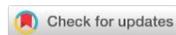


УДК 631.416:631.482.1

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-61-91



Ссылки для цитирования:

Мартынов А.В. Подвижные формы фосфора в пойменных катенах реки Амур // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 61-91. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-61-91

Cite this article as:

Martynov A.V., Available for plants phosphorus in the floodplain catenas of the Amur River, Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 107, pp. 61-91, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-61-91

Подвижные формы фосфора в пойменных катенах реки Амур

© 2021 г. А. В. Мартынов

*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Россия,
675000, г. Благовещенск, пер. Речочный, 1,
<https://orcid.org/0000-0002-8839-036X>, e-mail: lexx_1981@list.ru.*

*Поступила в редакцию 21.04.2021, после доработки 20.05.2021,
принята к публикации 16.06.2021*

Резюме: Изучено содержание и распределение подвижных форм фосфора в разных типах пойменных почв вдоль пяти катен, расположенных в верхнем и среднем течении р. Амур. Установлено, что на подвижные формы фосфора в почвах пойм влияют следующие факторы: строение речной сети, тип поймы, характер растительного покрова, почвообразующие процессы. При длительной транспортировке аллювия в русле реки происходит его гидрогенное выветривание с высвобождением фосфора в речные воды. При отсутствии притоков, служащих дополнительными источниками аллювия, содержание фосфора по ходу русла снижается. В небольших по размеру поймах повышена интенсивность пойменных и аллювиальных процессов, обеспечивающих обновление почвенного профиля и поддержание запасов фосфора. В почвах под березовым лесом, отмечена значительная аккумуляция фосфора, по сравнению с почвами под луговой растительностью. Развитие глеевых процессов вызывает активную мобилизацию фосфора, но при долговременном воздействии приводит к истощению его общих запасов. Процессы лессиважа, развивающиеся при выходе аллювиальных почв из пойменного режима, способствуют

миграции оксидов железа и сорбируемого ими фосфора за пределы почвенного профиля. Среднее содержание подвижных форм фосфора, в зависимости от типа почв, снижается по ходу течения: от 300–100 мг/кг в верхнем течении до 170–20 мг/кг в среднем течении. Лучше всего обеспечены фосфором самые примитивные – аллювиальные слоистые почвы, хуже – остаточно-пойменные брунземы.

Ключевые слова: подвижные формы фосфора, пойменные почвы, р. Амур, catena, глеевые процессы, березовый лес.

Available for plants phosphorus in the floodplain catenas of the Amur River

© 2021 A. V. Martynov

*Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences,*

*1 Relochnyi per., Blagoveshchensk 675000, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-8839-036X>, e-mail: lexx_1981@list.ru.*

Received 21.04.2021, Revised 20.05.2021, Accepted 16.06.2021

Abstract: This work was carried out to study the content and distribution of available for plants phosphorus in different types of floodplain soils along five catenas located in the upper and the middle Amur. It was found that the available for plants phosphorus forms in the soils of floodplains are influenced by the following factors: the structure of the river system, the type of floodplain, the type of vegetation cover, and soil-forming processes. During the long-term transportation of alluvium along the river bed, its hydrogenic weathering occurs with the release of phosphorus into river waters. In the absence of tributaries serving as additional sources of alluvium, the phosphorus content decreases downstream. More intense floodplain and alluvial processes in small floodplains provide renewal of the soil profile and replenishment of phosphorus reserves. In the soils under the birch forest, there is a significant accumulation of phosphorus, in comparison with the soils under meadow vegetation. The development of gley processes leads to active mobilization of phosphorus, but the long-term exposure leads to the depletion of its total reserves. The illimerization processes, initiated and developing when the floodplain hydrological regime of alluvial soils is changed to another one, promote the migration of iron oxides and phosphorus, adsorbed by the former, beyond the soil profile. To summarize, the average content of available for plants phosphorus, depending on the type of soil, decreases downstream from 300–100 mg/kg in the upper Amur to 170–20 mg/kg in the

middle Amur. Available for plants of phosphorus are best provided in primitive alluvial layered soils, while in residual floodplain brunezems the lowest content is recorded.

Keywords: available for plants phosphorus, floodplain soils, the Amur River, catena, gley processes, birch forest.

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор – важнейший биогенный элемент, необходимый для жизни всех организмов. Он не просто входит в состав любой живой клетки, будь то клетка бактерии, растения или животного, он служит ключевым элементом почти всех жизненных процессов. Жизнь без фосфора существовать не может ([Яншин, Жарков, 1986](#)). Основным источником фосфора, как и всех макро- и микро-элементов, для живых организмов служит почва ([Wardle et al., 2004](#)). Содержание фосфора и распределение его соединений в почвах связаны с генезисом почвообразующих пород, различной интенсивностью проявления почвообразовательных процессов, а также с преобразованием современных почв под влиянием различных факторов, в том числе и антропогенных ([Fink et al., 2016](#)). Главным источником соединений фосфора для почв служат почвообразующие породы ([Корзун, 1993](#)). В процессах выветривания фосфор материнской породы вовлекается в биологический круговорот, при этом образуются новые вторичные соединения – органические и минеральные, которые постоянно находятся в процессе превращения друг в друга ([Tiessen et al., 1984](#)). Соотношение между этими соединениями определяется общим направлением почвообразовательных процессов. Минеральные формы фосфора в почве как правило преобладают над органическими ([Ельшаева, 1998](#)).

Содержание валового фосфора в почве изменяется в пределах от 0.2 до 5 г/кг, но для растений доступен лишь 1% от этого содержания ([Барбер, 1988](#); [Richardson et al., 2005](#)). В результате богатых фосфором почвенных типов в природе практически нет. Существующий в природе процесс биологической аккумуляции фосфора из нижних слоев почвы посредством глубоко проникающей корневой системы растений происходит очень медленно, и темпы его не соответствуют темпам отчуждения фосфора из почв

с урожаями сельскохозяйственных культур даже в почвах с высокой обеспеченностью этим элементом ([Возбуцкая, 1968](#); [Иванов и др., 2009](#)). Поэтому изучение фосфатного режима почв и его регулирование является важнейшей проблемой минерального питания растений ([Rogova et al., 2018](#)). Наиболее остро данный вопрос стоит для пойменных почв, так как в них именно фосфор рассматривается как фактор, лимитирующий плодородие ([Krögera, Matthew, 2011](#); [Alexander et al., 2008](#)).

Основным источником фосфора в пойменных почвах служит аллохтонное вещество, поступающее в поймы с паводками и в результате склоновых процессов с террас. Будучи отрицательно заряженным, фосфор образует оксиды, активно связываясь с катионами почв (Ca, Mn, Fe и Al) и глинистыми минералами. Связанные формы плохо растворимы ([Bagyaraj et al., 2000](#)), и лишь небольшая часть аллохтонного фосфора остается биологически доступной. В результате большая часть фосфора, как естественного, так и антропогенного происхождения, поступающего в пойменные экосистемы, иммобилизируется в отложениях и становятся недоступными для растений ([Jana, 2007](#)).

Связи фосфора с оксидами и глинистыми минералами очень стабильны, но зависят от ряда почвенных характеристик: 1) интенсивности окислительно-восстановительного потенциала или Eh ([Maranguit, 2017](#)); 2) содержания оксидов железа ([Maranguit, 2017](#)); 3) содержания органического вещества почвы и его микробной доступности ([Quintero et al., 2007](#); [Артемьева, 2015](#)); 4) общего содержания фосфора и его формы ([Amarawansha et al., 2015](#)); 5) повышения кислотности почвы, увеличивающей доступность фосфора за счет увеличения растворимости соединений железа и алюминия ([Chacon et al., 2005](#)). Следовательно, развитие анаэробных процессов, связанных с паводками или длительным атмосферным переувлажнением, приводит к мобилизации фосфора ([Rakotoson et al., 2016](#)), а в условиях избыточного переувлажнения он вымывается из почв грунтовыми и речными водами, что усиливает его дефицит на пойменных территориях ([Sondergaard et al., 1999](#)).

Актуальность проблемы дефицита фосфора в пойменных почвах усиливается в связи с регулированием речного стока многих рек вследствие строительства плотин, ГЭС и активного вовлечения пойменных территорий в хозяйственную деятельность с применением удобрений. Регулирование речного стока срезает паводковые пики, что приводит к более редким паводкам, и как следствие, к осушению поймы ([Гусев, 2002](#)). В пойменных почвах снижается интенсивность анаэробных процессов, но интенсифицируется окисление органического фосфора до высоко лабильной неорганической формы с его миграцией в нижние горизонты с атмосферными осадками ([Owens, Walling, 2002](#)). Внесение органических и минеральных удобрений усиливает микробную активность почвы и повышает доступность фосфора за счет процессов минерализации-иммобилизации ([Chen et al., 2003](#); [Lehmann et al., 2005](#)). Однако необоснованно высокие дозы удобрений, внесение удобрений без учета свойств почв и биоклиматических условий территории приводит к загрязнению грунтовых и поверхностных вод и развитию процессов эвтрофикации ([Bostrom et al., 1988](#); [Salazar et al., 2018](#)).

Таким образом, исследования, посвященные содержанию фосфора в пойменных почвах р. Амур, одной из крупнейших рек мира, своевременны и актуальны. Особенно с учетом значительного вовлечения пойменных территорий р. Амур в хозяйственную деятельность человека и функционирования (на российской территории) двух крупных ГЭС на ее притоках. Также изученность пойменных почв долины р. Амур крайне мала. Частично это связано с ее трансграничным положением, разделением по фарватеру между Россией и Китаем. Но основная причина в том, что в Амурской области, в пределах которой расположено верхнее и среднее течение р. Амур, основной акцент почвенных исследований смещен в сторону черноземовидных почв и буроземов. Систематические исследования аллювиальных почв в Амурской области, несмотря на их значительную вовлеченность в хозяйственную сферу, почти не проводились.

Для оценки плодородия почв используют преимущественно подвижную форму фосфора, т. к. валовое содержание в почве не является показателем возможности его использования растениями. Растениям хорошо доступны лишь водорастворимые дигидрофосфаты и в меньшей степени – гидрофосфаты, концентрация которых в почвенном растворе незначительна, так как они постепенно переходят в слаборастворимые фосфаты ([Кидин, Горшин, 2016](#)). Также необходимо учитывать, что поймы – высоко динамичный объект, характеризующийся большим разнообразием природных параметров, зависящих в первую очередь от строения поймы и ее рельефа ([Lair et al., 2009](#)), и сильно изменчивым почвенным покровом, состоящим из азональных и зональных почвенных типов ([Шварц, 1969](#)). Поэтому цель данной работы заключалась в геохимической характеристике обеспеченности различных генетических типов почв пойм верхнего и среднего течения р. Амур подвижными формами фосфора с учетом морфологического строения поймы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основным методом при проведении исследования был метод катен. Данный метод предложен G. Milne в 1932 г. и в настоящее время нашел широкое применение в почвоведении, биогеохимии, ландшафтоведении и др. науках, что обусловлено концепцией метода катенарных комплексов, позволяющей не только объединить факторы, объясняющие различия в почвенном покрове, но также изучить историю земной поверхности, геологии, гидрологии, эрозии, переноса наносов и почвенных процессов ([Bordena et al., 2020](#)).

Объектом исследования послужили аллювиальные и остаточные-аллювиальные почвы, сформированные в пределах пяти катен в пойме р. Амур (рис. 1). Три катены были заложены в верхнем течении р. Амур и две – в среднем течении.

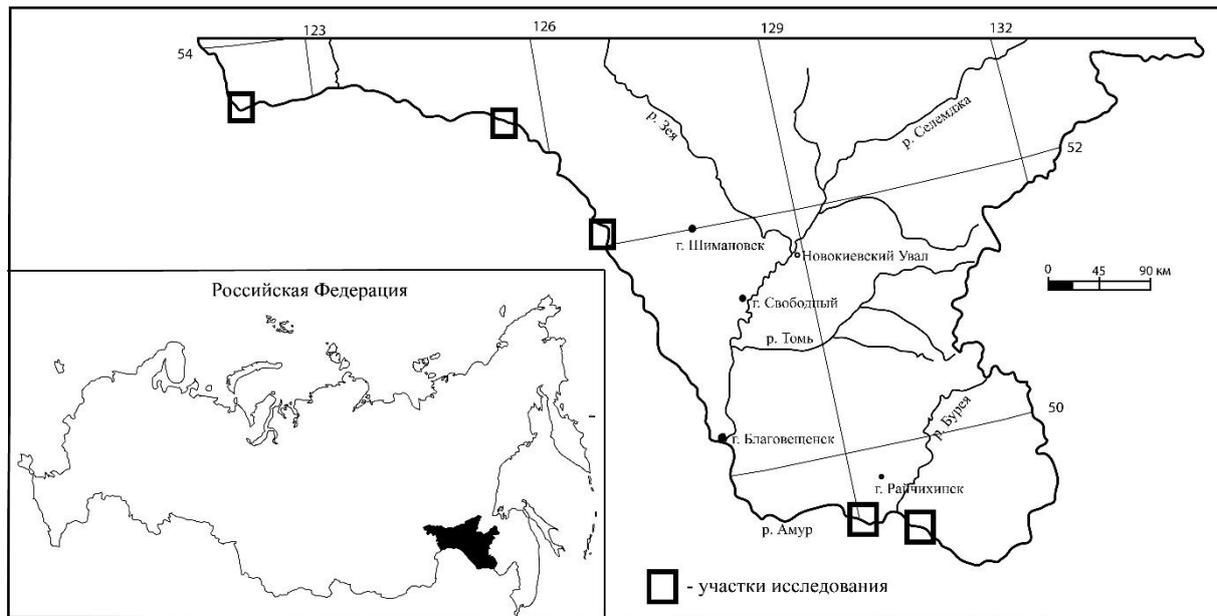


Рис. 1. Карта-схема южной части Амурской области с указанием участков исследования.

Fig. 1. Map of the southern part of the Amur Region, the study sites are indicated.

Поймы в верхнем течении небольшие по размеру, а русло реки, где они сформированы, по классификации МГУ ([Чалов, 2007](#)), относится к адаптивному типу. Катена № 1 расположена на границе Амурской области, в междуречье рек Амур – Амазар. Она имеет небольшую протяженность – 300 м. В ее пределах заложено 8 почвенных разрезов. Пойма представляет собой слабо выгнутую равнину с невыраженными прирусловой и притеррасной частями, ограниченную выходом скал и большей частью покрытую березовым лесом. Катена № 2 расположена в 5 км выше по течению от с. Черняево. Ее длина 2 км, а заложено 11 почвенных разрезов. Пойма состоит из трех сильно дифференцированных компонентов: равнинной прирусловой части; большого понижения в виде высохшей протоки в центральной части, в пределах которого развита сеть озер и болот; притеррасной части в форме слабонаклонного склона, покрытого березовым лесом и упирающегося в выходы скал. Катена № 3 расположена в 6 км выше по течению от с. Нововоскресеновка. Здесь на протяжении 2 км заложено 14 почвенных разрезов. Пойма имеет выраженное двухступенчатое строение с перепадом высот между ступенями в 3–4 м. Первая ступень представляет собой несколько соединившихся островов с разнообразной растительностью и многочисленными озерами и болотами в депрессиях. Вторая ступень состоит из высокого берегового вала, на котором сформирован сосновый лес, переходящего в наклонную равнину, покрытую березовым лесом, упирающуюся в небольшое притеррасное болото и далее в горные холмы.

В среднем течении русло Амура относится преимущественно к широкопойменному типу. Катена № 4 расположена в 6 км выше по течению от с. Калинино. На катене, протяженностью 10 км, заложено 33 почвенных разреза. Пойма на данной территории состоит из двух частей. Первая часть – молодая пойма (возраст до 1 500 лет), имеет классическое строение: притеррасная пойма шириной около 3 км, центральная пойма около 3 км и небольшое притеррасное понижение до 500 м. Но за притеррасным понижением следует более древняя пойма (возраст 3 000–5 000 лет) в виде равнины плавно переходящей в террасо-увал, сформированный продуктами разрушения надпойменной террасы. Катена № 5 расположена между селами Красный Луч и Иннокентьевка в 8 км от

устья р. Бурья. Катена длиной 12 км и представлена 30 почвенными разрезами. Данная катена – единственная, которая не доходит до террасы, т. к. значительную часть поймы представляют труднопроходимые пойменные болота, где расположен Хинганский заповедник. Исследуемая часть поймы представляет собой равнину, которую пересекают многочисленные действующие и высохшие протоки.

Всего было заложено 96 почвенных разрезов. В каждом разрезе по генетическим горизонтам были отобраны образцы (всего 354). Названия почв давались в соответствии с классификацией и диагностикой почв России ([Шишов и др., 2004](#)) и классификацией WRB ([IUSS Working Group, 2014](#)). Отдел аллювиальных почв на всех участках одинаково представлен двумя почвенными типами: аллювиальная серогумусовая (Ал_д) “Umbric Fluvisols” и аллювиальная серогумусовая глеевая (Ал_{др}) “Umbric Fluvisols (HyperGleyic)”. В пределах типа аллювиальной серогумусовой почвы выделяется подтип аллювиальная серогумусовая глееватая почва (Ал_д¹) “Umbric Fluvisols (HupoGleyic)”. Заболоченные аллювиальные почвы в верхнем и среднем течении р. Амур различаются. В верхнем течении сумма положительных температур не позволяет органическому веществу полностью разлагаться, поэтому оно консервируется в виде торфа с образованием аллювиальных торфяно-глеевых почв (Ал_т) “Gleyic Histic Fluvisols”. В среднем же течении преобладают аллювиальные перегнойно-глеевые почвы (Ал_{пг}) “Gleyic Mollic Fluvisols”. Также выделены аллювиальные слоистые почвы (Ал_{сл}) “Protic Fluvisols” (отдел слаборазвитых почв). На возвышенных участках поймы интразональные процессы практически не участвуют в почвообразующих процессах, поэтому получили распространение остаточно-аллювиальные почвы. В верхнем течении – это ржавоземы остаточно-аллювиальные (Рж) “Brunic Arenosols”, относящиеся к отделу железисто-метаморфические почв. В среднем течении – брунеземы остаточно-аллювиальные (Бл) “Fluvisols Phaeozems”. Брунеземы или бурые-луговые почвы отсутствуют в Классификации и диагностике почв России ([2004](#)) и выделяются преимущественно в классификациях дальневосточных почв ([Ознобихин и др., 1994](#)).

Определение свойств почв проводили в Аналитическом цен-

тре минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН. Подвижные формы фосфора (P_2O_5) определялись методом А.Т. Кирсанова ([Новицкий и др., 2009](#)). Выбор данного метода обусловлен его преимущественным использованием в бескарбонатной, нечерноземной зоне ([Королева, 2010](#)).

При статистической обработке данных использовались методы описательной статистики: медиана, минимум-максимум, процентиль. При анализе распределения P_2O_5 в катене в латеральном и радиальном направлениях использовались графики рассеивания с наложением полиномиальных трендов и коэффициентов корреляции, характеризующих зависимость содержания P_2O_5 от протяженности катены. Все расчеты проводились в программе Statistica v.10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание P_2O_5 в пойменных почвах характеризуется сильным варьированием значений даже в пределах одного почвенного типа. При подобных переменных целесообразно использовать не среднее, а медианное содержание, более соответствующее истине. В верхнем течении р. Амур максимальное медианное содержание P_2O_5 отмечается в гумусово-аккумулятивных горизонтах слоистых почв, минимальное – в почвообразующих горизонтах торфяно-глеевых почв. Разброс минимальных/максимальных значений указывает, что серогумусовые, а также серогумусовые глееватые и глеевые почвы, в сравнении с другими почвами, характеризуются большим варьированием почвенных свойств, влияющих на динамику P_2O_5 . Распределение P_2O_5 в профиле аллювиальных почв преимущественно убывающее, в остаточнo-аллювиальных ржавоземах – бимодальное со снижением в структурно-метаморфических горизонтах (рис. 2). В среднем течении Амура максимальное медианное содержание P_2O_5 определяется также в гумусо-аккумулятивных горизонтах слоистых почв, минимальное – в структурно-метаморфических горизонтах brunезомов. Наибольшим разбросом между минимальным и максимальным содержанием характеризуются серогумусовые и перегнойно-глеевые почвы. Распределение P_2O_5 в профиле слоистых почв убывающее.

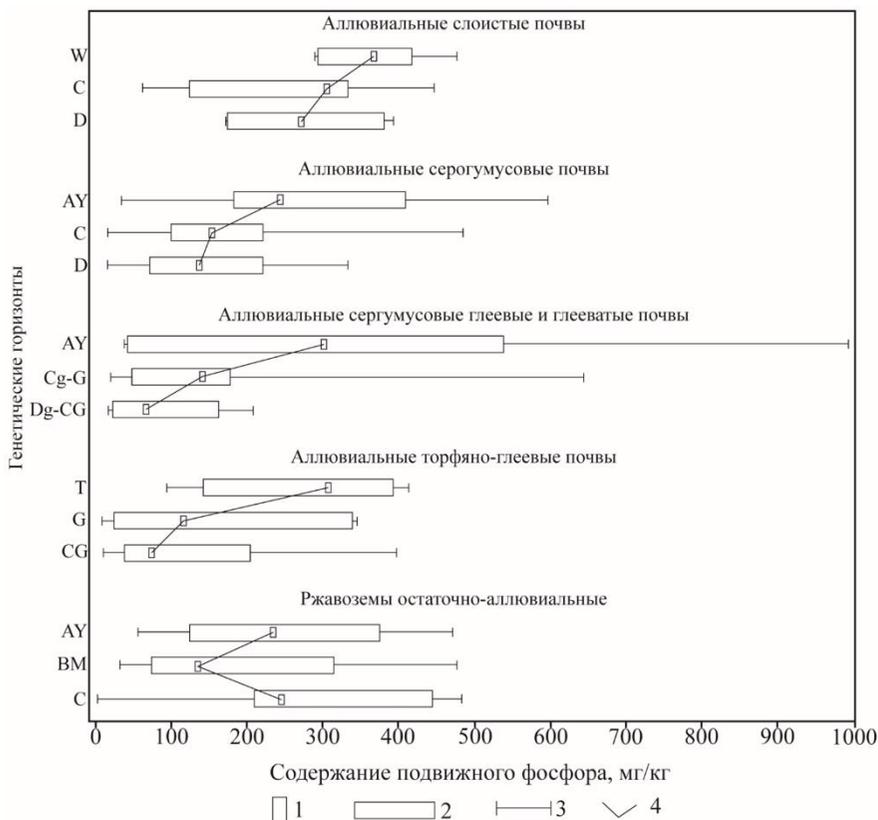


Рис. 2. Медианное, минимальное и максимальное содержание подвижных форм фосфора по генетическим горизонтам в пойменных почвах верхнего Амура. Условные обозначения: 1 – медианное содержание; 2 – процентиль 25–75%; 3 – минимум/максимум; 4 – кривая распределения медианного содержания в почвенном профиле.

Fig. 2. Median, minimum and maximum content of available for plants phosphorus in genetic horizons of floodplain soils of the upper Amur. Legend: 1 – median content; 2 – percentile 25–75%; 3 – minimum/maximum; 4 – distribution curve of the median content in the soil profile.

В остальных почвах распределение бимодальное, с убыванием в средней части профиля в серогумусовых, перегнойно-

глеевых и брунеземах и с накоплением в серогумусовых глеевых и глееватых почвах (рис. 3).

Содержание P_2O_5 в катенах верхнего Амура снижается от катены № 1 к катене № 3. Более высоким содержанием P_2O_5 в большинстве случаев характеризуются гумусово-аккумулятивные горизонты. Исключение составляют минеральные горизонты в прирусловой части поймы катены № 1 и притеррасной части поймы катены № 2. Латеральное распределение P_2O_5 в катенах верхнего течения, в пределах гумусово-аккумулятивного горизонта, характеризуется выгнутой бимодальной кривой в катене № 1 и вогнутой – в катенах № 2 и № 3. В минеральных горизонтах – бимодальное в катенах № 1 и № 2, и убывающее в катене № 3. В среднем течении Амура содержание P_2O_5 возрастает от катены № 4 к катене № 5. Латеральное распределение P_2O_5 в катене № 4 и минеральных горизонтах катены № 5 убывающее, в гумусово-аккумулятивных горизонтах – выраженное вогнутое бимодальное. Радиальное распределение характеризуется повышенным содержанием P_2O_5 в гумусово-аккумулятивных горизонтах, за исключением террасо-увала в катене № 4. Среднее содержание в катенах по ходу русла р. Амур формирует бимодальную кривую, вогнутую в центре во всех горизонтах, но с минимумом в подстилающих горизонтах (рис. 4).

Коэффициенты корреляции (r) между P_2O_5 и длиной катен характеризуются сильной и средней взаимосвязью в минеральных горизонтах катен № 3 и № 5 и в гумусово-аккумулятивных горизонтах катены № 2. Также сильной взаимосвязью обладают r между P_2O_5 и руслом реки (рис. 4).

В [1976 Walker and Syers](#) разработали модель трансформации фосфора в зависимости от развития почвы. Согласно модели, на ранних стадиях почвообразования преобладают первичные минералы фосфатов.

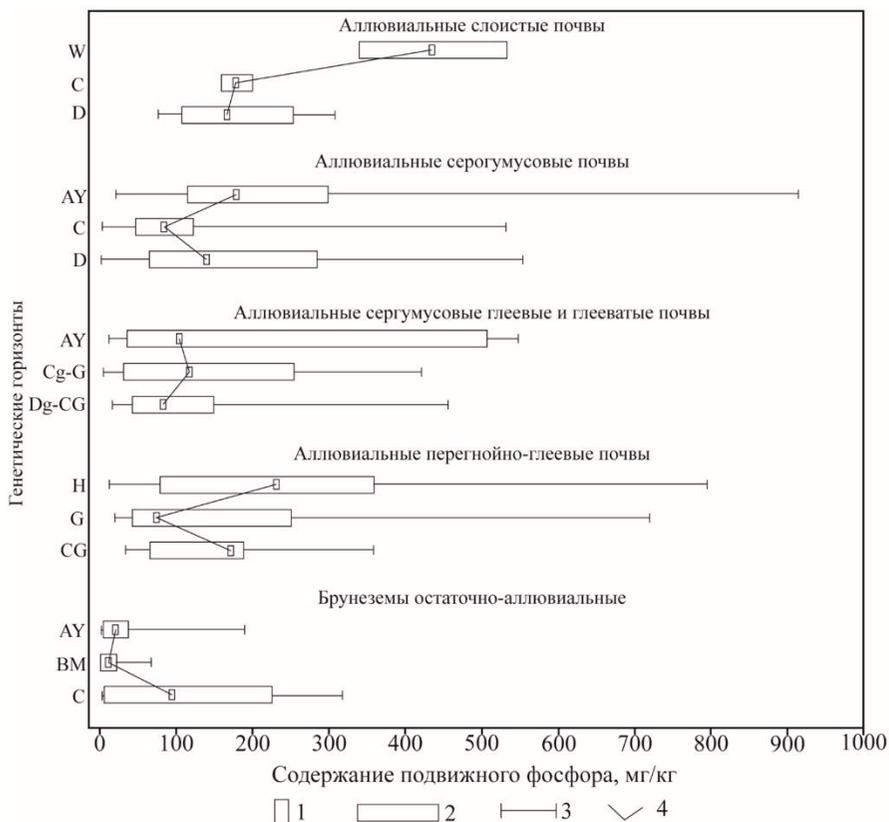
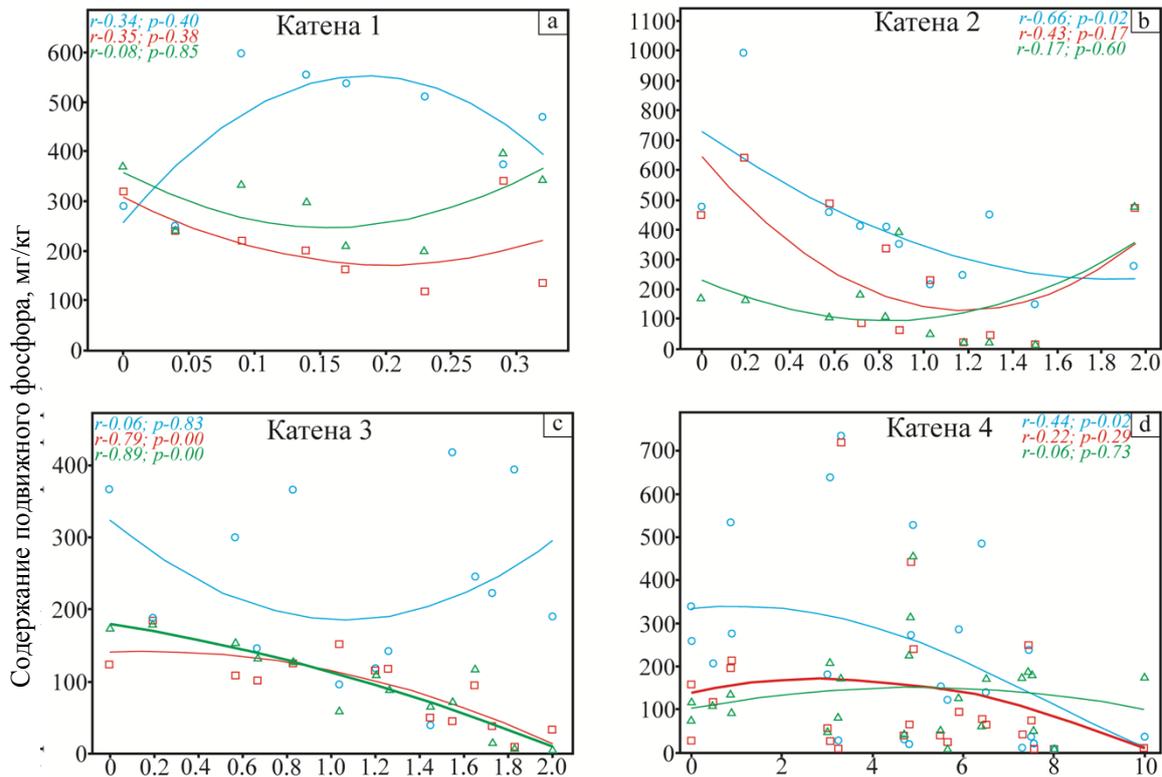


Рис. 3. Медианное, минимальное и максимальное содержание подвижных форм фосфора по генетическим горизонтам в пойменных почвах среднего Амура. Условные обозначения: 1 – медианное содержание; 2 – процентиль 25–75%; 3 – минимум/максимум; 4 – кривая распределения медианного содержания в почвенном профиле.

Fig. 3. Median, minimum and maximum content of available for plants phosphorus in genetic horizons of floodplain soils of the middle Amur. Legend: 1 – median content; 2 – percentile 25–75%; 3 – minimum/maximum; 4 – distribution curve of the median content in the soil profile.



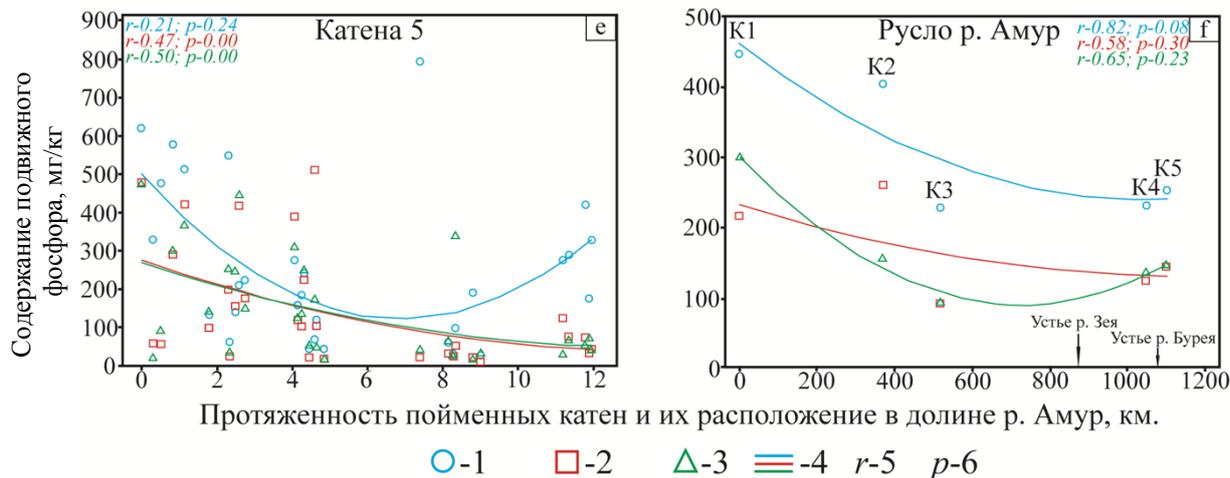


Рис. 4. Графики рассеивания, характеризующие содержание подвижных форм фосфора по генетическим горизонтам в геохимических катенах и в долине р. Амур. Условные обозначения: 1 – содержание P_2O_5 в органических горизонтах; 2 – содержание P_2O_5 в почвообразующих горизонтах аллювиальных почв и структурно-метаморфических горизонтах остаточно-аллювиальных почв; 3 – содержание P_2O_5 в подстилающих горизонтах аллювиальных почв и почвообразующих горизонтах остаточно-аллювиальных почв; 4 – полиномиальный тренд; 5 – коэффициент корреляции, характеризующий зависимость содержания P_2O_5 от протяженности катены; 6 – коэффициент достоверности.

Fig. 4. Dispersion plots characterizing the content of available for plants phosphorus in genetic horizons of geochemical catenas and in the Amur River valley. Legend: 1 – P_2O_5 content in organic horizons; 2 – P_2O_5 content in the soil-forming horizons of alluvial soils and structural-metamorphic horizons of residual alluvial soils; 3 – the content of P_2O_5 in the underlying horizons of alluvial soils and parent horizons of residual alluvial soils; 4 – polynomial trend; 5 – correlation coefficient characterizing the dependence of the phosphorus content on the length of a catena; 6 – coefficient of reliability.

Постепенно они растворяются, а высвободившийся фосфор частично поглощается растениями, а частично иммобилизуется на поверхности вторичных минералов ([Gérard, 2016](#)) и почвенных оксидах, преимущественно железа и алюминия ([Maranguit et al., 2017](#)). Поэтому с возрастом почв содержание валового фосфора будет снижаться, и в нем будет возрастать доля окклюзированного и органического фосфора, что ведет к уменьшению содержания P_2O_5 в почвенном растворе ([Walker, Syers, 1976](#)).

Данная модель хорошо объясняет почему во всех катенах самое высокое содержание P_2O_5 в Al_{cl} – это самые молодые почвы в поймах, содержащие максимум фосфора в виде первичных минералов, активно подвергающихся внутрипочвенному выветриванию. При этом нужно отметить, что профильное содержание P_2O_5 в Al_{cl} верхнего Амура в два раза выше, чем в аналогичных почвах среднего течения (рис. 2, 3). Аллювий, служащий почвообразующим субстратом, в ходе миграции с речными водами подвергается интенсивному гидрогенному выветриванию, что хорошо отражено в работе Sorokina, Gysev ([2018](#)) по притокам р. Амур. Минералы, содержащие фосфор, разрушаются, и он вымывается в речные воды. В результате, если нет притоков, подпитывающих основное русло минеральными взвесями, содержание фосфора в почвах уменьшается вниз по течению, что видно по среднему содержанию P_2O_5 в катенах вдоль русла р. Амур (рис. 4). Содержание P_2O_5 снижается от катены № 1 к катене № 3. В катенах № 4 и № 5 содержание P_2O_5 увеличивается за счет поступления аллохтонного вещества с рек Зея и Бурея, крупнейших притоков р. Амур, но незначительно. К моменту поступления в русло р. Амур аллохтонное вещество из притоков уже находится в достаточно выветрелом состоянии.

Немаловажное значение в содержании фосфора в пойменных почвах имеет характер русла реки и морфологическое строение пойменных массивов. Считается, что продуктивность поймы и доступность питательных веществ в почвах увеличиваются по ходу русла реки с увеличением мощности пойменных территорий ([Spink et al., 1998](#)). Однако наши исследования показали, что на подвижные формы фосфора в пойме р. Амур это правило не распространяется.

В верхнем течении русло р. Амур адаптивного типа, а поймы небольшие по размеру и зачастую ограничены выходами скал. Русло более узкое, а скорости течения выше, чем в среднем Амуре. В подобных условиях пойма чаще, но ненадолго, затапливается. Поемные воды занимают большую часть поймы, привнося свежее аллохтонное вещество и обновляя почвенный профиль ([Шраг, 1969](#); [Гусев, 2002](#)), что поддерживает запасы минералов, содержащих фосфор. В среднем течении русло широкопойменного типа, где ширина поймы может простираться до 20 км, а высота относительно условной межени – до 15 м. Они редко полностью затапливаются – только в период катастрофических паводков ([Гусев, 2013](#)). Почвы на повышенных гипсометрических уровнях испытывают дефицит свежего аллохтонного вещества, а органический фосфор подвержен окислению. Также в них активно протекают зональные процессы (буроземообразование), сопровождающиеся интенсивным внутripочвенным выветриванием. В результате пойменные почвы среднего течения р. Амур, по отношению к верхнему, менее обеспечены соединениями фосфора, что сказывается и на его подвижной форме. В среднем содержание P_2O_5 в почвенном профиле снизилось в Al_d на 80 мг/кг, в $Al_{дг}$ и $Al_{дг}^r$ на 40 мг/кг, в $Al_{пг}$ на 10 мг/кг.

По приведенным данным видно, что чем сильнее развиты глеевые процессы в почвах, тем слабее выражена разница по содержанию подвижных форм фосфора между почвами верхнего и среднего течения. В глеевых горизонтах формируются особые аэробные условия, при которых Fe^{+3} , с которым активно связывается фосфор, используется как акцептор электронов для микробного разложения с восстановлением до Fe^{+2} и высвобождением фосфора ([Maranguit et al., 2017](#)). Грунтовые воды нейтрализуют pH, повышая мобильность Al и связанного с ним фосфора. Снижается степень насыщенности основаниями ([Chacon et al., 2005](#)). Первичные минералы подвергаются активной деструкции ([Зайдельман, 2009](#)). Эти процессы приводят к мобилизации и повышению концентрации P_2O_5 в почвенно-грунтовых водах, и чем сильнее развиты глеевые процессы, тем больше подвижных форм фосфора в почвах.

В верхнем Амуре интенсивно развитые поемный и аллювиальные процессы способствуют частому обновлению почвенного профиля, тормозя почвообразующие, в том числе глеевые, процессы. Также для развития глеевых процессов необходимы водорастворимые, легкоподвижные органические вещества (фульвокислоты, полифенолы, аминокислоты и др.) ([Зайдельман, 2009](#)), которых при торфообразовании в $Al_{тг}$ выделяется меньше, чем в перегнойном горизонте $Al_{пг}$. По этой причине в почвах верхнего Амура больше валового фосфора, но слабее развиты глеевые процессы, а в почвах среднего Амура содержание валового фосфора ниже, но глеевые процессы более интенсивные, таким образом, среднее содержание P_2O_5 в этих почвах сопоставимо. Необходимо отметить, что при достижении бóльшей концентрации P_2O_5 в почвенно-грунтовых водах, по сравнению с грунтовыми или речными водами, он начинает активно вымываться ([Carlyle, Hill, 2001](#)), а ему на смену из почвенных минералов и оксидов поступает новый P_2O_5 . При длительном течении процессов оглеения содержание валового фосфора, а следом и его подвижных форм, может значительно снижаться. На это указывает резкое уменьшение содержания P_2O_5 в глеевом горизонте $Al_{пг}$.

Самое значительное снижение P_2O_5 отмечено в остаточно-аллювиальных почвах (на 200 мг/кг). Различиями в почвенных параметрах столь сильную дифференциации по P_2O_5 между Бл и Рж объяснить нельзя. В Рж и Бл, в сравнении с Al_d и Al_d^r , из которых они формируются, тяжелее гранулометрический состав, повышены емкость катионного обмена и содержание не силикатного Fe_2O_3 , но превышение незначительно. Между собой они различаются только морфологически и по pH, Рж более кислые. Однако анализ латерального распределения P_2O_5 в катенах показал следующую особенность: наблюдается повышенное содержание фосфора не только в Рж, но и в аллювиальных почвах, на которых сформировался березовый лес (рис. 4). Брунетемы же развиваются под луговой растительностью. Данную особенность березы как аккумулятора фосфора отмечают в ряде работ ([Matkala et al., 2020](#); [Lukina et al., 2019](#)), но четкого мнения о причинах этого явления нет. Это может объясняться особенностью разложения березового опада, при котором подвижные формы фосфора активно высво-

бождаются ([Rinnan et al., 2008](#)). Также есть предположение, что корни древесных растений, в сравнении с луговой и кустарниковой растительностью, обладают высокой транспортирующей и удерживающей способностью в отношении макро- и микроэлементов ([Jobbágy, Jackson, 2004](#)). При этом в аллювиальных почвах, сформированных в среднем течении под дубовым лесом, содержание P_2O_5 лишь немногим выше, чем в почвах, развитых под луговой растительностью.

Радиальное распределение P_2O_5 показывает, что в аллювиальных почвах он накапливается преимущественно в гумусово-аккумулятивных горизонтах (рис. 2, 3, 4). Это связано со следующими факторами: 1) разрушение первичных минералов более интенсивно протекает в зоне влияния органических кислот, продуцируемых растениями, т. е. в ризосфере ([Hinsinger et al., 2011](#)); 2) в гумусово-аккумулятивном горизонте аллювиальных почв активно, в сравнении с минеральными горизонтами, разрушаются первичные и формируются вторичные глинистые минералы и органоминеральные соединения ([Соколова и др., 2005](#); [Gérard, 2016](#)), способные сорбировать подвижные формы фосфора.

В остаточо-аллювиальных Рж и Бл P_2O_5 накапливается в почвообразующих горизонтах. Это можно объяснить процессом лессиважа, который сопровождает процесс буроземообразования ([Зонн, 1974](#)). В почвообразующие горизонты выносятся соединения железа, алюминия и глинистые минералы, сорбирующие большое количество подвижных форм фосфора. Снижение P_2O_5 в средней части профиля Ал_д среднего Амура показывает, что процесс лессиважа может начинаться в автоморфных почвах еще на стадии аллювиального почвообразования.

Латеральное распределение P_2O_5 в катенах также показывает его зависимость от возраста почв и характера растительности, формируя пики возле русла (в молодых почвах) и возле березовых лесов (рис. 4). В гумусово-аккумулятивных горизонтах под луговой растительностью и в минеральных горизонтах при удалении от русла содержание P_2O_5 главным образом снижается. В катене № 3 и катене № 5 снижение P_2O_5 сопровождается средне- и высокодостоверными коэффициентами корреляции, что указывает на схожее исходное содержание общего фосфора, подвергающееся

внутрипочвенному выветриванию в ходе эволюции аллювиальных почв. Данное предположение согласуется с мнением Никольской В.В. и Григорян Д.П. (1958) о том, что для р. Амур характерны хорошо выраженные, относительно постоянные во времени минералогические провинции, указывающие на однородность твердого стока и схожесть минералогического состава аллювиальных отложений поймы. В минеральных горизонтах этот процесс прослеживается лучше из-за отсутствия влияния накопительного фактора биоты. Отсутствие достоверных коэффициентов корреляций в катене № 4 связано с двучленным, разновозрастным строением поймы. В катене № 1 и № 2 последние почвенные разрезы катен заложены впритык к выходу скал. В их морфологическом облике есть признаки склоновых процессов в виде включений щебня и дресвы, т. е. они испытывают приток фосфора с делювием, формирующимся в ходе экзогенного выветривания горных пород.

Пойма р. Амур активно используется в хозяйственной деятельности человека, и немаловажное значение имеет практическая оценка исследуемой территории по обеспеченности P_2O_5 в соответствии с потребностями сельского хозяйства. В таблицах 1 и 2 приведены данные для сравнения содержания P_2O_5 в исследуемых почвах и потребности разных культур в обеспечении почв P_2O_5 в вытяжке Кирсанова, по данным из работы Куликовой А.Х. (2007). Так как данные по обеспеченности подвижными формами фосфора чаще всего приводятся для пахотных горизонтов, то сравниваться они будут с гумусово-аккумулятивным горизонтами.

По таблицам видно, что обеспеченность P_2O_5 у пойменных почв верхнего Амура в отношении всех культур высокая или средняя. Но небольшой размер пойменных массивов, частые паводки и холодный климат не позволяют активно использовать данные территории. Чаще всего они используются как пастбища и сенокосы. Поймы среднего Амура задействованы в сельском хозяйстве более чем на 50%. Преимущественно это Al_d , Al_d^r и B_l . Слоистые почвы занимают очень незначительные территории, а использование серогумусовых глеевых и перегнойно-глеевых почв требует значительных затрат на мелиорацию. Серогумусовые и серогумусовые глееватые почвы позволяют использовать их для

выращивания зерновых, бобовых и кормовых культур без внесения удобрений. В брунземах подвижные формы фосфора является лимитирующим фактором и необходимо внесение больших доз фосфорных удобрений.

Таблица 1. Содержание подвижных форм фосфора в гумусово-аккумулятивном горизонте пойменных почв р. Амур

Table 1. The content of available for plants phosphorus in the humus-accumulative horizon of the floodplain soils of the Amur River

Тип почв	Медианное содержание P_2O_5 в гумусово-аккумулятивном горизонте	
	Верхний Амур	Средний Амур
Аллювиальные слоистые	367	436
Аллювиальные серогумусовые	244	178
Аллювиальные серогумусовые глеевые и глееватые	302	104
Аллювиальные торфяно-глеевые и перегнойно-глеевые	308	232
Остаточно-аллювиальные ржавоземы и брунземы	235	20

Таблица 2. Обеспеченность почв подвижными формами фосфора исходя из потребностей с/х культур

Table 1. Categories of available for plants phosphorus supply in soils based on the needs of agricultural crops

Обеспеченность подвижными формами фосфора	Содержание P_2O_5 , мг/кг		
	зерновые и зернобобовые	кормовые корнеплоды, картофель	овощные, технические культуры
Очень низкая	<30	<80	<150
Низкая	<80	<150	<200
Средняя	80–150	150–200	200–300
Высокая	>150	>200	>300

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что подвижные формы фосфора не являются фактором, лимитирующим плодородие почв в пойме верхнего и среднего Амура. Исключение составляют брунетземы, однако они являются пойменными почвами лишь номинально. Морфологически они формируются в пределах поймы, но при этом полностью вышли из зоны пойменного режима. Наложение полученных данных о содержании P_2O_5 в почвах катен на русло Амура позволяет сделать предположение, что в нижнем течении в большинстве почв будет наблюдаться его дефицит. Латеральное профильное содержание подвижных форм фосфора в пойменных массивах уменьшается от русла к террасам. Поэтому самые обеспеченные фосфором почвы – примитивные аллювиальные слоистые. Увеличение ширины и высоты поймы способствует затуханию пойменных и аллювиальных процессов, обеспечивающих поддержание фосфорного баланса в почвах, и интенсифицирует внутрпочвенное выветривание, что приводит к снижению содержания подвижных форм фосфора.

По радиальному распределению подвижные формы фосфора тяготеют к гумусо-аккумулятивному горизонту за счет разрушающей и транспортирующей деятельности корней растений. При этом сильным аккумулятором подвижных форм фосфора является березовый лес. Развитие глеевых процессов в аллювиальных почвах на начальных этапах эволюции почв по гидроморфному типу способствует поддержанию высокого содержания в почвах подвижных форм фосфора. Но в долгосрочной перспективе может привести к истощению его запасов в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьева З.С.* Роль органических и органо-минеральных составляющих в формировании фосфатного режима пахотных горизонтов эрозионно-деградированных агродерново-подзолистых почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. №. 78. С. 70–78. DOI: [10.19047/0136-1694-2015-78-70-86](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-78-70-86).
2. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
3. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высшая школа, 1968. 427 с.

4. Гусев М.Н. Морфодинамика днища долины Верхнего Амура. Владивосток: Дальнаука, 2002. 232 с.
5. Гусев М.Н., Помигуев Ю.В. Формирование днища долины реки Амур на участке от устья реки Зея до Хинганского ущелья // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 121–129.
6. Ельшаева И.В. Фосфатный режим светло-серых лесных почв: Дис. ... к. с.-х. наук: Спец. 06.0Г04. Санкт-Петербург, 1998. 128 с.
7. Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: КДУ, 2009. 720 с.
8. Зонн С.В. Буроземообразование и псевдоподзоливание в почвах Русской Равнины. М.: Изд-во Наука, 1974. 275 с.
9. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М., Карпунин А.И., Карпова Д.В. Комплекс технологических, агрохимических и биологических воздействий на фосфатный режим почв и продуктивность земледелия // Плодородие. 2009. № 1. С. 4–7.
10. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2016. 608 с.
11. Королева И.Е. Выбор методов оценки изменения фосфатного и калийного состояния почв при антропогенном воздействии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 48–57. DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-48-57](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-48-57).
12. Корзун М.А., Костюхин Л.Н., Тарасова Г.Н., Шевчук В.С. Подвижный фосфор в серых лесных почвах Тулуно-Иркутской лесостепи // Агрохимия. 1993. № 10. С. 97–103.
13. Куликова А.Х. Агроэкологическая оценка почвенного покрова и воспроизводство плодородия почвы. Ульяновск: УГСХА, 2007. 44 с.
14. Новицкий М.В., Донских Д.В., Чернов И.Н. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. Санкт-Петербург: Проспект Науки, 2009. 320 с.
15. Ознобихин В.И., Синельников Э.П., Рыбачук Н.А. Классификация и агропроизводственные группировки почв Приморского края. Владивосток. ДВО РАН, 1994. 93 с.
16. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
17. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 608 с.
18. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
19. Шраг В.И. Пойменные почвы и их сельскохозяйственное использование. М.: Россельхозиздат, 1969. 270 с.

20. Янин А.Л., Жарков М.А. Фосфор и калий в природе. Новосибирск: Изд-во Наука, Сибирское отделение, 1986. 188 с.
21. Alexander R.B., Smith R.A., Schwarz G.E., Boyer E.W., Nolan J.V., Brakebill J.W. Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin // *Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 42. P. 822–830. DOI: [10.1021/es0716103](https://doi.org/10.1021/es0716103).
22. Amarawansa G., Kumaragamage D., Flaten D., Zvomuya F., Tenuta M. Phosphorus mobilization from manure-amended and unamended alkaline soils to overlying water during simulated flooding // *Journal of Environmental Quality*. 2015. Vol. 44. P. 1252–1262. DOI: [10.2134/jeq2014.10.0457](https://doi.org/10.2134/jeq2014.10.0457).
23. Bagyaraj D.J., Krishnaraj P.U., Khanuja S.P.S. Mineral phosphate solubilization: agronomic implications, mechanism and molecular genetics // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2000. Vol. 66 (2, 3). P. 69–82.
24. Bordena R.W., Baillie I.C., Hallett S.H. The East African contribution to the formalisation of the soil catena concept // *Catena*. 2020. Vol. 185. 104291. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104291](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104291).
25. Bostrom B., Andersen J.M., Fleischer S., Jansson M. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface // *Hydrobiologia*. 1988. Vol. 170. P. 229–244.
26. Carlyle G.C., Hill A.R. Groundwater phosphate dynamics in a river riparian zone: Effects of hydrologic flow paths, lithology, and redox chemistry // *Journal of Hydrology*. 2001. Vol. 247. P. 151–168. DOI: [10.1016/S0022-1694\(01\)00375-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00375-4).
27. Chacon N., Dezzio N., Munoz B., Rodriguez J. Implications of soil organic carbon and the biogeochemistry of iron and aluminum on soil phosphorus distribution in flooded forests of the lower Orinoco River, Venezuela // *Biogeochemistry*. 2005. Vol. 73. P. 555–566. DOI: [10.1007/s10533-004-1773-7](https://doi.org/10.1007/s10533-004-1773-7).
28. Chen C.R., Condon L.M., Davis M.R., Sherlock R.R. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand // *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 177. P. 539–557. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00450-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00450-4).
29. Fink J.R., Inda A.V., Tiecher T., Barrón V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability // *Ciência e Agrotecnologia*. 2016. Vol. 40 (4). P. 369–379. DOI: [10.1590/1413-70542016404023016](https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016).
30. Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils – A myth revisited // *Geoderma*. 2016. Vol. 262. P. 213–226. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.036](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036).
31. Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gerard F., Jourdan C., Laclau J-P., Cadre E., Jaillard B., Plassard C. Acquisition of phosphorus and other poorly

- mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? // *Plant and Soil*. 2011. Vol. 348. P. 29–61. DOI: [10.1007/s11104-011-0903-y](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y).
32. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
33. *Jana B.B.* Distribution pattern and role of phosphate solubilizing bacteria in the enhancement of fertilizer value of rock phosphate in aquatic ponds: state-of-the-art. In: First international meeting on microbial phosphate solubilization. Springer, 2007. Vol. 102. P. 229–238. DOI: [10.1007/978-1-4020-5765-6_34](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5765-6_34).
34. *Jobbágy E.G., Jackson R.B.* The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales // *Ecology*. 2004. Vol. 85. P. 2380–2389. DOI: [10.1890/03-0245](https://doi.org/10.1890/03-0245).
35. *Krögera R., Moore M.T.* Phosphorus dynamics within agricultural drainage ditches in the lower Mississippi Alluvial Valley // *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37. P. 1905–1909. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2011.06.042](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.042).
36. *Lair G.J., Zehetner F., Fiebig M., Gerzabek M.H., van Gestel C.A.M., Hein T., Hohensinner S., Hsu P., Jones K.C., Jordan G., Koelmans A.A., Poot A., Slijkerman D.M.E., Totsche K.U., Bondar-Kunze E., Barth J.A.C.* How do long-term development and periodical changes of river–floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from European rivers // *Environmental Pollution*. 2009. Vol. 157. P. 3336–3346. DOI: [10.1016/j.envpol.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.004).
37. *Lehmann J., Lan Z., Hyland C., Sato S., Solomon D., Ketterings Q.M.* Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils // *Environmental Science and Technology*. 2005. Vol. 39. P. 6672–6680. DOI: [10.1021/es047997g](https://doi.org/10.1021/es047997g).
38. *Lukina N., Tikhonova E., Danilova M., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Kuznetsova A., Smirnov A., Braslavskaya T., Gornov A., Shashkov M., Knyazeva S., Kataev A., Isaeva L., and Zukert N.* Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia // *Forest Ecosystems*. 2019. Vol. 6 (34). P. 1–19. DOI: [10.1186/s40663-019-0190-2](https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2).
39. *Maranguita D., Guillaumec T., Kuzyakova Y.* Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms // *Catena*. 2017. Vol. 158. P. 161–170. DOI: [10.1016/j.catena.2017.06.023](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.023).
40. *Matkala L., Salemaa M., Back J.* Soil total phosphorus and nitrogen explain vegetation community composition in a northern forest ecosystem near a phosphate massif // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17. P. 1535–1556. DOI: [10.5194/bg-17-1535-2020](https://doi.org/10.5194/bg-17-1535-2020).

41. *Owens P.N., Walling D.E.* The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins // *Water Research*. 2002. Vol. 36 (3). P. 685–701. DOI: [10.1016/S0043-1354\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00247-0).
42. *Quintero C.E., Gutiérrez-Boem F.H., Befani M.R., Boschetti N.G.* Effects of soil flooding on P transformation in soils of the Mesopotamia region, Argentina // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2007. Vol. 170. P. 500–505. DOI: [10.1002/JPLN.200625015](https://doi.org/10.1002/JPLN.200625015).
43. *Rakotoson T., Rabeharisoa T., Smolders E.* Effects of soil flooding and organic matter addition on plant accessible phosphorus in a tropical paddy soil: an isotope dilution study // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2016. Vol. 179 (6). P. 765–774. DOI: [10.1002/jpln.201500383](https://doi.org/10.1002/jpln.201500383).
44. *Richardson A.E., George T.S., Maarten H., Simpson R.J.* Utilization of soil organic phosphorus by higher plants // *Organic phosphorus in the environment*. 1st edn. CABI Publishing, Cambridge, 2005. P. 165–184. DOI: [10.1079/9780851998220.0165](https://doi.org/10.1079/9780851998220.0165).
45. *Rinnan R., Michelsen A., Jonasson S.* Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem // *Applied Soil Ecology*. 2008. Vol. 39. P. 271–281. DOI: [10.1016/j.apsoil.2007.12.014](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.014).
46. *Rogova O.B., Kolobova N.A., Ivanov A.L.* Phosphorus sorption capacity of gray forest soil as dependent on fertilization system // *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 5, pp. 536–541. DOI: [10.1134/S1064229318050101](https://doi.org/10.1134/S1064229318050101).
47. *Salazar O., Fuentes I., Seguel O., Nájera F., Casanova M.* Assessment of nitrogen and phosphorus pathways at the profile of over-fertilised alluvial soils. Implications for best management practices // *Water, Air & Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. No. 223. DOI: [10.1007/s11270-018-3854-6](https://doi.org/10.1007/s11270-018-3854-6).
48. *Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E.* Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 408/409. P. 145–152.
49. *Sorokina O.A., Gysev M.N.* Weathering reflected by the chemical composition of alluvial soils from the Zeya and Selemdzha river valleys // *Science China Earth Sciences*. 2018. Vol. 61 (5). P. 604–613. DOI: [10.1007/s11430-017-9162-5](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9162-5).
50. *Spink A., Sparks R.E., van Oorschot M., Verhoeven J.T.A.* Nutrient dynamics of large river floodplains // *Regulated Rivers Research & Management*. 1998. Vol. 14. P. 203–16.
51. *Tiessen H., Stewart J.W.B., Cole C.V.* Pathways of phosphorous transformations in soils of differing pedogenesis // *Soil Science Society of America Journal*. 1984. Vol. 48. P. 853–858.
52. *Walker T.W., Syers J.K.* The fate of phosphorus during pedogenesis // *Geoderma*. 1976. Vol. 15. P. 1–19.
53. *Wardle D.A., Walker L.R., Bardgett R.D.* Ecosystem properties and forest

decline in contrasting long-term chronosequences // Science. 2004. Vol. 305. P. 509–513. DOI: [10.1126/science.1098778](https://doi.org/10.1126/science.1098778).

REFERENCES

1. Artemieva Z.S., The role of organic and organo-mineral components in the formation of the phosphate regime in plough horizons of erosion-degraded agro soddy-podzolic soils, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, Vol. 78, pp. 70–86, DOI: [10.19047/0136-1694-2015-78-70-86](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-78-70-86).
2. Barber S.A., *Biologicheskaya dostupnost' pitatel'nykh veshchestv v pochve* (Bioavailability of nutrients in the soil), Moscow: Agropromizdat, 1988, 376 p.
3. Vozbutskaya A.E., *Khimiya pochvy* (Soil chemistry), Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 427 p.
4. Gusev M.N., *Morfodinamika dnishcha doliny Verkhnego Amura* (Morphodynamics of the bottom of the valley of the Amur River upper reaches), Vladivostok: Dal'nauka, 2002, 232 p.
5. Gusev M.N., Pomiguyev Yu.V., Formirovanie dnishcha doliny reki Amur na uchastke ot ust'ya reki Zeya do Khinganskogo ushel'ya (Formation of the bottom of the Amur River valley in the section from the mouth of the Zeya Rver to the Khingan gorge), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2013, No. 4, pp. 121–129.
6. El'shaeva I.V., *Fosfatnyi rezhim svetlo-serykh lesnykh pochv: Dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Phosphate regime of light gray forest soils: Cand. agricultural. sci. thesis), Sankt-Peterburg, 1998, 128 p.
7. Zaidel'man F.R., *Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov* (Genesis and ecological foundations of soil and landscape reclamation), Moscow: KDU, 2009, 720 p.
8. Zonn S.V., *Burozemoobrazovanie i psevdopodzolivanie v pochvakh Russkoi Ravniny* (Brown soil formation and pseudopodzolization in the soils of the Russian Plain), Moscow: Izdatel'svo Nauka, 1974, 275 p.
9. Ivanov A.L., Sychev V.G., Derzhavin L.M., Karpukhin A.I., Karpova D.V., Kompleks tekhnologicheskikh, agrokhimicheskikh i biologicheskikh vozdeistvii na fosfatnyi rezhim pochv i produktivnost' zemledeliya (Complex of technological, agrochemical and biological effects on the phosphate regime of soils and agricultural productivity), *Plodorodie*, 2009, No. 1, pp. 4–7.
10. Kidin V.V., Torshin S.P., *Agrokhimiya* (Agrochemistry), Moscow: Prospekt, 2016, 608 p.
11. Koroleva I.E., Vybora metodov otsenki izmeneniya fosfatnogo i kaliinogo sostoyaniya pochv pri antropogennom vozdeistvii (The choice of methods for assessing changes in the phosphate and potassium state of soils under

anthropogenic impact), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2010, No. 65, pp. 48–57, DOI: [10.19047/0136-1694-2010-65-48-57](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-48-57).

12. Korzun M.A., Kostyukhin L.N., Tarasova G.N., Shevchuk B.C., Podvizhnyi fosfor v serykh-lesnykh pochvakh Tuluno-Irkutskoi lesostepi (Mobile phosphorus in gray forest soils of the Tuluno-Irkutsk forest-steppe), *Agrokhimiya*, 1993, No. 10, pp. 97–103.

13. Kulikova A.Kh., *Agroekologicheskaya otsenka pochvennogo pokrova i vosпроизводство plodorodiya pochvy* (Agroecological assessment of soil cover and reproduction of soil fertility), Ul'yanovsk: UGSKhA, 2007, 44 p.

14. Novitskii M.V., Donskikh D.V., Chernov I.N., *Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu* (Laboratory and practical classes in soil science), St-Petersburg: Prospekt Nauki, 2009, 320 p.

15. Oznobikhin V.I., Sinel'nikov E.P., Rybachuk N.A., *Klassifikatsiya i agroпроизvodstvennye gruppировки почв Приморского края* (Classification and agro-industrial groupings of soils in Primorsky region), Vladivostok, DVO RAN, 1994, 93 p.

16. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I., *Glinistye mineraly v pochvakh* (Clay minerals in soils), Tula: Grif i K, 2005, 336 p.

17. Chalov R.S., *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Tom 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* (River channels: theory, geography, practice. Volume 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions for the formation of river channels), Moscow: Izdatel'svo LKI, 2007, 608 p.

18. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika почв России* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 341 p.

19. Shrag V.I., *Poimennye pochvy i ikh sel'skokhozyaistvennoe ispol'zovanie* (Floodplain soils and their agricultural use), Moscow: Rossel'khozizdat, 1969, 270 p.

20. Yanshin A.L., Zharkov M.A., *Fosfor i kalii v prirode* (Phosphorus and potassium in nature), Novosibirsk: Izdatel'stvo Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1986, 188 p.

21. Alexander R.B., Smith R.A., Schwarz G.E., Boyer E.W., Nolan J.V., Brakebill J.W., Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin, *Environmental Science & Technology*, 2008, Vol. 42, pp. 822–830, DOI: [10.1021/es0716103](https://doi.org/10.1021/es0716103).

22. Amarawansa G., Kumaragamage D., Flaten D., Zvomuya F., Tenuta M., Phosphorus mobilization from manure-amended and unamended alkaline soils to overlying water during simulated flooding, *Journal of Environmental Quality*, 2015, Vol. 44, pp. 1252–1262, DOI: [10.2134/jeq2014.10.0457](https://doi.org/10.2134/jeq2014.10.0457).

23. Bagyaraj D.J., Krishnaraj P.U., Khanuja S.P.S., Mineral phosphate solubilization: agronomic implications, mechanism and molecular genetics, *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2000, Vol. 66 (2, 3), pp. 69–82.
24. Bordena R.W., Bailliea I.C., Halletta S.H., The East African contribution to the formalisation of the soil catena concept, *Catena*, 2020, Vol. 185, 104291, DOI: [10.1016/j.catena.2019.104291](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104291).
25. Bostrom B., Andersen J.M., Fleischer S., Jansson M., Exchange of phosphorus across the sediment-water interface, *Hydrobiologia*, 1988, Vol. 170, pp. 229–244.
26. Carlyle G.C., Hill A.R., Groundwater phosphate dynamics in a river riparian zone: Effects of hydrologic flow paths, lithology, and redox chemistry, *Journal of Hydrology*, 2001, Vol. 247, pp. 151–168, DOI: [10.1016/S0022-1694\(01\)00375-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00375-4).
27. Chacon N., Dezzee N., Munoz B., Rodriguez J., Implications of soil organic carbon and the biogeochemistry of iron and aluminum on soil phosphorus distribution in flooded forests of the lower Orinoco River, Venezuela, *Biogeochemistry*, 2005, Vol. 73, pp. 555–566, DOI: [10.1007/s10533-004-1773-7](https://doi.org/10.1007/s10533-004-1773-7).
28. Chen C.R., Condron L.M., Davis M.R., Sherlock R.R., Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand, *Forest Ecology and Management*, 2003, Vol. 177, pp. 539–557, DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00450-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00450-4).
29. Fink J.R., Inda A.V., Tiecher T., Barrón V., Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability, *Ciência e Agrotecnologia*, 2016, Vol. 40 (4), pp. 369–379, DOI: [10.1590/1413-70542016404023016](https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016).
30. Gérard F., Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils – A myth revisited, *Geoderma*, 2016, Vol. 262, pp. 213–226, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.036](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036).
31. Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gerard F., Jourdan C., Laclau J-P., Cadre E. Jaillard B., Plassard C., Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, 2011, Vol. 348, pp. 29–61, DOI: [10.1007/s11104-011-0903-y](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y).
32. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports, No. 106, FAO, Rome, 2014, 181 p.
33. Jana B.B., Distribution pattern and role of phosphate solubilizing bacteria in the enhancement of fertilizer value of rock phosphate in aquatic ponds: state-of-the-art, In: *First international meeting on microbial phosphate*

solubilization, Springer, 2007, Vol. 102, pp. 229–238, DOI: [10.1007/978-1-4020-5765-6_34](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5765-6_34).

34. Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales, *Ecology*, 2004, Vol. 85, pp. 2380–2389, DOI: [10.1890/03-0245](https://doi.org/10.1890/03-0245).

35. Krögera R., Moore M.T.6 Phosphorus dynamics within agricultural drainage ditches in the lower Mississippi Alluvial Valley, *Ecological Engineering*, 2011, Vol. 37, pp. 1905–1909, DOI: [10.1016/j.ecoleng.2011.06.042](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.042).

36. Lair G.J., Zehetner F., Fiebig M., Gerzabek M.H., van Gestel C.A.M., Hein T., Hohensinner S., Hsu P., Jones K.C., Jordan G., Koelmans A.A., Poot A., Slijkerman D.M.E., Totsche K.U., Bondar-Kunze E., Barth J.A.C., How do long-term development and periodical changes of river–floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from European rivers, *Environmental Pollution*, 2009, Vol. 157, pp. 3336–3346, DOI: [10.1016/j.envpol.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.004).

37. Lehmann J., Lan Z., Hyland C., Sato S., Solomon D., Ketterings Q.M., Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils, *Environmental Science and Technology*, 2005, Vol. 39, pp. 6672–6680, DOI: [10.1021/es047997g](https://doi.org/10.1021/es047997g).

38. Lukina N., Tikhonova E., Danilova M., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Kuznetsova A., Smirnov A., Braslavskaya T., Gornov A., Shashkov M., Knyazeva S., Kataev A., Isaeva L., Zukert N., Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia, *Forest Ecosystems*, 2019, Vol. 6 (34), pp. 1–19, DOI: [10.1186/s40663-019-0190-2](https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2).

39. Maranguita D., Guillaume T., Kuzyakova Y., Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms, *Catena*, 2017, Vol. 158, pp. 161–170, DOI: [10.1016/j.catena.2017.06.023](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.023).

40. Matkala L., Salemaa M., Back J., Soil total phosphorus and nitrogen explain vegetation community composition in a northern forest ecosystem near a phosphate massif, *Biogeosciences*, 2020, Vol. 17, pp. 1535–1556, DOI: [10.5194/bg-17-1535-2020](https://doi.org/10.5194/bg-17-1535-2020).

41. Owens P.N., Walling D.E., The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins, *Water Research*, 2002, Vol. 36 (3), pp. 685–701, DOI: [10.1016/S0043-1354\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00247-0).

42. Quintero C.E., Gutiérrez-Boem F.H., Befani M.R., Boschetti N.G., Effects of soil flooding on P transformation in soils of the Mesopotamia region, Argentina, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, Vol. 170, pp. 500–505, DOI: [10.1002/JPLN.200625015](https://doi.org/10.1002/JPLN.200625015).

43. Rakotoson T., Rabeharisoa T., Smolders E., Effects of soil flooding and organic matter addition on plant accessible phosphorus in a tropical paddy soil: an isotope dilution study, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, Vol. 179 (6), p. 765–774, DOI: [10.1002/jpln.201500383](https://doi.org/10.1002/jpln.201500383).
44. Richardson A.E., George T.S., Maarten H., Simpson R.J., Utilization of soil organic phosphorus by higher plants, In: *Organic phosphorus in the environment*, CABI Publishing, Cambridge, 2005, pp. 165–184, DOI: [10.1079/9780851998220.0165](https://doi.org/10.1079/9780851998220.0165).
45. Rinnan R., Michelsen A., Jonasson S., Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem, *Applied Soil Ecology*, 2008, Vol. 39, pp. 271–281, DOI: [10.1016/j.apsoil.2007.12.014](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.014).
46. Rogova O.B., Kolobova N.A., Ivanov A.L., Phosphorus sorption capacity of gray forest soil as dependent on fertilization system, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 5, pp. 536–541, DOI: [10.1134/S1064229318050101](https://doi.org/10.1134/S1064229318050101).
47. Salazar O., Fuentes I., Seguel O., Nájera F., Casanova M., Assessment of nitrogen and phosphorus pathways at the profile of over-fertilised alluvial soils. Implications for best management practices, *Water, Air & Soil Pollution*, 2018, Vol. 229, No. 223, DOI: [10.1007/s11270-018-3854-6](https://doi.org/10.1007/s11270-018-3854-6).
48. Søndergaard M., Jensen J.P., Jeppesen E., Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes, *Hydrobiologia*, 1999, Vol. 408/409, pp. 145–152.
49. Sorokina O.A., Gysev M.N., Weathering reflected by the chemical composition of alluvial soils from the Zeya and Selemdzha river valleys, *Science China Earth Sciences*, 2018, Vol. 61 (5), pp. 604–613, DOI: [10.1007/s11430-017-9162-5](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9162-5).
50. Spink A., Sparks R.E., van Oorschot M., Verhoeven J.T.A., Nutrient dynamics of large river floodplains, *Regulated Rivers Research & Management*, 1998, Vol. 14, pp. 203–16.
51. Tiessen H., Stewart J.W.B., Cole C.V., Pathways of phosphorous transformations in soils of differing pedogenesis, *Soil Science Society of America Journal*, 1984, Vol. 48, pp. 853–858.
52. Walker T.W., Syers J.K., The fate of phosphorus during pedogenesis, *Geoderma*, 1976, Vol. 15, pp. 1–19.
53. Wardle D.A., Walker L.R., Bardgett R.D., Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences, *Science*, 2004, Vol. 305, pp. 509–513, DOI: [10.1126/science.1098778](https://doi.org/10.1126/science.1098778).