



УДК 631.416.2 (571.1.5)

СТРУКТУРА ФОСФАТНОГО ФОНДА ПОЧВ СИБИРИ ПО КАЧЕСТВЕННОМУ СОСТАВУ

С. С. Аверкина, кандидат сельскохозяйственных наук

Сибирский федеральный научный центр агrobiотехнологий РАН,
E-mail: averkina36@mail.ru

Ключевые слова: фракционный состав, фонд, трансформация фосфора, провинции, почвенный покров, фосфатный режим.

Реферат. Предложены принципы районирования почвенного покрова Сибирского региона по качественному составу фосфатного фонда на ландшафтно-геохимической основе. На этой территории выделены провинции, почвы которых различаются по запасам и соотношению форм фосфорных соединений. Изучение механизма поглощения фосфатов при внесении минеральных удобрений в основных административных районах позволило выделить 4 типа фосфатного состояния почв Сибирского региона. В настоящее время оценка биологически доступного фосфора на выщелоченных черноземах Приобья проводится на базе многолетних стационарных полевых опытов в зерновых агроценозах. Сравнительная оценка методов определения подвижного фосфора показала, что наиболее чувствительным является метод Карпинского-Замятиной, ЛАК и Николова были несколько менее чувствительными, минимальная чувствительность – у метода Чирикова. В целом эти методы позволяют оценивать предшествующую удобренность почвы фосфорными удобрениями.

THE STRUCTURE OF THE PHOSPHATE OF THE FOUNDATION SOILS OF SIBERIA IN THE QUALITATIVE COMPOSITION

S.S. Averkina, candidate of agricultural Sciences

Siberian Federal scientific center of agrobiotechnology, RAS

Key words: fractional composition, Foundation, phosphorus transformation, the province, topsoil, phosphate mode.

Abstract. The article suggests the principles of zoning of the soil cover of the Siberian region in terms of the qualitative composition of the phosphate fund on a landscape-geochemical basis. In this territory, provinces are distinguished, the soils of which differ in their reserves and in the ratio of the forms of phosphorus compounds. The study of the mechanism of phosphate uptake during the introduction of mineral fertilizers in the main administrative regions made it possible to identify 4 types of phosphate status of soils in the Siberian region. At present, the assessment of biologically available phosphorus on leached chernozems of the Ob re-

gion is carried out on the basis of long-term stationary field experiments in cereal agrocenoses. A comparative evaluation of the methods for the determination of mobile phosphorus showed that the Karpinsky-Zamyatin method is the most sensitive, the LAC and Nikolov were somewhat less sensitive, and the Chirikov method is the least sensitive. In general, these methods allow us to evaluate the previous fertilization of the soil with phosphorus fertilizers.

Структура фосфатного фонда почв отражает зональные и внутризональные условия почвообразования. В частности, фосфорный режим различных типов почв в значительной степени зависит от генетических особенностей. Эти закономерности обуславливают формирование свойств почв, в том числе общего содержания фосфора, форм его минеральных и органических соединений, ёмкости поглощения фосфатов, термодинамических параметров фосфорного состояния и других показателей.

Известно, что все формы потенциально доступных фосфатов отличаются друг от друга по растворимости и по их отношению к гидролитическому распаду. Большинство из них – трудно-растворимые соединения. В практике земледелия наибольший интерес представляют различные по растворимости формы минеральных и в разной степени доступных фосфорных соединений, как природных, так и «новообразованных», накапливающихся в результате внесения удобрений. Настоящая статья посвящена изучению качественного состава активных минеральных фосфатов, поскольку по их соотношению можно судить о направленности процессов превращения фосфора в почвах Сибирского региона и о их потенциальной доступности растениям.

Природное соотношение форм минеральных и органических фосфатов даёт представление о возможном характере превращений вносимых удобрений, так как фосфорные туки переходят в формы, характерные для данной почвы [1]. Характеристика валовых и органических запасов фосфора в почвах Сибири была дана Н. И. Богдановым [2]. В пределах Западно-Сибирской равнины качественный состав фосфатного фонда был изучен Л. П. Антипиной [1, 3] и Ю. И. Берхиным, Е. Г. Чагиной, Е. Д. Янцен [4].

По данным Л. П. Антипиной [1], чернозёмы лесостепной зоны Сибири имеют различное содержание валового фосфора. Высокое его содержание по почвенному профилю было обнаружено в Кузнецкой котловине, а также в Канско-Рыбинско-Усольской впадине на Средне-Сибирском плоскогорье. Повышенная обеспеченность имела место в чернозёмах Барабинской низменности и Приобского плато. Наиболее бедны валовой P_2O_5 чернозёмы Ишим-Иртышской дренированной равнины. Валовой фосфор чернозёмов Средней и Южной Сибири в пахотных горизонтах на 42–50 % представлен минеральными формами.

В пределах Западно-Сибирской равнины качественный состав фосфатов неоднороден. В Барабинской низменности минерального фосфора в слое 0–20 см 70,5–71,5 % от валового, а с глубины 40 см – 91 %. Почвы Приобского плато содержат 54,5 % минеральных фосфатов. Чернозёмы Зауральского плато отличаются самым низким содержанием минеральных фосфатов (15,7 % в слое 0–20 см и 34,6 % в слое 20–40 см). Чернозёмы Ишим-Иртышской плоской равнины содержат в пахотном слое 47 % минеральных фосфатов, а на глубине 30–40 см – 91 %. Эти чернозёмы очень бедны фосфором, но соотношение органических и минеральных форм в них наиболее благоприятное.

Изучение фракционного состава, проведенное по методу Гинзбург-Лебедевой в почвах черноземного типа, показало, что запас наиболее растворимых фосфатов ($Ca-P_1$) в верхнем полуметровом слое почвы составлял следующий убывающий ряд: Канская впадина – Барабинская низменность – Прииртышская равнина – Кузнецкая котловина – Ишим-Иртышская равнина – Приобское плато – Зауральское плато.

Фракция $Ca-P_{II}$ является ближайшим резервом для питания растений. По абсолютному содержанию этой фракции в почве районы составляют следующий убывающий ряд: Иртышская

озёрная равнина – Барабинская низменность – Канская впадина – Кузнецкая котловина – Ишим-Иртышская равнина – Приобское плато – Зауральское плато. Самое высокое процентное содержание этой фракции отмечается на чернозёмах Иртышской равнины (Зауральское плато), самое низкое – в Приобском плато.

По фракции А1-Р разница между провинциями была несущественной, за исключением оподзоленного чернозёма Барабинской низменности, где содержание А1-Р было довольно высоким по всему профилю почвы.

Значительное содержание фракции Fe-Р было обнаружено в верхнем полуметровом слое черноземов Канской впадины, Барабинской низменности и Приобского плато.

Фракция Са-Р_{III} по абсолютному содержанию в чернозёмах находится в следующем убывающем ряду: Приобское плато – Канская впадина – Барабинская низменность – Кузнецкая котловина – Иртышская равнина – Ишим-Иртышская равнина – Зауральское плато.

На территории земледельческой зоны Западной Сибири Л. П. Антипиной [3] выявлена неоднородность содержания и качественного состава природного фосфора в пахотном горизонте почв. Оценка неоднородности фосфатного фонда позволила выделить следующие провинции.

Провинция 1. Юго-восточная часть Западно-Сибирской равнины – Кузнецкая котловина и система Минусинских впадин. Эта область геохимического проявления апатитов и фосфоритов. В составе минеральных форм доминируют (55,3 %) высокоосновные фосфаты кальция. Содержание доступных форм кальция и магния составляет 21,3 %.

Провинция 2. Чановско-Славгородский район Кулундинско-Барабинской области. Высокоосновные фосфаты кальция составляют 41,2 %. Активные минеральные формы 51,6 %.

Провинция 3. Тобол-Ишимский район Зауральско – Северо-Казахстанской области. Содержание наиболее доступных растениям форм фосфора составляет 50,8 %.

Провинция 4. Юг Чулымо-Енисейской области. Наиболее доступные формы (Са-Р_I и Са-Р_{II}) составляют 26,8 % от суммы минеральных фосфатов, высокоосновные формы фосфатов – 37,2 %.

При разработке региональных систем теоретических и практических основ воспроизводства плодородия почв Сибирского региона предусматривается изучение механизма поглощения фосфатов при антропогенном воздействии. Необходимо выяснить факторы, которые формируют фосфорный режим почвы и её способность обеспечивать растение фосфорным питанием. В почве постоянно идут процессы мобилизации и иммобилизации фосфора, вследствие которых формируется ее фосфатный фонд, являющийся основным резервом питания растений фосфором.

Из почвы и удобрений растения получают фосфор в форме солей ортофосфорной кислоты. Легче всего он усваивается из ортофосфатов однозамещённых соединений типа Са (H_2PO_4), $KHPO_4$, $Mg(H_2PO_4)_2$. Двухзамещённые соли ($CaHPO_4$, $MgHPO_4$, и др.) почти не растворимы в воде, но растворимы в слабых кислотах. Фосфор этих соединений хорошо используется растениями. Использование фосфатов трёхзамещённых солей различных сельскохозяйственных культур значительно варьирует. Органические фосфоросодержащие соединения становятся доступными только после их минерализации [5].

Как и всякий физико-химический процесс, поглощение фосфора почвами характеризуется объёмом и скоростью. Для земледелия наиболее неблагоприятны почвы, обладающие способностью поглощать значительное количество фосфора и быстро переводить его в недоступное или малодоступное растениям состояние. Поглощение фосфора почвами зависит от целого ряда факторов: реакции среды, гранулометрического состава почв, содержания гумуса, состава катионов в поглощающем комплексе почв, соотношения обменного и поглощённого кальция, наличия в почвах валовых и подвижных форм SiO_2 , полуторных окислов (R_2O_3).

Исследования Л. П. Антипиной [6] показали, что в Сибири есть регионы, в которых слабо выражены поглотительные свойства почвы (Северное Зауралье, Приобье). На таких по-

чвах целесообразно вносить удобрения в запас на ряд лет, что даст экономический эффект по сравнению с ежегодным внесением удобрений. В чернозёмах Канской и Кузнецкой лесостепи основную роль в поглощении фосфора удобрениями играют подвижные полуторные окислы, а в Приобье, наряду с ними, и кальций. На почвах, где основная роль в поглощении фосфора принадлежит R_2O_3 , выше размеры общего и необменного поглощения, а значит, ниже коэффициент использованного фосфора. На таких почвах внесение фосфора в запас нецелесообразно.

Л. П. Антипиной на примере 135 вегетационных опытов, заложенных на основных типах почв Западной Сибири, были сформированы модели, отражающие механизм превращения и требуемые нормативы на воспроизводство плодородия при разных степенях окультуренности почвы по показателям: удобрения, содержание P_2O_5 по Чирикову, концентрация P_2O_5 по Скофилду и урожай яровой пшеницы.

При этом были выделены три этапа интенсивности накопления запасов фосфора и отзывчивости яровой пшеницы на внесение фосфорных удобрений:

1. Преобладание процесса поглощения фосфора твёрдой фазой почв. Это состояние неокультуренной почвы. Вносимые незначительные дозы P_2O_5 не достигают оптимума по окупаемости.

2. Состояние, когда начинается отдача ионов фосфора в раствор, названное «критическим». Оно переходит во второй этап экономического оптимума, где прибавки урожая окупают затраты.

3. Зона «зафосфачивания», когда прибавки урожая не окупают затраты.

Критическая и оптимальная концентрация в модели взаимодействия зависит от типа почв, гранулометрического состава, степени насыщенности фосфатной ёмкости почвы.

При изучении отзывчивости яровой пшеницы на внесение фосфорных удобрений Л. П. Антипиной [7] были определены основные типы фосфатного состояния почв Сибирского региона.

Первый тип характеризовался высокими запасами фосфора (Q), но слабой интенсивностью (I), что связано с богатством почвообразующих пород апатитами. В эту группу вошли котловины Средней Сибири, предгорная зона и юг Ишим-Иртышского междуречья. Это почвы тяжелого гранулометрического состава, фосфатная ёмкость равна 42–48%. Для достижения максимального урожая требуются высокие дозы фосфорных удобрений, так как при их внесении происходит медленное насыщение ёмкости поглощения почв. В Средней Сибири с преобладанием лёгкого гранулометрического состава эффективность внесения удобрений высокая. Почвы Минусинской котловины, Алтайского Приобья, Обь-Иртышского и Ишим-Иртышского междуречья имели величину фосфатной ёмкости 49–65%.

Второй тип характерен для каштановых почв, чернозёмов южных и обыкновенных Предалтайской степной и сухостепной зон. При внесении возрастающих доз фосфорных удобрений ёмкость быстро насыщается до оптимума.

Третий тип свойственен почвам Тобол-Ишимского и Шадринск-Туринского междуречий. При слабой обеспеченности почв фосфором качественный состав благоприятен. Отзывчивость на внесение удобрений очень высокая. При насыщении фосфатной ёмкости до 16% прибавка урожайности составляла 53–69%, а при достижении степени насыщенности 40% она удваивалась.

Четвёртый тип фосфатного состояния почв характерен для Тяжинского (Кемеровская область) и Боготольского (Красноярский край) участков северной лесостепи Западно-Сибирской равнины. Для этих участков свойственны низкие запасы P_2O_5 (до 5 мг на 100 г) и слабая насыщенность ёмкости фосфором (12,0–13,7%). Для получения значительной отзывчивости удобрений необходимо ёмкость поглощения довести до 42%. Возможная прибавка урожая со-

ставляла 75%. На почвах Тяжинского участка внесение фосфорных удобрений слабо способствовало насыщению фосфатной ёмкости.

Таким образом, ход процессов трансформации фосфатов удобрений определяется свойствами почв и дозой вносимых удобрений. Полного использования растениями фосфора удобрений не происходит. Даже в хорошо обеспеченных фосфором почвах наблюдается его переход в недоступные или слабо доступные формы [8]. В то же время некоторые исследователи считают, что основным источником фосфора для растений является сорбированный фосфор [9]. Так, исследования, проведенные Л. А. Шамрай [10] на выщелоченных чернозёмах Омской области, показали, что при ежегодном внесении возрастающих доз суперфосфата (до 1500 кг/га P_2O_5) не было отмечено перехода фосфора во фракции труднодоступных форм.

Ю. И. Берхин и др. [8] изучали величину сорбированного фосфора на основных типах почв Западной Сибири. Скорость использования фосфатов удобрения определялась с помощью фракционного состава. По сорбционным свойствам изучаемые почвы были разделены на три группы, которые отличались между собой по содержанию гумуса, гранулометрическому составу. Опыты показали, что чем тяжелее гранулометрический состав и меньше подвижных фосфатов, тем большая доля внесённого фосфора поглощается почвой. Фосфор удобрений, сорбированный почвами региона, переходя в I – IV фракции минеральных фосфатов, в течение ряда лет может использоваться растениями практически полностью, т. е. сорбционные процессы не являются фактором, резко снижающим доступность фосфора растениям. Авторами статьи был сделан вывод об отсутствии перехода сорбированного фосфора в формы, недоступные для растений. Этим объясняется равноценность запасного и ежегодного внесения удобрений.

Оценка растворимости продуктов взаимодействия почв и фосфорных удобрений по равновесной концентрации ионов фосфора в растворе изучалась Л. П. Антипиной и др. [11]. Влияние физико-химических свойств почв на интенсивность изменения фосфатного фонда при внесении фосфорных удобрений рассчитывалось по коэффициенту сорбции (K_c по методу Лэнгмюра). В результате получена чёткая зависимость между дозами P_2O_5 и равновесной концентрацией фосфора в почвенном растворе. Количественные связи этих величин резко отличались по провинциям Сибирского региона в зависимости от типа фосфатного состояния почв, установленного авторами. При значениях K_c менее 250 (доза 10 мг P_2O_5 на 100 г почвы) равновесная концентрация фосфора в почвенном растворе составляет 1,0–1,5 мг/л; 200–250 – 0,8–0,9 мг/л, более 300 – 0,2–0,3 мг/л.

Вышеизложенные экспериментальные материалы позволяют выяснить трансформацию фосфора в процессе почвообразования и изменение его при внесении удобрений. Однако пространственная дифференциация фосфатного фонда Сибири в его соответствии с агроэкологическими особенностями возможна лишь при детальном анализе природно-ландшафтных и административно-территориальных аспектов. Всё вышесказанное относится, в первую очередь, к рациональному использованию фосфорных удобрений в конкретных, отдельно взятых, административных регионах, что в последующем может послужить основой для научно-производственных рекомендаций.

В настоящее время в Сибирском НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН изучаются закономерности изменения биологически доступного фосфора на выщелоченных чернозёмах Приобья в зерновых агроценозах. В стационарных полевых опытах с применением возрастающих доз азотных и фосфорных удобрений в 3- и 4-польных зернопаровых и зерновых севооборотах был оценен фосфатный фонд выщелоченного чернозёма с точки зрения потребности в фосфоре зерновых культур. Изучение фракционного состава фосфатов почвы по методу Гинзбург-Лебедевой показало, что на долю недоступного растениям фосфора ($Ca-P_v$) приходится более половины всех активных минеральных фосфатов. Количество доступного фосфора первых 4 фракций варьирует от 31 до 43%. Длительное

применение азотных удобрений в зерновом севообороте, а также азотно-фосфорных в зернопаровом севообороте способствовало некоторому увеличению содержания фракции железосоединений. Вне зависимости от уровня удобренности (при дозах внесения N_{30-90} и P_{15-30}) в среднем по всем севооборотам на долю первой фракции приходилось примерно 9%, второй – 12, пятой – 64%.

Сравнительная оценка методов определения подвижного фосфора в зерновых агроценозах на выщелоченном черноземе показала, что наиболее чувствительным методом, отражающим обеспеченность культур, является метод Карпинского-Замятиной. Наименее чувствительным являлся метод Чирикова (различие между удобрявшейся и неудодрявшейся фосфором почвой составляло 6%), далее следуют метод Николова (различие 51%), затем – ЛАК-метод (87%) и, наконец, метод Карпинского-Замятиной (133%). Но в целом все методы, хотя и в разной степени, позволяют оценивать предшествующую удобренность почвы фосфорными удобрениями.

Новые исследования послужат основой для разработки инновационных технологий возделывания зерновых культур. Для разработки практических мер по сохранению плодородия почв Сибирского региона и рациональному использованию фосфорных удобрений в 80–90-х годах прошлого столетия было проведено районирование территории по запасам и качественному составу потенциально и непосредственно доступных фосфатов. Изучение пространственной закономерности распределения фосфора в почвах показало, что каждой провинции соответствует свой тип химизма превращения. Это даёт возможность более обоснованно характеризовать имеющиеся фосфатные фонды в каждой почвенно-климатической зоне Сибирского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипина Л. П. Фракционный состав минеральных фосфатов в черноземах Сибири // *Агрохимия*. – 1978. – № 1. – С. 32–40.
2. Богданов Н. И. Валовой и органический фосфор в сибирских чернозёмах // *Почвоведение*. – 1954. – № 5. – С. 27–37.
3. Антипина Л. П., Пашкович Н. К. Закономерности распределения фосфора в почвенном покрове Западной Сибири // *Фосфатный режим почв Сибири: сб. науч. тр. СО ВАСХНИЛ*. – Новосибирск, 1985. – С. 3–9.
4. Берхин Ю. И., Чагина Е. Г., Янцен Е. Д. Фракционный состав минеральных фосфатов Западной Сибири // *Агрохимия*. – 1984. – № 9. – С. 21–27.
5. Аникина А. П. Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. – Новосибирск: Наука СО РАН, 1989. – С. 47–62.
6. Антипина Л. П. Основные факторы поглощения фосфора чернозёмами Сибири // *Сиб. вестн. с.-х. науки*. – 1977. – № 4. – С. 12–20.
7. Антипина Л. П. Состояние, воспроизводство плодородия почв и оптимизация питания яровой пшеницы фосфором в Сибири // *Совершенствование методологии исследований фосфатного режима почв, оптимизация фосфорного питания растений и баланс фосфора в агроэкосистемах // Тр. ВНИПТИХИМ РАСХН: материалы междунар. симп.* – М., 1999. – С. 132–139.
8. Берхин Ю. И., Чагина Е. Г., Янцен Е. Д. Доступность продуктов трансформации суперфосфата зерновым культурам // *Плодородие почв и питание растений: сб. науч. тр. СО ВАСХНИЛ*. – Новосибирск, 1986. – С. 65–75.
9. *Агробиогеохимический цикл фосфора* / А. Л. Иванов [и др.]; ред. А. Л. Иванов; Рос. акад. с.-х. наук. – М., 2012. – С. 150–199.
10. Шамрай Л. А. Изучение фосфатного режима чернозёмов Омской области с помощью радиоактивного изотопа P^{32} : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Омск, 1970. – 22 с.

11. Антипина Л.П., Пашкович Н.К., Малыгина Л.П. Оценка растворимости продуктов взаимодействия почв и фосфорных удобрений по равновесной концентрации ионов фосфора в растворе//Плодородие почв и питание растений: сб. науч. тр. СО ВАСХНИЛ. – Новосибирск, 1986. – С. 76–85.

REFERENCES

1. Antipina L.P. Frakcionnyj sostav mineral'nyh fosfatov v chernozemah Sibiri// Agrohimiya. –1978. –№ 1. – S.32–40.
2. Bogdanov N.I. Valovoj i organicheskiy fosfor v sibirskih chernozjomah//Pochvovedenie. –1954. –№ 5. –S.27–37.
3. Antipina L.P. Pashkovich N.K. Zakonomernosti raspredelenija fosfora v pochvennom pokrove Zapadnoj Sibiri//Fosfatnyj rezhim pochv Sibiri. – sb. nauch. tr. – SO VASHNIL. – Novosibirsk. –1985. – S.3–9.
4. Berhin JU.I., CHagina E.G., JAncen E.D. Frakcionnyj sostav mineral'nyh fosfatov Zapadnoj Sibiri//Agrohimiya. –1984. –№ 9. – S.21–27.
5. Anikina A. P. Agrohimicheskie svojstva pochv i jeffektivnost» udobrenij// Izd. – vo nauka SO RAN. –1989. – S.47–62.
6. Antipina L.P. Osnovnye faktory pogloshhenija fosfora chernozjomami Sibiri//Sib.vest.s. – h nauk. –1977. –№ 4. – S.12–20.
7. Antipina L.P. Sostojanie, vosproizvodstvo plodorodija pochv i optimizacija pitaniya jarovoj pshenicy fosforom v Sibiri //Sovershenstvovanie metodologii issledovanij fosfatnogo rezhima pochv, optimizacija fosfornogo pitaniya rastenij i balans fosfora v agrojekosistemah //tr. VNIPTIHIM RASHN. – Materialy mezhd. simpoziuma Moskva. –1999. – S. 132–139.
8. Berhin JU.I., CHagina E.G., JAncen E.D. Dostupnost» produktov transformacii superfosfata zernovym kul'turam//Plodorodie pochv i pitanie rastenij. – sb. nauch. tr. – SO VASHNIL. – Novosibirsk. –1986. – S.65–75.
9. Agrobiogeohimicheskij cikl fosfora /A.L. Ivanov (i dr.); red. A.L. Ivanov; Ros. akad. s. – h nauk. –2012. – S.150–199.
10. SHamraj L.A. Izuchenie fosfatnogo rezhima chernozjomov Omskoj oblasti s pomoshh'ju radioaktivnogo izotopa R32// Avtoref. dis. kand. s. – h. nauk. – Omsk. –1970. –22s.
11. Antipina L.P., Pashkovich N.K., Malygina L.P. Ocenka rastvorimosti produktov vzaimodejstvija pochv i fosfornyh udobrenij po ravnovesnoj koncentrácii ionov fosfora v rastvore// Plodorodie pochv i pitanie rastenij. – sb. nauch.tr. – SO VASHNIL. – Novosibirsk. –1986. –76–85.