

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193



Ссылки для цитирования:

Денисова Г.И., Карпова Д.В. Распределение фосфора в агрегатах разного размера в дерново-подзолистой почве склонового ландшафта // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 174-193. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193

Cite this article as:

Denisova G.I., Karpova D.V., Distribution of phosphorus in aggregates of different sizes in sod-podzolic soil of the slope landscape, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 174-193, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-174-193

Распределение фосфора в агрегатах разного размера в дерново-подзолистой почве склонового ландшафта

© 2026 г. Г. И. Денисова^{1*}, Д. В. Карпова^{2**}

¹Почвенно-экологический центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Московская обл., Солнечногорский р-н, д. Чашиново,

*<https://orcid.org/0009-0005-9841-9444>,
e-mail: galya-denisova787@yandex.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1,

**e-mail: karpovad@mail.ru.

Поступила в редакцию 17.03.2026, принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Перераспределение фосфора в почвенном покрове представляет собой важную научную и практическую проблему. Рассматривать фосфор как “неподвижный” элемент почвы не вполне корректно, поскольку его соединения могут активно перераспределяться в ходе эрозионных процессов. Результаты проведенного исследования показали, что участки аккумуляции почвенных частиц не являются участками аккумуляции фосфора. В работе были изучены различные формы фосфора в дерново-подзолистой почве, приуроченной к разным элементам склона. Установлено, что подвижные, минеральные и валовые формы фосфора преимущественно накапливаются в верхней части склона. При продвижении вниз по склону их содержание достоверно

снижается, при этом статистически значимые различия между почвами нижней части склона и его подножия не выявлены ($p > 0.05$). Анализ водопрочных агрегатов позволил заключить, что основной причиной выноса фосфора является водный режим исследуемых позиций склона. В воздушно-сухих агрегатах разных размерных фракций содержание подвижного и валового фосфора существенно не различается. Агрономически ценные агрегаты (размером 2–5 мм в диаметре) преимущественно накапливают минеральный фосфор. Следовательно, они играют ключевую роль в аккумуляции минеральных малоподвижных соединений фосфора.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; углерод органических соединений; подвижный фосфор; минеральный фосфор; валовый фосфор.

Distribution of phosphorus in aggregates of different sizes in sod-podzolic soil of the slope landscape

© 2026 G. I. Denisova^{1*}, D. V. Karpova^{2**}

¹*Educational and Experimental Soil and Ecological Center,
Moscow State University,
Chashnikovo 141592, Moscow oblast, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0009-0005-9841-9444>,
e-mail: galya-denisova787@yandex.ru.*

²*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation,
**e-mail: karpovad@mail.ru.*

Received 17.03.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Redistribution of phosphorous is very important problem. Naming phosphorous “immobile” soil element is inaccurate, because it easily washing away due to erosion proses. In our research we observed, that the point of soil particles accumulation are not points of phosphorous accumulation. We examined different forms of phosphorous in soil: mobile, mineral, organic and total. Mobile phosphorous, mineral phosphorous and total phosphorous mostly accumulated at the top of the slope. Down the slope, their content decreases considerably, without significant differences between the soil at the slope and at the foot of the slope (p -value < 0.05). Moreover, the examination of water-stable aggregates leads to the conclusion, that water-regime on the slope and in the bottom of the slope is the main reason of phosphorus removal. The air-dry different sized aggregates mostly contain approximately equal amounts of

mobile and total phosphorous. They are aggregates measuring 5–2 millimeters in diameter which predominantly accumulate mineral phosphorus, so agronomically valuable aggregates play the key role in mineral immobile phosphorous compounds accumulation.

Keywords: Albeluvisols; organic carbon; mobile phosphorous; mineral phosphorus; total phosphorous.

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор является одним из ключевых макроэлементов в жизни растений. В отличие от азота и углерода, он не поступает в растения из атмосферы; его основным источником служит материнская порода, прежде всего содержащиеся в ней апатиты. В процессе выветривания фосфор может вовлекаться в биологический круговорот и переходить во фракцию органических фосфатов. В дальнейшем эти соединения трансформируются во вторичные минеральные формы, связанные с кальцием и полуторными оксидами, подвижность которых со временем снижается. Соотношение между органическими и минеральными формами фосфора в почве определяется направленностью почвообразовательного процесса (Иванов, 2012).

В среднем по России содержание валового фосфора в дерново-подзолистых почвах колеблется от 1050 мг/кг в легкосуглинистых и супесчаных разновидностях до 1170 мг/кг в суглинистых; при этом лишь немногим более четверти этого количества приходится на органические формы фосфора (Иванов, 2012). Основными формами миграции фосфора в почве являются органические фосфаты, а также фосфаты, ассоциированные с органическим веществом посредством кальциевых мостиков. По профилю почвы фосфор распределен неравномерно: в дерново-подзолистых почвах его содержание резко снижается в элювиальном горизонте (почти в 5–10 раз) по сравнению с гумусовым горизонтом; в черноземах оно коррелирует с содержанием органического вещества, а в агропочвах максимум фосфора в большинстве случаев приурочен к зонам внесения удобрений (Медведев и др., 2016).

Основная проблема применения фосфорных удобрений в сельском хозяйстве состоит в их сравнительно низкой эффективности: растениями используется лишь 25–35% внесенного фосфо-

ра (Иванов, 2012). Вследствие этого возрастает риск выноса фосфора с поверхностным стоком и в результате эрозионных процессов, что способствует загрязнению водоемов. Фосфор относится к загрязняющим веществам 3-го класса опасности (Приказ Минсельхоза России..., 2016). Его избыточное поступление в водные объекты может вызывать интенсивное развитие водорослей, помутнение воды, дефицит кислорода, снижение видовой разнообразия и общую деградацию экосистем (Evans et al., 2020).

В почвах лесной зоны возврат фосфора с растительными остатками не превышает половины его потребления, тогда как для пашни эта величина может достигать 70%. В агроэкосистемах потери фосфора значительно возрастают вследствие поверхностного стока и водной эрозии (Иванов, 2012; Alewell et al., 2020). Поэтому, по оценкам, около 43% почв мира испытывают дефицит фосфора (Liu et al., 2012). При этом зоны аккумуляции смытого материала не всегда совпадают с зонами аккумуляции смытого фосфора, хотя содержание глинистых частиц положительно коррелирует с накоплением фосфора (Corbee, 2021). Для подвижного фосфора на склонах южных черноземов описана иная картина: в ложбинах его содержание у подножия возрастает, тогда как на выпуклых формах рельефа максимальные значения могут наблюдаться в средней части склона, а к подножию снижаться (Медведев и др., 2016). Для черноземов обыкновенных также показано, что перераспределение подвижного фосфора зависит от экспозиции склона: на южных склонах более высокие значения отмечаются на вершине, а на северных – в нижней части склона, в зоне частичной аккумуляции (Губарев и др., 2019).

В исследованиях зависимости между объемом поверхностного стока и потерями подвижного фосфора получены неоднозначные результаты. Одни авторы не выявили между ними отчетливой корреляции, хотя отмечали широкие колебания концентрации фосфора практически на всем протяжении периода стока. Другие исследователи, работавшие на склоновых участках, напротив, фиксировали сравнительно небольшую изменчивость концентраций, выраженную главным образом в начальный период стока (Han, 2010).

На содержание доступного фосфора в почве влияют также циклы промерзания–оттаивания. Прежде всего они изменяют динамику фосфора за счет разрыва связей с агрегатами, повышая доступность ассоциированных с ними соединений (Li et al., 2022). Циклы увлажнения–иссушения также воздействуют на фосфорный режим: в песчаных почвах показано, что после первого такого цикла количество фосфора, связанного с микробной биомассой, уменьшается примерно вдвое. Одновременное снижение сорбции фосфора может свидетельствовать о том, что высвобожденный микробный фосфор переходит в адсорбированное состояние, а извлекаемый водный фосфор косвенно увеличивается вследствие уменьшения сорбции. Однако при частом повторении циклов увлажнения–иссушения почва достаточно быстро адаптируется к таким условиям (Chen et al., 2021).

Циклы увлажнения–иссушения и промерзания–оттаивания влияют и на структуру почвы. Согласно современным данным, циклы промерзания и оттаивания отрицательно сказываются на распределении воздушно-сухих агрегатов (Huang et al., 2021; Li et al., 2022). При этом увеличивается содержание агрегатов диаметром < 0.25 и $1\text{--}2$ мм, особенно на склонах северо-западной экспозиции. Хотя содержание углерода в агрегатах разного размера может оставаться неизменным, его качественный состав существенно различается (Холодов, 2020). Имеются также работы, указывающие на зависимость содержания подвижного фосфора от размера агрегатов. Так, на затененном склоне наибольшее относительное содержание доступного фосфора наблюдалось в агрегатах < 0.25 и > 5 мм, а наименьшее – в агрегатах $2\text{--}5$ мм, тогда как на освещенном склоне содержание фосфора постепенно возрастало от мелких агрегатов к крупным. В большинстве случаев для агрегатов < 1 мм содержание фосфора увеличивалось с ростом их доли, тогда как для агрегатов размером > 1 мм чаще отмечалась обратная зависимость (Huang et al., 2021). Непосредственные исследования циклов промерзания–оттаивания также подтвердили увеличение подвижности фосфора, ассоциированного с агрегатами, после таких воздействий (Li et al., 2022).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служило пахотное поле на склоне, расположенное на территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М.В. Ломоносова “Чашниково” (Россия, Московская область, городской округ Солнечногорск). Климат района умеренно континентальный, с относительно холодной зимой и теплым летом. Сумма температур выше 10 °С составляет 1600–2200 °С, продолжительность вегетационного периода – 110–140 дней. Участок расположен в зоне избыточного увлажнения с промывным водным режимом. Среднегодовое количество осадков составляет примерно 540–600 мм, из которых около 2/3 выпадает в виде дождя, остальная часть – в виде снега. Растительность соответствует южнотаежной подзоне хвойно-широколиственных лесов (Шоба и др., 2019).

Исследуемый участок пашни характеризуется неоднородным рельефом со склонами северной и восточной экспозиции. Различие экспозиций и сложность микрорельефа обуславливают проведение пахоты вдоль склона. Подстилающие породы в Чашниково разнообразны: помимо широко распространенных покровных суглинков, выделяются участки морены и флювиогляциальных песков. В нижней части склона почвы относятся к дерново-глубокоподзолистым освоенным дерново-подзолистым почвам. На вершине и на склоне преобладают дерново-слабоподзолистые освоенные дерново-подзолистые почвы; местами отмечаются признаки оглеения. Характеристика участка дана по данным Электронной почвенной карты Чашниково (Кириллова, Силёва, 2015).

Образцы почвы были отобраны в октябре 2020 г.; до этого на поле возделывался картофель. Всего было отобрано 9 образцов: три у подножия склона (1.1, 1.2, 1.3), три в средней части склона, соответствующие средне- или слабосмытым почвам (2.1, 2.2, 2.3), и три на выровненной поверхности вершины (3.1, 3.2, 3.3). Превышение самой высокой точки над самой низкой составляет около 7.1 м; склон пологий, с уклоном от 1 до 5°. Образцы отбирали методом конверта из верхнего 20-сантиметрового слоя.

Отобранные образцы были высушены до воздушно-сухого состояния и разделены на четыре группы агрегатов: > 5 мм, 5–

2 мм, 2–1 мм и < 1 мм. Такое разделение опиралось на работы Д.В. Хана (1969) и В.Г. Мамонтова с соавторами (2019). Согласно этим исследованиям, агрегаты диаметром 5–1 мм являются наиболее агрономически ценными. Кроме того, по данным В.Г. Мамонтова (2019), полученным для черноземных почв на основе изменения соотношения гумусовых кислот, агрегаты 2–1 мм наиболее устойчивы к обработке и наименее изменчивы, чем и может объясняться их полное или локальное доминирование в гумусовых горизонтах черноземов.

Содержание органического углерода определяли по методу Тюрина в модификации Никитина с колориметрическим окончанием в двух повторностях. Подвижный фосфор определяли по Кирсанову (в двух повторностях). Для оценки минерального и органического фосфора использовали метод прокаливания Сандерса и Вильямса, поскольку он обеспечивал наиболее воспроизводимые результаты (Денисова и др., 2021). Этот метод не позволяет полностью перевести фосфор в раствор; степень извлечения составляет 70–90% от валового содержания, поэтому в работе используется понятие общего фосфора. Для определения валового фосфора применяли рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Измерения выполняли на спектрометре “Респект” (Россия) в однократной повторности для каждого варианта. Пробы предварительно измельчали, просеивали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм и прессовали в виде таблеток. Результаты, полученные на приборе, выражали в процентах; затем для трех точек каждого варианта рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение. Валовое содержание элемента в почве является важным интегральным показателем, а применение рентгенофлуоресцентного анализа позволяет с минимальной погрешностью сопоставлять содержание элементов в различных типах почв (Карпова, Минеев, 2015).

Полученные данные обрабатывали в программе Statistica. Влияние факторов расположения на склоне и размера агрегатов оценивали с помощью факторного дисперсионного анализа (Factorial ANOVA) при однородности дисперсий. В случае неоднородности дисперсий использовали непараметрический анализ Kruskal–Wallis ANOVA by Ranks. Кроме того, рассчитывали ко-

эффиценты корреляции и наименьшую существенную разность. На заключительном этапе фракцию < 1 мм дополнительно разделили на подфракции 1–0.5; 0.5–0.25; 0.25–0.1 и < 0.1 мм для оценки водопрочности структуры и проверки гипотез, возникших в ходе работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено изменение процентного соотношения агрегатов между почвами вершины, склона и подножия. Во всех образцах преобладают агрегаты диаметром > 5 мм. В почве у подножия склона, особенно по сравнению с почвой средней части склона, возрастает содержание агрегатов < 1 мм, прежде всего за счет самой мелкой проанализированной фракции < 0.1 мм. Это указывает на аккумуляцию мелкодисперсного материала у подножия и согласуется с проявлением эрозионного перераспределения вещества. Агрегаты размером 1–5 мм существенных изменений не демонстрируют. Что касается водопрочности структуры, то для вершины отмечено значимое уменьшение количества агрегатов > 5 мм после мокрого просеивания. Для почв склона и подножия уменьшение содержания водопрочных агрегатов > 5 мм статистически незначимо. Вместе с тем для всех почв отмечена тенденция к превышению содержания водопрочных агрегатов < 1 мм над соответствующими воздушно-сухими фракциями, особенно для частиц < 0.25 мм.

Содержание органического углерода в воздушно-сухих агрегатах исследованных почв выше среднего уровня, характерного для дерново-подзолистых почв. По литературным данным, содержание гумуса в верхнем горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв обычно составляет 2–3% (Ковда, Розанов, 1988), тогда как в наших образцах оно колеблется от 3.5 до 6.7% (рис. 1). Вероятно, это связано с регулярным внесением органических удобрений, в частности конского навоза.

Содержание углерода в почвах разного положения на склоне различается незначительно. Также практически не выявлено различий по содержанию углерода между исходными фракциями агрегатов, что в целом соответствует литературным данным. Исключение составляет фракция < 1 мм у подножия склона, в кото-

рой содержание углерода статистически значимо ниже по сравнению с вариантами вершины и склона. Для уточнения этого отличия фракцию < 1 мм разделили на подгруппы (1–0.5; 0.5–0.25; 0.25–0.1 и < 0.1 мм) и проанализировали содержание углерода в них. Установлено, что в подфракциях 0.5–0.1 мм у подножия склона содержание углерода значительно ниже, чем в почве склона и вершины. Для фракции 1–0.5 мм также отмечена тенденция к снижению. При этом для воздушно-сухих агрегатов < 0.1 мм у подножия содержание углерода сопоставимо с вариантами средней части и вершины склона. Именно с этой фракцией в пахотной почве может быть связано значительное количество органических соединений; такие частицы способны образовывать более крупные агрегаты при циклах увлажнения–иссушения и замерзания–оттаивания (Холодов, 2020). Вероятно, поэтому содержание углерода в этой фракции сопоставимо с его содержанием в агрегатах > 1 мм.

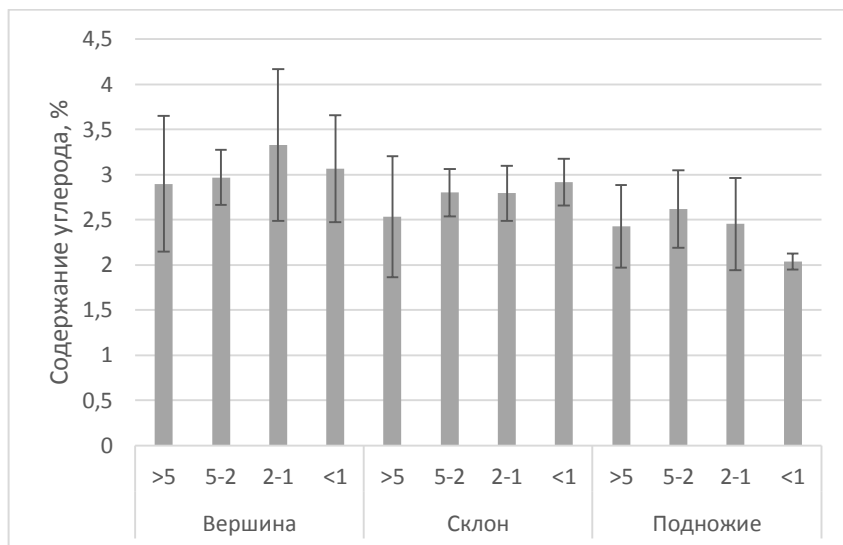


Рис. 1. Содержание органического углерода в агрегатах, %.

Fig. 1. Organic carbon concentration in air-dry aggregates, %.

Существенных различий между содержанием углерода в водопрочных и воздушно-сухих агрегатах не выявлено. Это соответствует данным В.А. Холодова (2020), согласно которым водопрочность агрегатов не определяется напрямую содержанием в них углерода. В почве у подножия склона наблюдается несколько иная тенденция: содержание углерода в агрегатах > 5 , $5-2$, $2-1$ и $1-0.5$ мм близко к значениям для почв, расположенных выше по склону, однако в агрегатах $0.5-0.25$ мм оно заметно снижается. Минимальные значения углерода (около $1.1-1.8\%$) отмечены именно у подножия склона. Возможно, фракция $0.5-0.25$ мм здесь в большей степени представлена минеральными компонентами. Не исключено также, что часть смытого по склону органоминерального материала переходит в более крупные агрегаты в ходе циклов увлажнения–высыхания (Холодов, 2020).

Среднее содержание доступного фосфора в исследованных почвах соответствует литературным данным (Минеев, 2004). В неразделенной почве содержание подвижного фосфора составляло 38.17 ± 8.01 ; 22.76 ± 4.24 и 22.09 ± 6.48 мг/100 г для почв вершины, склона и подножия соответственно. Это указывает на статистически значимое отличие почв вершины от двух остальных положений рельефа. Максимальные значения подвижного фосфора приурочены к вершине склона; при перемещении вниз по склону содержание снижается, тогда как различия между вариантами склона и подножия статистически не выявлены. Сходная картина описана для черноземов на склоне южной экспозиции (Губарев и др., 2019).

Анализ содержания подвижного фосфора в агрегатах подтвердил, что во всех фракциях почвы вершины его содержание статистически значимо выше, чем в почвах склона и подножия. В целом подвижный фосфор распределен между агрегатами относительно равномерно; явного преобладания какой-либо фракции в его аккумуляции не выявлено (рис. 2).

Было также проанализировано содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах (табл. 1).

Таблица 1. Содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах

Table 1. Distribution of mobile phosphorous in water-stable aggregates

Расположение	Размер агрегатов	Содержание подвижного P_2O_5 , мг/100 г почвы
Вершина	> 5	19.95 ± 4.65
	5–2	23.55 ± 12.85
	2–1	16.18 ± 10.71
	1–0.5	23.39 ± 7.56
	0.5–0.25	19.72 ± 5.11
Склон	> 5	19.93 ± 9.66
	5–2	19.35 ± 11.70
	2–1	26.14 ± 5.27
	1–0.5	29.84 ± 0.85
	0.5–0.25	23.40 ± 0.80
Подножие	> 5	21.27 ± 2.27
	5–2	14.67 ± 5.24
	2–1	17.92 ± 2.37
	1–0.5	21.95 ± 1.80
	0.5–0.25	20.48 ± 0.07

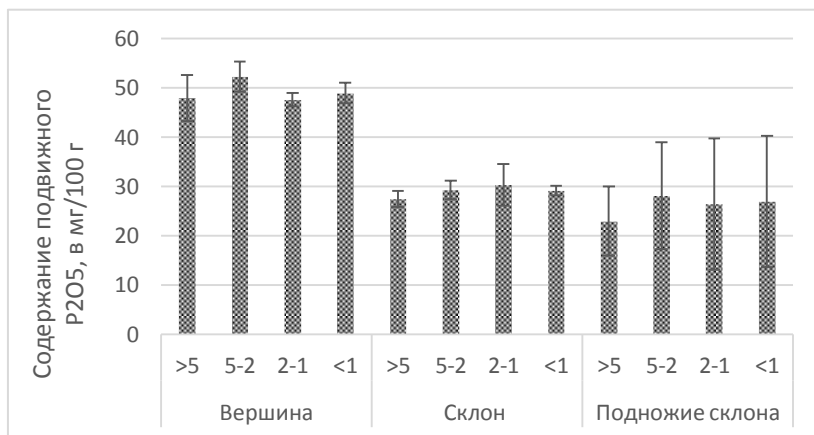


Рис. 2. Содержание подвижного фосфора в воздушно-сухих агрегатах.
Fig. 2. Mobile phosphorus concentration in air-dry aggregates.

Наблюдается снижение его содержания по сравнению с воздушно-сухими агрегатами, что закономерно для наиболее лабильных форм фосфора, частично удаляемых при воздействии воды. При этом часть соединений фосфора, не переходящих в раствор при промывании водой, может извлекаться слабыми кислотами, имитирующими воздействие корневых выделений (Аринушкина, 1970). Примечательно, что для почв склона и подножия снижение содержания подвижного фосфора выражено слабее, чем для почвы вершины. Вероятно, это связано с тем, что в природных условиях почвы склона и подножия в большей степени подвержены действию воды, по сравнению с водораздельной частью, вследствие чего различия между воздушно-сухими и водопрочными агрегатами здесь менее контрастны.

Абсолютные значения показателя варьируют достаточно сильно, однако статистически достоверного влияния размера агрегатов на содержание подвижного фосфора в водопрочных агрегатах вершины, склона и подножия не выявлено.

Для минерального фосфора также установлено превышение значений в почвах вершины по сравнению с почвами склона и подножия для агрегатных групп > 5, 2–1 и < 1 мм. На склоне

наибольшее содержание минерального фосфора отмечено в агрегатах 5–2 мм, тогда как в остальных группах его значения близки. У подножия склона повышенное содержание минерального фосфора также приурочено к агрегатам 5–2 и 2–1 мм по сравнению с агрегатами > 5 и < 1 мм (рис. 3). Таким образом, статистически значимо влияние обоих факторов – положения на склоне и размера агрегатов. При этом в почвах склона и подножия аккумуляция минерального фосфора в большей степени связана с агрономически ценными агрегатами размером 5–2 мм (рис. 4, 5).

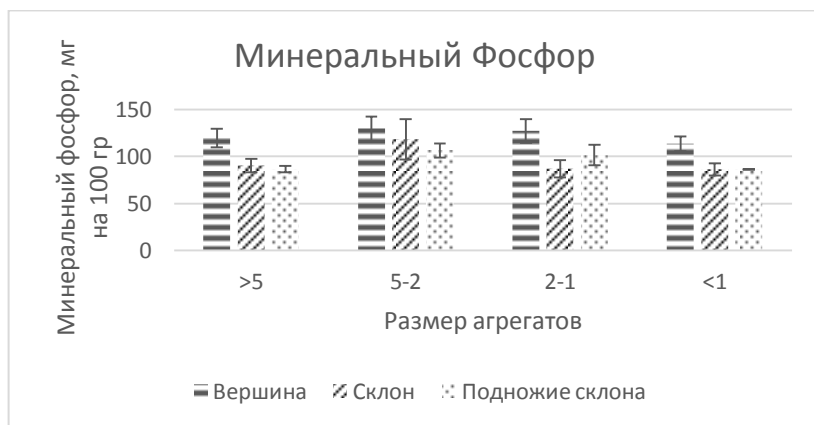


Рис. 3. Содержание минерального фосфора в воздушно-сухих агрегатах, мг/100 г.

Fig. 3. Mineral phosphorous concentrations in air-dry aggregates, mg/100 g.

LSD test; variable Pmin (Spreadsheet15.sta) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 188,40, df = 24,000				
Cell No.	Расположение	{1} 112,37	{2} 95,389	{3} 95,116
1	1		0,005770	0,005137
2	2	0,005770		0,961620
3	3	0,005137	0,961620	

Рис. 4. HCP-тест в программе Statistica для распределения минерального фосфора в зависимости от положения на склоне.

Fig. 4. Fisher LSD test (Statistica program) represents the variation of mobile phosphorus across the slope (where 1 – top, 2 – slope and 3 bottom).

		LSD test; variable Pmin (Spreadsheet15.sta) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 188,40, df = 24,000			
Cell No.	Размер	{1} 93,826	{2} 116,12	{3} 102,43	{4} 91,457
1	>5		0,002108	0,196013	0,717463
2	5-2	0,002108		0,044969	0,000847
3	2-1	0,196013	0,044969		0,102789
4	<1	0,717463	0,000847	0,102789	

Рис. 5. НСР-тест в программе Statistica: сравнение распределения минерального фосфора в агрегатах разного размера.

Fig. 5. Fisher LSD test (Statistica program) represents the variation of mobile phosphorus in different sized aggregates.

Для органического фосфора влияние исследуемых факторов статистически не выявлено. Тем не менее в почвах вершины прослеживается тенденция к аккумуляции органического фосфора в частицах < 1 мм: его содержание в этой фракции выше, чем в более крупных агрегатах. При движении вниз по склону эти различия нивелируются на фоне больших величин ошибки (рис. 6).

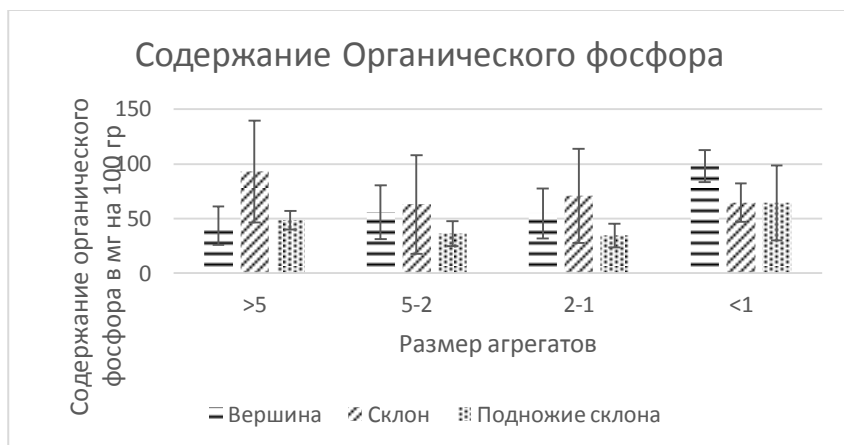


Рис. 6. Содержание органического фосфора в воздушно-сухих агрегатах, мг/100 г.

Fig. 6. The concentration of organic phosphorus in air-dry aggregates, mg/100 g.

Валовое содержание фосфора составляет порядка 400 мг/100 г почвы, что соответствует примерно 0.4–0.5% в пересчете на сухую массу. Для дерново-подзолистых почв это высокие значения: по литературным данным, обычно они находятся в пределах около 0.05–0.15% (Кидин, 2016). Выявлено статистически значимое снижение содержания валового фосфора у подножия склона по сравнению с почвами вершины, тогда как почвы склона занимают промежуточное положение (рис. 7).

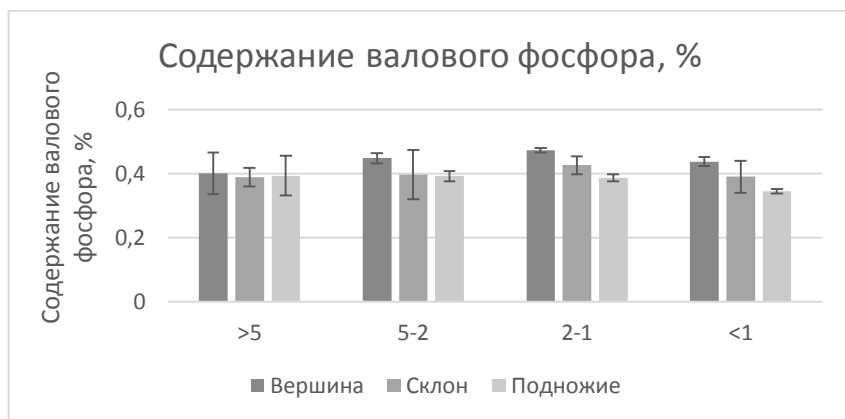


Рис. 7. Содержание валового фосфора в воздушно-сухих агрегатах, %.

Fig. 7. The concentration of total phosphorous in air-dry aggregates, %.

Анализ распределения валового фосфора по воздушно-сухим агрегатам (рис. 7) показал, что у подножия склона его содержание в агрегатах < 1 мм ниже, чем в остальных фракциях. На вершине аналогичная тенденция выражается в том, что содержание валового фосфора в агрегатах < 1 мм ниже, чем в агрегатах 2–1 мм.

ВЫВОДЫ

Несмотря на аккумуляцию мелкой почвенной фракции и агрегатов диаметром < 1 мм у подножия склона, накопления фосфора в нижней части склона не выявлено. Для ряда показателей установлена зависимость от положения на склоне; минимальные

значения нередко приурочены к наиболее мелким фракциям у подножия, что может указывать на транзитный характер этой части катены для части органоминерального материала. Содержание углерода в воздушно-сухих агрегатах в целом распределено относительно равномерно между фракциями, однако для фракции < 1 мм у подножия склона выявлено статистически значимое снижение. Содержание углерода в водопрочных агрегатах в большинстве случаев сопоставимо с его содержанием в воздушно-сухих агрегатах.

Подвижный и валовой фосфор в воздушно-сухих агрегатах характеризуются высокими значениями, особенно на вершине склона, однако вниз по склону их содержание снижается. При этом различия между почвой средней части склона и подножия для ряда показателей статистически не подтверждаются. Анализ неразделенной почвы показывает ту же тенденцию для подвижного и валового фосфора. После процедуры оценки водопрочности структуры различия по содержанию подвижного фосфора между элементами рельефа выражены слабее, что, вероятно, связано с частичным удалением наиболее лабильных форм фосфора при воздействии воды.

В исследованных почвах выявлено высокое содержание минерального и органического фосфора, при этом преобладание минеральных форм над органическими соответствует общим закономерностям для дерново-подзолистых почв. Для почв вершины характерно более высокое содержание минерального фосфора по сравнению с почвами склона и подножия. В воздушно-сухих агрегатах размером 5–2 мм наблюдается тенденция к повышенной аккумуляции минерального фосфора, наиболее отчетливо выраженная в почвах склона и подножия. Для органического фосфора статистически значимого влияния положения на склоне и размера агрегатов не установлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Издательство Московского университета, 1970. 488 с.
2. *Губарев Д.И., Вайгант А.А., Ларькин М.А.* Неоднородность почвенно-агрохимических показателей чернозема обыкновенного в условиях

выраженного рельефа. URL:
https://www.arisersar.ru/conference/soil_science-19/Gubarev.pdf.

3. Денисова Г.И., Карпова Д.В., Иванова Е.А., Рогова О.Б. Фосфор в воздушно-сухих агрегатах Курского чернозема в различных типах антропогенно-обустроенного ландшафта // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 84–89.

4. Иванов А.Л. Агробиогеохимический цикл фосфора / Ред. Иванов А.Л. / Сычев В.Г., Державин Л.М., Адрианов С.Н., Бразжникова Н.В., Карпова Д.В., Карпухин А.И., Кирпичников Н.А., Конончук В.Д., Саймолов Л.Н. М.: Россельхозакадемия, 2012. 512 с.

5. История и современное состояние научных исследований в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре Московского Университета “Чашниково”: / Под ред. Шобы С.А., Макарова О.А., Загоруйко М.В. М.: Издательство Московского Университета, 2019. 197 с.

6. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2016. 608 с.

7. Карпова Е.А., Минеев В.Г. Тяжелые металлы в агроэкосистеме. М.: КДУ, 2015. 252 с.

8. Кириллова Н.П., Силёва Т.М. Таксономическая диагностика почв с помощью автоматизированного определителя // Вестник Московского Университета. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 3. С. 31–36.

9. Мамонтов В.Г., Родионова Л.П., Артемьева З.С., Крылов В.А., Клышбекова Г.К. Агрогенная и постагрогенная трансформация структурного состояния чернозёма типичного Курской области // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 5 (371). С. 14–17.

10. Медведев И.Ф., Бузуева А.С., Губарев Д.И., Ефимова В.И., Деревягин С.С. Рельеф и особенности внутрипочвенной миграции питательных элементов в агроландшафте // Агрохимический вестник. 2016. № 6. С. 14–19.

11. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: Издательство МГУ, Издательство “КолосС”, 2004. 720 с.

12. Почвоведение / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 2. Типы почв, их география и использование. М.: Высшая школа, 1988. 368 с.

13. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203).

14. Хан. Д.В. Органоминеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.

15. *Холодов В.А.* Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархии организации: Автореферат дисс. ... канд. с-х. наук. М., 2020. 45 с.
16. *Alewel C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D.A., Panagos P., Borrelli P.* Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion // *Nature Communications*, 2020. Vol. 11. 4546.
17. *Chen H., Jarosch K.A., Mészáros É., Frossard E., Zhao X., Oberson A.* Repeated drying and rewetting differently affect abiotic and biotic soil phosphorus (P) dynamics in a sandy soil: A ³³P soil incubation study // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 153. 108079.
18. *Corbee G.* Phosphorus accumulation in constructed wetlands: a study of 10 wetlands constructed on agricultural clay soils in Södermanland. Independent thesis Advanced level (professional degree). Master Programme in Environmental and Water Engineering. 2021. 60 p.
19. *Evans N.M., Stewart W.P., Davis M.A.* Phosphorous, farms, and families: Institutional narratives about agricultural intensification and water quality in northeastern Wisconsin // *Journal of Rural Studies*. 2020. Vol. 80. P. 418–426.
20. *Han J.G., Li Z.B., Li P., Tian J.L.* Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed // *Agricultural Water Management*. 2010. Vol. 97. P. 757–762.
21. *Huang D., Zhou L., Fan H., Jia Y., Liu M.* Responses of aggregates and associated soil available phosphorus, and soil organic matter in different slope aspects, to seasonal freeze–thaw cycles in Northeast China // *Geoderma*. 2021. Vol. 402. 115184.
22. *Li Y., Wang L., Zhang S., Tian L., Ou Y., Yan B., Cui H., Bao M., Liang A.* Freeze-thaw cycles increase the mobility of phosphorus fractions based on soil aggregate in restored wetlands // *CATENA*. 2022. Vol. 209. Part 2. 105846.
23. *Liu Y., Feng L., Hu H., Jiang G., Cai Z., Deng Y.* Phosphorus release from lowgrade rock phosphates by low molecular weight organic acids // *J. Food Agric. Environ.* 2012. No. 10. P. 1001–1007.

REFERENCES

1. *Arinushkina E.V., Manual on Chemical Analysis of Soils*, Moscow: University Publishing House, 1970, 488 p. (In Russ.)
2. *Gubarev D.I., Vaigant A.A., Larkin M.A., Heterogeneity of soil-agrochemical indicators of ordinary chernozem in the conditions of pronounced relief*, URL: https://www.arisersar.ru/conference/soil_science-19/Gubarev.pdf. (In Russ.)

3. Denisova G.I., Karpova D.V., Ivanova E.A., Rogova O.B., Phosphorus in air-dry aggregates of Kursk chernozem in different types of anthropogenic landscapes, *Agrochemical Bulletin*, 2021, No. 5, pp. 84–89. (In Russ.)
4. Ivanov A.L. (Ed.), Sychev V.G., Derzhavin L.M., Adrianov S.N., Brazhnikova N.V., Karpova D.V., Karpukhin A.I., Kirpichnikov N.A., Kononchuk V.D., Saimolov L.N., *Agrobiogeochemical cycle of phosphorus*, Moscow: Rosselkhozakademia, 2012, 512 p. (In Russ.)
5. Shoba S.A., Makarov O.A., Zagoruiko M.V., *History and current state of scientific research in the Training and Experimental Soil Ecological Centre of Moscow*, Soil-Ecological Centre of Moscow University "Chashnikovo", 2019, Moscow: Moscow University Press, 197 p. (In Russ.)
6. Kidin V.V., Torshin S.P., *Agrochemistry*, Moscow: Prospect, 2016, 608 p.
7. Karpova E.A., Mineev V.G., *Heavy metals in agroecosystem*, Moscow, 2015, 252 p. (In Russ.)
8. Kirillova N.P., Silyova T.M., Taxonomic diagnostics of soils with the help of an automated identifier, *Vestnik of Moscow University*, Ser. 17, Soil Science, 2015, No. 3, pp. 31–36. (In Russ.)
9. Mamontov V.G., Rodionova L.P., Artemyeva Z.S., Krylov V.A., Klyshbekova G.K., Agrogenic and postagrogenic transformation of the structural state of typical chernozem of Kursk region, *International Agricultural Journal*, 2019, No. 5 (371), pp.14–17. (In Russ.)
10. Medvedev I.F., Buzueva A.S., Gubarev D.I., Efimova V.I., Derevyagin S.S., Relief and features of intra-soil migration of nutrient elements in agrolandscape, *Agrochemical Bulletin*, 2016, No. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
11. Mineev V.G., *Agrochemistry*, Moscow: MSU Publishing House, KolosS Publishing House, 2004, 720 p. (In Russ.)
12. Kovda V.A., Rozanov B.G. (Eds), *Soil science. Part. 2. Types of soils, their geography and utilisation*, Moscow: Higher School, 1988, 368 p. (In Russ.)
13. *Order of the Ministry of Agriculture of Russia from 13.12.2016 N 552* "On approval of water quality standards of water bodies of fishery importance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance" (Registered with the Ministry of Justice of Russia on 13.01.2017 N 45203). (In Russ.)
14. Khan. D.V., *Organomineral compounds and soil structure*, Moscow: Nauka, 1969, 141 p. (In Russ.)
15. Kholodov V.A., *Mechanisms of restoration of structure and organic matter of humus horizons of soils at different levels of the hierarchy of organization*, *Extended abstract of Cand. Agri. Sci. thesis*, 03.00.27. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2020, 45 p. (In Russ.)

16. Alewell C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D. A., Panagos P., Borrelli P., Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11. 4546.
17. Chen H., Jarosch K.A., Mészáros É., Frossard E., Zhao X., Oberson A., Repeated drying and rewetting differently affect abiotic and biotic soil phosphorus (P) dynamics in a sandy soil: A ^{33}P soil incubation study, *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, Vol. 153. 108079.
18. Corbee G., Phosphorus accumulation in constructed wetlands: a study of 10 wetlands constructed on agricultural clay soils in Södermanland. Independent thesis Advanced level (professional degree). Master Programme in Environmental and Water Engineering, 2021, 60 p.
19. Evans N.M., Stewart W.P., Davis M.A., Phosphorous, farms, and families: Institutional narratives about agricultural intensification and water quality in northeastern Wisconsin, *Journal of Rural Studies*, 2020, Vol. 80, pp. 418–426.
20. Han J.G., Li Z.B., Li P., Tian J.L., Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed, *Agricultural Water Management*, 2010, Vol. 97, pp. 757–762.
21. Huang D., Zhou L., Fan H., Jia Y., Liu M., Responses of aggregates and associated soil available phosphorus, and soil organic matter in different slope aspects, to seasonal freeze–thaw cycles in Northeast China, *Geoderma*, 2021, Vol. 402. 115184.
22. Li Y., Wang L., Zhang S., Tian L., Ou Y., Yan B., Cui H., Bao M., Liang A., Freeze-thaw cycles increase the mobility of phosphorus fractions based on soil aggregate in restored wetlands, *CATENA*, 2022, Vol. 209, Part 2, 105846.
23. Liu Y., Feng L., Hu H., Jiang G., Cai Z., Deng Y., Phosphorus release from lowgrade rock phosphates by low molecular weight organic acids, *J. Food Agric. Environ*, 2012, No. 10, pp. 1001–1007.