в период применения удобрений (согласно схеме, табл. 1).



**Рис. 1.** Обеспеченность почв модельных чайных плантаций подвижным фосфором (по Ониани) в зависимости от доз P-удобрений (в различных сочетаниях с NK) на завершающем этапе (2009–2012 гг.) их многолетнего внесения на фоне 8–10 лет последействия (2020–2022 гг.)

**Fig. 1.** Soils' supply with mobile phosphorus in model tea plantations (according to Oniani) depending on P-fertilizers doses (in various combinations with NK) at the final stage (2009–2012) of their long-term application and against the background of 8–10-year long aftereffect (2020–2022)

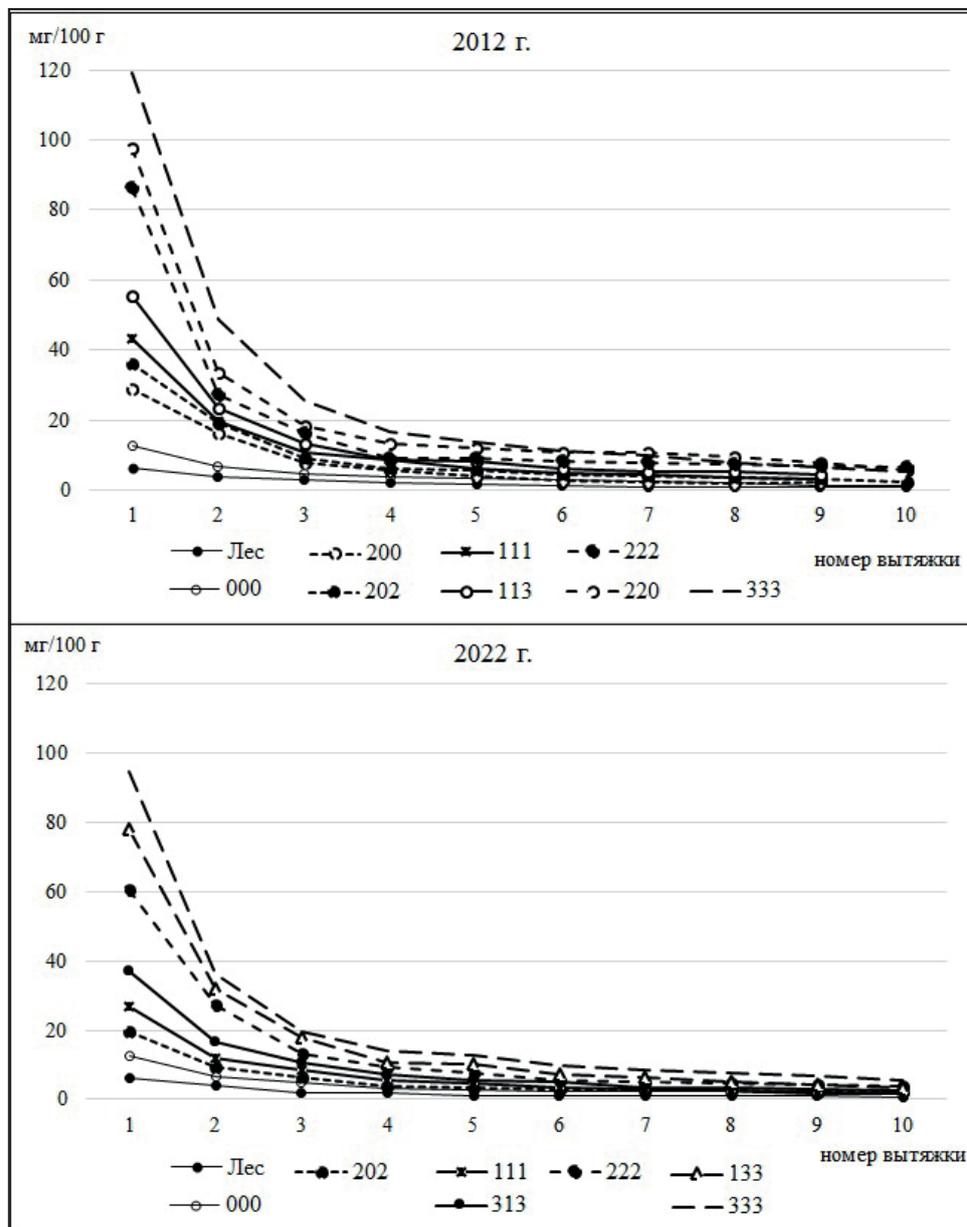
**Результаты и их обсуждение.** Многолетняя динамика изменения обеспеченности почв модельных чайных плантаций многофакторного опыта по содержанию подвижного фосфора в зависимости от доз, длительности применения и общей нагрузки фосфорными удобрениями, а также на фоне их последствий подробно представлена в ранее опубликованных материалах [11, 20]. Остановимся на констатации итоговых результатов, достигнутых за весь период применения удобрений. Исходно уровень содержания подвижных фосфатов (по Ониани) в почве опытного участка перед закладкой плантации был значительно повышен (до 320–380 мг/кг в слое 0–40 см, относительно естественного уровня под лесом 60–100 мг/кг) в результате окультуривания почвы с плантажной вспашкой и внесением повышенных доз фосфорных удобрений (в запас). Ежегодное внесение 60–120–180 кг  $P_2O_5$ /га в течение 26 лет (всего внесено 1,6–3,1–4,7 т  $P_2O_5$ /га) привело к 1,5–3-кратному повышению исходного уровня содержания подвижных фосфатов (в среднем соответственно на 240–740–830/80–460–520 мг/кг, в слое 0–20/20–40 см); естественный уровень был превышен в 7–13 раз (рис. 1). При интенсивном азотном и азотно-калийном питании без внесения фосфорных удобрений (группа P0) сохранился близкий к исходному уровень содержания подвижного фосфора. Он поддерживался за счёт биогенной аккумуляции фосфора при разложении большого объёма растительной биомассы, ежегодно остававшейся в междурядьях после подрезки высокопродуктивных (за счёт интенсивного азотного питания) чайных шпалер. Повышенное содержание подвижного фосфора также может быть связано с повышенной кислотностью почв, которая характерна для интенсивно удобряемых азотом плантаций [10, 17, 24]; подкисление ризосферы аммонием может усилить мобилизацию слаборастворимых фосфатов Ca и тем самым увеличить поглощение P [22]). На контрольном варианте (000-без удобрений) содержание подвижного фосфора снизилось относительно исходного в 1,5–2 раза, что связано с его отчуждением при формировании скелетно-каркасной древесины и корневых систем растений. Известно, что фосфор в больших объёмах закрепляется в биомассе растений (около 1 800 кг/га фосфора для развитой полновозрастной плантации [7]). Однако все же обеспеченность фосфором почв контрольного варианта превышала фоновый уровень в 2 раза.

Спустя 8–10 лет после консервации опыта на вариантах, ранее удобрявшихся двойными или тройными дозами фосфорных удобрений (группы P2 и P3), в их отсутствии содержание подвижных  $P_2O_5$  упало в 1,5–2 раза (или соответственно в среднем на 370–430/290–340 мг/кг в слое 0–20/20–40 см), однако оно всё ещё в 1,5–2,2 раза превышало исходное при закладке опыта (рис. 1). На вариантах, ранее удобрявшихся одинарными дозами (группа P1), также выявлено снижения обеспеченности в 1,5 раза (или

на 210/90 мг/кг в слое 0–20/20–40 см) относительно ранее достигнутого уровня; содержание подвижного фосфора здесь вернулось к исходному при закладке опыта (380/320 мг/кг). На вариантах, ранее удобрявшихся азотом и не удобрявшихся фосфором (группа P0), но имевших повышенное относительно контроля содержание подвижных  $P_2O_5$ , отмечено его 1,5-кратное снижение (или на 145/130 мг/кг в слое 0–20/20–40 см), связанное с падением продуктивности плантаций и снижением степени подкисления почв (как показано в [8, 20]) в отсутствии азотных удобрений. На контрольном варианте (000) не выявлено существенных изменений по уровню обеспеченности почвы подвижным фосфором, отмечена лишь слабая тенденция снижения (рис. 1). При высокой потребности растений чая в фосфоре в молодом возрасте, в последующем отмечается его невысокий вынос урожаем (всего 12–25 кг/га  $P_2O_5$  даже при высокой урожайности плантаций 5–8 т/га) [7].

Для оценки общего запаса подвижных фосфатов в исследуемых почвах на фоне действия и последствий удобрений методом многократных последовательных кислотных вытяжек (фактор ёмкости), а также изучения степени подвижности фосфатов в слабосолевом растворе (фосфатный уровень или фактор интенсивности) выбрали серию образцов почв 2012 и 2022 гг. (слой 0–20 см) нескольких вариантов опыта с разными (контрастными) нагрузками удобрениями и уровнем обеспеченности подвижным фосфором (по Ониани). Динамика извлечения из них  $P_2O_5$  серией последовательных вытяжек отражена на рисунке 2, а весь комплекс показателей обеспеченности фосфором и его подвижности для исследованных почв представлен в таблице 2.

Расчёт суммарного количества подвижного фосфора, извлеченного десятию последовательными вытяжками, показал, что в результате длительного применения 1-2-3-кратных доз фосфорных удобрений общий запас потенциально доступных растениям подвижных фосфатов в верхнем слое почвы чайной плантации возрос в 5–9–12 раз (или на 850–1870–2430 мг/кг, соответственно) относительно фонового уровня под лесом (табл. 2). При этом доля  $P_2O_5$ , извлечённого однократной вытяжкой (стандартно по методу Ониани) увеличилась в 1,3–1,6 раза и составила 38–45 % от суммарного запаса. На фоне биогенного накопления фосфора в почвах высокоурожайных плантаций без фосфорных удобрений, но с интенсивным азотным питанием, фосфатная ёмкость повысилась относительно фона в 3,8 раза (или на 610 мг/кг); доля однократной вытяжки выросла в 1,3 раза и достигла 37–38 %. На контрольном варианте (без удобрений), где содержание подвижного фосфора снизилось относительно исходного в 2 раза, но все же в 2 раза превышало фоновый уровень, общий запас подвижных фосфатов также был в 2 раза выше; доля однократной вытяжки была сопоставима с фоном (табл. 2).



**Рис. 2.** Динамика извлечения  $P_2O_5$  серией многократных последовательных вытяжек из почв модельных плантаций чая при длительном применении удобрений (в образцах 2012 г.) и на фоне их 10-летнего последействия (в образцах 2022 г.)

**Fig. 2.** Dynamics of extraction of  $P_2O_5$  by a series of multiple successive extracts from the soils under model tea plantations with prolonged fertilizers use (in 2012 samples) and against the background of their 10-year aftereffect (in 2022 samples)

**Таблица 2. Показатели обеспеченности подвижным фосфором почв модельных чайных плантаций на фоне длительного применения удобрений и их последействия**

**Table 2. Indicators of soils' supply with mobile phosphorus in model tea plantations against the background of long-term fertilizers use and their aftereffects**

Варианты опыта (код НРК)	Подвижный фосфор, извлечённый 0,1 н. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (фактор ёмкости)			Фосфатная буферность (ФБ = М/О)	Концентрация легкоподвижного фосфора (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), извлечённого 0,03 н. K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (фактор интенсивности)
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1-ой вытяжки (О)	Сумма P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 10-ти вытяжек (М)	Доля P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1-ой вытяжки (О от М)		
	мг/кг		%		мг/л
Средние фоновые и контрольные показатели (слой 0–20 см)					
Лес (фон)	64	222	29	3,5	0,16
000 (контроль)	126	420	30	3,3	0,15
На фоне длительного применения удобрений (2012 г., слой 0–20 см)					
200	270	727	37	2,7	0,31
202	363	945	38	2,6	0,41
111	433	1073	40	2,5	0,38
113	496	1289	38	2,6	0,52
220	976	2191	45	2,2	1,96
222	864	1995	44	2,3	1,43
333	1194	2650	45	2,2	2,33
На фоне 10-летнего последействия удобрений (2022 г., слой 0–20 см)					
202	196	551	36	2,8	0,18
111	280	701	38	2,6	0,16
313	369	944	39	2,6	0,22
222	603	1421	42	2,4	0,51
133	781	1753	45	2,2	0,64
333	947	2155	44	2,3	0,72

В результате 10-летнего отсутствия 1-2-3-кратных доз фосфорных удобрений общий запас подвижного фосфора сократился в 1,4–1,5 раза (или на 360–650–700 мг/кг, соответственно). Доля  $P_2O_5$ , извлекаемого однократной вытяжкой, в общем запасе снизилась незначительно – на 1–2 % (табл. 2). В почве вариантов, ранее не удобрявшихся фосфором, но имевших повышенную обеспеченность им в результате биогенного накопления (при высокой продуктивности чая на фоне азотных удобрений) также произошло снижение содержания общего запаса в среднем в 1,5 раза (или на 280 мг/кг, соответственно). Доля однократной вытяжки от общего запаса осталась практически прежней (36 %). На контрольном варианте, на фоне многолетнего последствия удобрений, внесённых только при закладке плантации, существенных изменений показателей в сравнении с предыдущими не выявлено, поэтому представлены усреднённые данные 2012 и 2022 гг. (табл. 2).

Определение фосфатного уровня (фактора интенсивности) исследуемых почв по концентрации  $P_2O_5$  в слабосолевом растворе (0,03 н.  $K_2SO_4$ , по Карпинскому и Замятиной) показало, что степень подвижности фосфатов в почвах при применении фосфорных удобрений (как и содержание подвижного фосфора и общий его запас в почвах) повышалась в зависимости от доз P-удобрений (табл. 2). На фоне 1-2-3-кратных доз превышение относительно фонового уровня (почва леса) составило в среднем 3–10–15 раз. Более чем 2-кратное превышение установлено и на вариантах без фосфорных удобрений, но с интенсивным азотным питанием, что подтверждает ранее сделанные выводы о повышенной фосфатной обеспеченности таких почв за счёт биогенного накопления и роста подвижности фосфатов при подкислении почв. На контрольном варианте (000-без удобрений) степень подвижности фосфатов была сопоставима с фоном.

Авторы метода (Карпинский и Замятина (1958), цитируется по [1]) установили следующие ориентировочные индексы обеспеченности по фосфору для почв нечернозёмной полосы (мг  $P_2O_5$  на 1 л): очень низкая – 0,01–0,03; средняя – 0,06–0,08; высокая –  $> 0,2$ . Используя эти градации, обеспеченность исследованной почвы фона (под лесом) и контрольного варианта (без удобрений) можно характеризовать как повышенную, поскольку она выше средней, но не достигает высокой. Все почвы модельных чайных плантаций в период внесения удобрений относятся к категории высоко и очень высокообеспеченных, а показатель 2 мг/л и более (т. е. 10-кратно превышающий индекс высокой обеспеченности 0,2 мг/л), отмеченный у почв на фоне 2–3-кратных доз P-удобрений, можно характеризовать как избыточно высокую обеспеченность.

В результате 10-летнего отсутствия фосфорных удобрений произошло заметное снижение степени подвижности фосфатов в почвах, в среднем в 2,4–3,4 раза; снижение было тем более выражено, чем выше были ранее вносимые и отмененные затем дозы Р-удобрений (табл. 2). При этом на фоне последействия 2-кратных и 3-кратных доз ещё сохранилось 3–4, 5-кратное превышение относительно контрольного и фонового уровней. На фоне последействия одинарных доз фосфора отмечено снижение до уровня близкого к контрольному/фоновому, также как и на варианте 202, в прошлом имевшего 2-кратное повышение подвижности фосфатов на фоне интенсивного азотного питания без фосфорных удобрений.

Также рассмотрим ещё один показатель, характеризующий фосфатное состояние почвы. Соотношение суммы  $P_2O_5$ , извлечённого многократными последовательными вытяжками (М) к содержанию  $P_2O_5$ , извлечённого однократной первой вытяжкой (О), согласно [3] может служить показателем буферности почв к фосфатам, если считать, что в данном случае М – показатель фактора ёмкости, а О – показатель фактора интенсивности. Это относительный, безразмерный показатель, который отражает фосфатный потенциал почв: как степень насыщенности почв потенциально доступным фосфором, так и способность восполнения подвижных фосфатов по мере их использования. Он может быть использован в качестве интегрального показателя при сравнении даже разнотипных по свойствам и генезису почв.

Из исследованных почв наиболее высокой фосфатной буферностью характеризовалась почва естественного лесного ценоза (фона), имевшая самые низкие показатели обеспеченности доступным фосфором (табл. 2). Немного более низкой (на 0,2 единицы) относительно фона (почвы леса) была буферность почвы на контрольном варианте (без удобрений), который относительно фона имел несколько более высокие показатели по запасу и содержанию подвижного фосфора, степени его подвижности. Почва вариантов с длительным внесением фосфорных удобрений, имевшая значительно повышенный уровень обеспеченности почв фосфором по всем показателям (фактор ёмкости по общему запасу и содержанию подвижного фосфора, фактор интенсивности по концентрации  $P_2O_5$  в почвенном растворе) имела значительно более низкую фосфатную буферность. В зависимости от применявшихся доз Р-удобрений она снизилась на 0,9–1,3 единицы относительно фона; чем выше были дозы, тем сильнее было снижение буферности. При биогенном накоплении фосфатов в почвах с интенсивным азотным питанием без фосфорных удобрений, также отмечено снижение фосфатной буферности верхнего почвенного слоя – на 0,8–0,9 единиц (табл. 2).

Следовательно, внесение фосфорных удобрений и биогенное накопление насыщало почву фосфором, повышая общий запас доступных фосфатов и содержание наиболее подвижной их части, обеспечивало поддержание концентрации фосфатов в почвенном растворе на более высоком уровне, однако фосфатная буферность почв при этом снижалась.

На фоне 10-летнего последействия удобрений при выраженном снижении общей фосфатной ёмкости и содержания подвижных фосфатов в почве, а также фосфатного уровня в почвенном растворе, фосфатная буферность показала некоторую тенденцию к повышению, но очень незначительному – в пределах 0,1–0,2 единиц (табл. 2).

**Выводы.** Таким образом, проведённые исследования показали, что *длительное применение фосфорных удобрений* (в различных сочетаниях с НК-удобрениями) при возделывании монокультуры чая в условиях влажных субтропиков РФ привело к существенному росту обеспеченности бурых лесных кислых почв подвижным фосфором. В результате применения 60, 120 и 180 кг  $P_2O_5$ /га в течение 26 лет (всего было внесено соответственно 1,6, 3,1 и 4,7 тонн  $P_2O_5$ /га) содержание подвижного фосфора (фактор ёмкости по однократной кислотной вытяжке методом Ониани) достигло в верхнем почвенном слое (0–20 см) в среднем 620–1125–1210 мг  $P_2O_5$  на кг почвы (соответственно), что превышало фоновый уровень (в среднем 90 мг/кг в почве леса) в 7–13 раз, а исходный при закладке плантации (380 мг/кг) в 1,6–3,2 раза. Общий запас подвижного фосфора (фактор ёмкости по многократным вытяжкам) составил в среднем 1180–2090–2650 мг/кг, что превышало фоновый уровень (220 мг/кг) в 5–9–12 раз. Доля однократной вытяжки увеличилась с 30 до 38–45 %, а фосфатная буферность снизилась с 3,5 до 2,6–2,2. Степень подвижности фосфатов (фосфатный уровень или фактор интенсивности по концентрации  $P_2O_5$  в слабосолевой вытяжке по Карпинскому, Замятиной) выросла в среднем в 3–10–15 раз и составила 0,45–1,70–2,33 мг/л (относительно фона – 0,16 мг/л).

На контрольном варианте (без удобрений) содержание подвижного фосфора снизилось относительно исходного уровня при закладке плантации в 2 раза, однако все же 2-кратно превышало фоновый уровень; общий запас подвижных фосфатов также был в 2 раза выше; доля однократной вытяжки и степень подвижности фосфатов была сопоставима с фоном (30 % и 0,15 мг/л), но фосфатная буферность немного ниже (3,3).

На фоне биогенного накопления фосфора в почвах высокоурожайных плантаций без фосфорных удобрений, но с интенсивным азотным питанием поддерживалось близкое к исходному содержание подвижного

фосфора (в 4 раза выше фонового); общая фосфатная ёмкость (запас) повысилась относительно фона в 3,8 раза и составила в среднем 840 мг/кг; доля однократной вытяжки достигла 37–38 %, а фосфатная буферность снизилась до 2,6–2,7; степень подвижности фосфатов выросла относительно фона более чем в 2 раза (в среднем до 0,36 мг/л).

В результате 8-10-летнего отказа от применения фосфорных удобрений было отмечено снижение ранее достигнутого уровня обеспеченности почв подвижным фосфором. На фоне последствия 1–2–3-кратных доз общий запас подвижного фосфора сократился в 1,4–1,5 раза (или на 360–650–700 мг/кг, соответственно); содержание  $P_2O_5$ , извлекаемое однократной вытяжкой снизилось в среднем в 1,5–2 раза (или на 210–370–430 мг/кг, соответственно), опустившись на фоне последствия 1-кратных доз до исходного уровня (380 мг/кг при закладке плантации), а на фоне последствия 2–3-кратных доз всё ещё в 1,5–2,2 раза превышая его; степень подвижности фосфатов (фосфатный уровень или фактор интенсивности) снизилась в 2,4–3,4 раза, опустившись на фоне последствия 1-кратных доз почти до фонового уровня, но на фоне последствия 2–3-кратных доз была пока ещё в 3–4,5 раза выше.

В почве вариантов, ранее не удобрявшихся фосфором, но имевших повышенную обеспеченность им в результате биогенного накопления (при высокой продуктивности чая на фоне азотных удобрений) также произошло снижение содержания подвижного фосфора и его общего запаса в среднем в 1,5 раза (или на 145 и 280 мг/кг, соответственно), степени подвижности фосфатов – в 2 раза (до уровня, близкого к фоновому). Это связано с падением продуктивности плантаций, снижением степени подкисления почв в результате длительной отмены удобрений.

Во всех случаях при снижении показателей обеспеченности почв фосфором доля однократной вытяжки от общего запаса осталась почти прежней (36–45 %), снизившись на 1–2 %; фосфатная буферность показала тенденцию к повышению, но в пределах 0,1–0,2 единиц.

На контрольном варианте, на фоне многолетнего последствия удобрений, внесённых только при закладке плантации, существенных изменений уровня обеспеченности почв фосфором за последний 8–10-летний период не выявлено.

*Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СЦ РАН FGРW-2021-0010, № госрегистрации 122032400081-5*

Список литературы/References

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с. [Agrochemical methods of soil research. M.: Nauka, 1975; 656 p. (In Rus)].
2. Беседина Т.Д. Агрогенная трансформация почв влажных субтропиков России под культурой чая. Краснодар: КубГАУ, 2004; 169 с. [Besedina T.D. Agrogenic transformation of soils in humid subtropics of Russia under tea culture. Krasnodar: KubGAU, 2004; 169 p. (In Rus)].
3. Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. Выпуск 2. Фосфор и фосфорные удобрения (В.Г. Сычев, Б.А. Сушеница и др.). М.: ВНИИА, 2006; 40 с. [Bulletin of the Geographical Network of Experiments with Fertilizers. Issue 2. Phosphorus and phosphate fertilizers (V.G. Sychev, B.A. Sushenitsa and others). M.: VNIIA, 2006; 40 p. (In Rus)]. ISBN: 5-9238-0064-0.
4. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М. Агробιοгеохимический цикл фосфора. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012; 512 с. [Ivanov A.L., Sychev V.G., Derzhavin L.M. Agrobiogeochemical cycle of phosphorus. M.: Printing house of the Russian Agricultural Academy, 2012; 512 p. (In Rus)].
5. Керимзаде В.В. Фракционный состав минеральных фосфатов бурых лесных кислых почв чайных плантаций при длительном применении минеральных удобрений: Научные исследования в субтропиках России: сб., Сочи: ВНИИЦиСК, 2013; 136-146. [Kerimzade V.V. Fractional composition of mineral phosphates in acid brown forest soils with tea plantations at long application of mineral fertilizers: Scientific research in the subtropics of Russia: sat., Sochi: RRIF SC, 2013; 136-146. (In Rus)].
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1997; 224 с. [Classification and diagnostics of soils of the USSR. M.: Kolos, 1997; 224 p. (In Rus)].
7. Козлова Н.В., Малюкова Л.С. Фосфор в системе «почва – чайное растение» в условиях субтропиков России, Субтропическое и декоративное садоводство. 2010; 43-1 : 33-41. [Kozlova N.V., Malyukova L.S. Phosphorus in the soil – tea plant system in the subtropical conditions of Russia, Subtropical and ornamental horticulture. 2010; 43-1 : 33-41. (In Rus)].
8. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Изменение кислотно-основных свойств агрогенно-подкисленных бурых лесных почв после снятия нагрузки удобрениями, Агрохимический вестник. 2021; 5 : 46-53. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. Changes in the acid-base properties of agrogenically acidified brown forest soils after removing the load of fertilizers, Agrochemical Herald. 2021; 5 : 46-53. (In Rus)]. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-009.
9. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Обеспеченность фосфором почв многолетних агроценозов чая в условиях влажных субтропиков России, Субтропическое и декоративное садоводство. 2022; 83 : 198-214. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. Provision of phosphorus in soils of perennial agrocenoses of tea in the conditions of humid subtropics of Russia, Subtropical and ornamental horticulture. 2022; 83 : 198-214. (In Rus)]. DOI: 10.31360/2225-3068-2022-83-198-214.
10. 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 : 259-267. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. The rate of agrogenic acidization of brown forest soils of tea plantations in the humid subtropics of Russia, Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2017; 51 : 259-267. (In Rus)].
11. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Фосфатный режим бурых лесных кислых почв субтропиков РФ при эксплуатации чайных плантаций с различной нагрузкой удобрениями, Плодоводство и ягодоводство России. 2018; 54 : 246-253. [Kozlova N.V., Kerimzade V.V. Phosphate regime of brown forest acidic soils of the subtropics of the Russian Federation during the operation of tea plantations with various loads of fertilizers, Pomiculture and

- small fruits culture in Russia. 2018; 54 : 246-253. (In Rus)]. DOI: 10.31676/2073-4948-2018-54-246-253.
12. Лупина А.А., Чумаченко И.Н., Сушеница Б.А., Касицкий Ю.И. Исследование процессов трансформации биогенных элементов в карбонатных почвах с использованием современных методов. М.: ЦИНАО, 2003. 164 с. [Lupina A.A., Chumachenko I.N., Sushenitsa B.A., Kasitsky Yu.I. Study of the processes of transformation of biogenic elements in carbonate soils using modern methods. M., TsINAO, 2003. 164 p. (In Rus)].
13. Малюкова Л.С. Оптимизация плодородия почв и применения минеральных удобрений при выращивании чая в России. Сочи: ВНИИЦиСК, 2014, 416 с. [Malyukova L.S. Optimization of soil fertility and the use of mineral fertilizers in tea cultivation in Russia. Sochi: RRIF SC, 2014, 416 p. (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-22-9.
14. Малюкова Л.С., Козлова Н.В. Эффективность применения фосфорных удобрений при выращивании чая в условиях Черноморского побережья России, Субтропическое и декоративное садоводство. 2013; 49 : 332-340. [Malyukova L.S., Kozlova N.V. The effectiveness of the use of phosphorus fertilizers in tea cultivation in the conditions of the Black Sea coast of Russia, Subtropical and ornamental horticulture. 2013; 49 : 332-340. (In Rus)].
15. Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Приёмы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с. [Sychev V.G., Kirpichnikov N.A. Techniques for optimizing the phosphate regime of soils in agricultural technologies. M.: VNIIA, 2009. 176 p. (In Rus)].
16. Теория и практика химического анализа почв (под редакцией Л.А. Воробьевой). М.: ГЕОС, 2006. 400 с. [Theory and practice chemical analysis of soils (Edd. Vorobyova L.F.). M.: GEOS, 2006. 400 p. (In Rus)]. ISBN: 5-89118-344-7.
17. Alekseeva T., Alekseev A., Xu R.-K., Zhao A.-Z., Kalinin P. Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in eastern China, Environmental Geochemistry and Health. 2011; 33(2) : 137-148. DOI: 10.10Q7/sl0653-010-9327-5.
18. Chen C.F., Hu C.Y., Liou M.L., Wu C.C., Su Y.S., Liu C.J. Application of Low-Phosphorous Fertilizers on Tea Plantations as a Novel Best Management Practice, Sustainability. 2014; 6 : 6985-6997. DOI: 10.3390/su6106985.
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; 254 : 20-25. DOI: 10.1016/j.agee.2017.11.015.
20. Kozlova N.V., Malyukova L.S. Change in the soils' fertility level of tea agrocenoses in the transition to cultivation without mineral fertilizers in the humid-subtropical zone of Russia, E3S Web Conf. 2021; 254 : 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202125405009.
21. Lin Z.-H., Qi Y.-P., Chen R.-B., Zhang F.-Z., Chen L.-S. Effects of phosphorus supply on the quality of green tea, Food Chemistry. 2012; 130(4) : 908-914. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.08.008.
22. Neumann G., Römheld V. Rhizosphere Chemistry in Relation to Plant Nutrition, Mineral Nutrition of Higher Plants. 2012; 3 : 347-368. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00014-5.
23. Salehi S.Y., Hajiboland R. A high internal phosphorus use efficiency in tea (*Camellia sinensis* L.) plants, Asian J. Plant Sci. 2008; 7(1) : 30-36. DOI: 10.3923/ajps.2008.30.36.
24. Wang H., Xu R.-K., Wang N., Li X.-H. Soil Acidification of Alfisols as Influenced by Tea Cultivation in Eastern China, Pedosphere. 2010; 20(6) : 799-806.
25. Zhang J. Research on the soil nutrient characteristics of tea plantation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018; 208 : 012079. DOI: 10.1088/1755-1315/208/1/012079.
26. Zoysa A., Loganathan P., Hedley M. Phosphorus utilisation efficiency and depletion of

phosphate fractions in the rhizosphere of three tea (*Camellia sinensis* L.) clones, Nutrient Cycling in Agroecosystems. 1999; 53 : 189-201. DOI: 10.1023/A:1009706508627.

**MOBILE PHOSPHORUS  
IN SOILS OF HUMID SUBTROPICS  
IN RF AGAINST THE BACKGROUND OF LONG-TERM USE  
AND AFTEREFFECT OF PHOSPHORUS FERTILIZERS  
IN TEA AGROCENOSES**

**Kerimzade V.V., Kozlova N.V.**

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

The studies were carried out on brown forest acidic soils in humid subtropical conditions on the Black Sea coast of the Russian Federation (Sochi). In the field experiment on the tea plantation, NPK fertilizers in various combinations and doses were applied for 26 years (1986–2011). Since 2012, fertilization has been completely discontinued. Long-term use of phosphorus fertilizers in doses of 60–120–180 kg/ha (in combination with NK) has led to an increase in the content of mobile phosphorus (in a single acid extract according to Oniani) and its total reserve (in the sum of 10 consecutive extracts) to an average of 620–1125–1210 and 1180–2090–2650 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/kg of soil, respectively, in the layer 0–20 cm. These indicators characterized the phosphate capacity of the soils under tea plant, which was 5–9–12 times higher than the forest soil (background). The share of single extract in the total stock increased from 30 to 38–45 %, and phosphate buffering (the ratio of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> of single and multiple extracts) decreased from 3.5 to 2.6–2.2. The degree of phosphates' mobility (or the intensity factor for the concentration of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in a slightly saline extract) increased relative to the background by 3–10–15 times and amounted to 0,45–1,70–2,33 mg/l. 8–10 years after the fertilizers withdrawal against the background of the aftereffect of 1–2–3-fold doses, the total stock of mobile phosphorus decreased by 1.4–1.5 times (by 360–650–700 mg/kg, respectively). The content of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> taken out by a single extract decreased by 1.5–2 times (by 210–370–430 mg/kg, respectively), falling against the background of the aftereffect of the 1-fold doses to the initial level (380 mg/kg when establishing the plantation), and against the background of the aftereffect of 2–3 doses it was still 1.5–2.2 times higher. The degree of phosphates' mobility decreased by 2.4–3.4 times, against the background of the aftereffect of 1-fold doses almost to the background level, and 2–3-fold doses still exceeded it by 3–4.5 times. Phosphate buffering tended to increase, but within 0.1–0.2 units.

**Key words:** mobile phosphorus, capacity factor, intensity factor, phosphate buffering, brown forest acidic soils, tea plantations, humid subtropics, mineral fertilizers, aftereffect.