

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ РОСТОВСКОГО ЗООПАРКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЖИВОТНЫХ

К. Ш. Казеев^{1*}, А. В. Жадобин², А. А. Гобарова^{1,2}, А. Н. Федоренко¹, С. И. Колесников¹¹Южный федеральный университет
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1;²Ростовский-на-Дону зоопарк
344039, г. Ростов-на-Дону, ул. Зоологическая, 3

*E-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022, принята к печати 01.03.2023

В результате проведенных многолетних исследований выявлено значительное воздействие животных зоопарка на физические свойства почв 18 вольеров с различными птицами, копытными, китопарнокопытными, хоботными и хищными животными. В большинстве вольеров отмечена деградация почвенно-растительного покрова вследствие скученного содержания животных на ограниченной территории на протяжении десятков лет. В результате повысились плотность сложения и сопротивление пенетрации почв, ухудшилось их структурное состояние. Степень деградации почвенного покрова зоопарка зависит от размеров вольера и уровня воздействия животных. В вольерах с высокой нагрузкой животных (зебры, олени, буйволы), выраженной отношением массы животных к площади вольера ($0,3\text{--}5,5 \text{ кг м}^{-2}$), отмечено более значительное нарушение почв, чем в вольерах с птицами ($0,02\text{--}0,08 \text{ кг м}^{-2}$). Также установлено влияние строения копыт животных и их активности на изменение физических свойств почвы в вольерах. Непосредственное воздействие животных особенно сказывается на поверхностном слое почвы, где сопротивление пенетрации в вольерах достигает 7,3 МПа, что более чем в пять раз выше значений, характерных для почвы контрольного участка парковой зоны зоопарка. Уже на глубине 20 см различия в большинстве случаев не превышают 20–30%, а в средней части профиля на глубине 50 см почвы не имеют существенных различий между собой.

Ключевые слова: черноземы, деградация почв, вольеры животных, механическая устойчивость почв, сопротивление пенетрации, плотность сложения.

CHANGES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS OF THE ROSTOV ZOO UNDER THE IMPACT OF ANIMALS

K. Sh. Kazeev¹, A. V. Zhadobin², A. A. Gobarova^{1,2}, A. N. Fedorenko¹, S. I. Kolesnikov¹¹Southern Federal University
194/1, Stachki prosp., Rostov-on-Don, 344006, Russia;²Rostov-on-Don Zoo
3, Zoologicheskaya St., Rostov-on-Don, 344039, Russia

*E-mail: kamil_kazeev@mail.ru

As a result of long-term studies, a significant impact of zoo animals on the physical properties of soil in 18 enclosures with various birds, ungulates, proboscis and carnivores has been revealed. Degradation of the soil and vegetation cover due to animal overcrowding within a limited area for decades was recorded in most of the enclosures. As a result, soil bulk density and penetration resistance increased, and its structure deteriorated. The degree of degradation of the zoo soil cover depended on the size of enclosures and the level of exposure to the animals. In enclosures with high animal load (zebras, deer, buffaloes), expressed as a ratio of animal weight to aviary area ($0.3\text{--}5.5 \text{ kg m}^{-2}$), more significant changes in the studied soil parameters were noted compared to enclosures with birds ($0.02\text{--}0.08 \text{ kg m}^{-2}$). The influence of animals hoof structure and animal activity on the soil physical properties within the enclosures was also noted. The direct impact of animals particularly affects the surface layer of the soil, where the penetration resistance can reaches 7.3 MPa, which is more than 5 times higher than the values typical for the soil of the control area of the zoo park zone. Already at a depth of 20 cm, the differences in most of the cases do not exceed 20–30%, and in the middle part of the soil profiles (at a depth of 50 cm) the studied properties of the soils do not differ significantly.

Keywords: chernozems, soil degradation, animal enclosures, mechanical stability of soils, penetration resistance, bulk density.

ВВЕДЕНИЕ

Современные зоопарки созданы для сохранения и поддержания размножения животных, эффективность чего обеспечивается подбором оптимальных условий содержания для каждого вида. Необходимо учитывать суточную активность, размер животных, их количество в одном вольере, т. к. все это влияет на состояние искусственно созданной среды обитания. Впоследствии происходит деградация растительно-почвенного покрова, что влечет за собой изменение процессов, регулирующих состояние почв, развитие патогенной микрофлоры и накопление токсических веществ (Бузмаков и др., 2014; Юркова и др., 2009). В настоящее время в мире имеются единичные примеры исследований экологического состояния территорий зоопарков (Юркова и др., 2008). Схожее воздействие на почву происходит на пастбищах, где отмечается деградация почвенного покрова вследствие суточной активности животных (Kunz et al., 2013; Chai et al., 2019; Benevenuto et al., 2020). Животные непосредственно воздействуют на почву копытами, что приводит к изменению физических показателей почв, таких как плотность, сопротивление пенетрации, пористость, структурное состояние. Уплотнение почвы, увеличение сопротивления пенетрации, уменьшение пористости и структурности становятся причиной снижения плодородия и общей дигрессии растительно-почвенного покрова территории (Tollner et al., 1990; Freddi et al., 2009). При переуплотнении почвенного покрова происходят изменения почвенной структуры, а также величины и количества пор, способствующих передвижению воды по почвенному профилю и прорастанию корней растений. Также известно, что уплотненные почвы подвержены заболачиванию при большом количестве выпадающих осадков (Da Silva et

al., 1994). Животные оказывают как непосредственное механическое, так и опосредованное воздействие на физические показатели почв (через влияние продуктов их метаболизма). Установлено, что при внесении больших доз навоза в почву происходит ее уплотнение и уменьшение пористости (Guang-Hui et al., 2020). Вытаптывание почвы животными приводит к снижению макроагрегатной механической устойчивости, т.к. в условиях вольеров нагрузка на почву имеет динамичный характер, многократно и ежедневно увеличивается, что может вызвать гораздо более серьезные нарушения. Устойчивость структуры почвы под воздействием внешнего давления является важным показателем ее способности поддерживать жизнь почвенных животных и растений, предоставляя жидкую и газообразную фазы в качестве среды для их обитания, хранения воды, воздуха и питательных веществ (Rabot et al., 2018).

Важной составляющей экологического мониторинга является оценка почв и почвенного покрова, которая проводится с использованием комплекса физических, химических и биологических показателей, отражающих полноценное выполнение почвой экологических функций (Bünemann et al., 2018).

Цель работы – оценить воздействие животных на физические свойства почв на территории Ростовского зоопарка.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ростовский-на-Дону зоопарк имеет площадь 57 га и является одним из крупнейших зоопарков в России. Он основан в 1927 г. и сейчас насчитывает 5000 животных более 400 видов. Посещаемость составляет более 300 тысяч человек в год. Зоопарк расположен в центре города с населением более 1 млн. человек (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения мониторинговых площадок на территории зоопарка: 1 – зебры; 2 – ламы; 3 – бараны; 4 – журавли и другие птицы; 5 – верблюд; 6 – детская площадка; 7 – контроль (парк); 8 – марал; 9 – буйволы; 10 – носорог; 11 – жираф; 12 – домашние ослы; 13 – слоны; 14 – зубры; 15–19, 26 – парковая зона; 20 – эму; 21 – казарки; 22 – пумы; 23 – тапины; 24 – лани; 25 – гиены.

Территория зоопарка превращена в парковую зону отдыха, затененную кронами многолетних деревьев, количество которых составляет более 3500 деревьев 33 видов. Объектами исследования Ростовского-на-Дону зоопарка послужили почвы вольеров с птицами (серые журавли *Grus grus*, павлины *Pavo cristatus*, казарки *Branta canadensis* и др.); зебрами Чапмана (*Equus burchelli chapmani*); алтайскими маралами (*Cervus elaphus sibiricus*), которые подвергались сезонным переселениям весной 2018 г. в вольер эму (*Dromaius Vieillot*), а летом 2019 г. на место оленей переселялись ламы (*Lama glama*); верблюдом двугорбым (*Camelus bactrianus*); голубыми баранами (*Pseudois nayaur*); буйволами Арни (*Bubalus bubalis arnee*); белыми носорогами (*Ceratotherium simum*); жирафом Ротшильда (*Giraffa camelopardalis rothschildi*); домашними ослами (*Equus asinus dom*); индийскими слонами (*Elephas maximus*); европейскими зубрами (*Bison bonasus*); канадскими казарками (*Branta canadensis*); эму (*Dromaius novaehollandiae*); ланями (*Dama dama*); такинами (*Budorcas taxicolor*) и пумами (*Puma concolor*). Для оценки воздействия животных на почвы вольеров использовались результаты обследований фоновых участков парковой зоны зоопарка с типичным почвенно-растительным покровом, где исключено значительное воздействие животных и посетителей зоопарка. Дополнительно оценивалось рекреационное воздействие многочисленных посетителей на свободную от асфальтового покрытия территорию детской площадки.

Исследуемая почва представляет собой чернозем обыкновенный (миграционно-сегрегационный) карбонатный тяжелосуглинистый мощный (по WRB - *Haplic Chernozem Loamic*), описанный в литературе (Вальков и др., 2008; Горобцова и др., 2015; Цховребов и др., 2016, 2017; Kozun et al., 2022). В почву некоторых вольеров (с баранами, зебрами, буйволами, жирафом, носорогами) добавлялся речной песок для улучшения ее водно-физических свойств. В исследуемых образцах из вольеров с зебрами, баранами и буйволами количество

добавленного песка составляло 16, 57 и 43% соответственно. Для корректных результатов исследований образцы почв, взятые из таких вольеров, были объединены в одну группу и сравнивались с образцами почв из вольеров без добавления песка. У наиболее крупных животных (слонов и зубров) почвенный покров полностью заменен на песчаную подушку мощностью до 1 метра над гравийным основанием.

На каждой мониторинговой площадке отбирались по три индивидуальных образца почв, каждый из которых подвергался аналитическим исследованиям в 3–10-кратной повторности. Исследования выполнены в 2017–2021 гг. с использованием традиционных методов исследования почв. Плотность сложения почвы определялась объемно-весовым методом в 3-х кратной повторности, сопротивление пенетрации — пенетрометром ЕИЖЕЛКАМР в 10-кратной повторности на глубине от 0 до 50 см. Структурно-агрегатный анализ почвы проводился методом сухого просеивания, водоустойчивость агрегатов определялась по Адрианову.

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программ Statistica for Windows 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Животные, содержащиеся в вольерах в скученных условиях, изменяют среду своего обитания, в первую очередь – физические свойства почв (Юркова и др., 2009; Гобарова и др., 2020). Из всех исследуемых показателей физического состояния почв наиболее информативным оказалась плотность сложения, которая отражает соотношение порового пространства и структурности почв и зависит от гранулометрического состава (Вальков и др., 2008; Безуглова и др., 2018; Казеев и др., 2021). Оптимальное значение данного показателя для растений в черноземной зоне составляет 1,0–1,2 г см⁻³. Усреднение его значений за весь период проведенных исследований позволило выявить значительные отличия почв вольеров от контрольной почвы парковой зоны зоопарка (рис. 2).

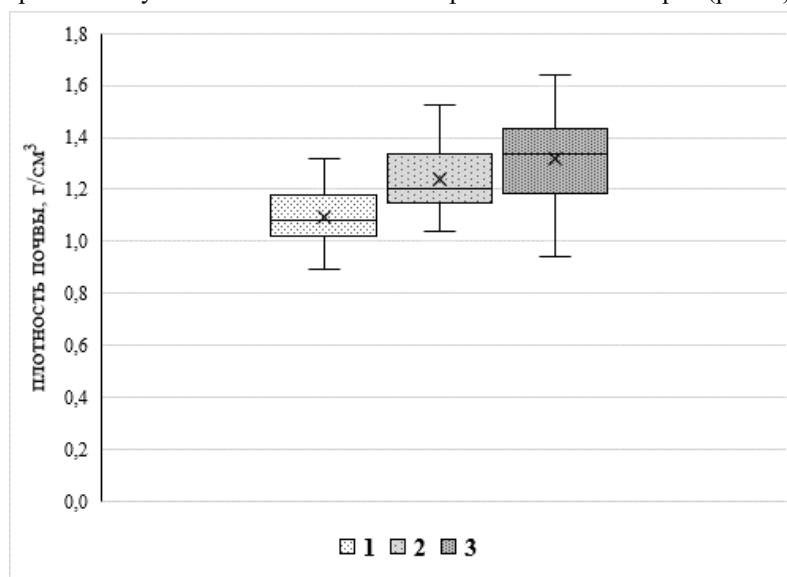


Рис. 2. Варьирование плотности почв территории зоопарка, в среднем за 2017–2020 гг. (n = 41): 1) контрольный участок парковой зоны; 2) детская площадка (рекреация); 3) вольеры зоопарка

Во всех вольерах с животными плотность сложения была выше контрольных значений. В некоторых вольерах с крупными животными значения плотности существенно превосходили оптимальные параметры, превышая $1,4\text{--}1,5\text{ г см}^{-3}$. Особенно часто это отмечалось в сухой период, когда иссушенная почва была наиболее плотной. В осенне-весенний период плотность сложения почв существенно снижается. Это связано с разуплотнением почв после циклического замораживания-оттаивания в холодное время года (Chai et al., 2019). Значительная деградация почвенно-растительного покрова выявлена в вольерах с благородными оленями, ланями и зебрами. Соотношение роговой подошвы и мякиша у парнокопытных составляет $0,52\text{--}0,87:1$, у непарнокопытных — около $2:1$. Таким образом, у парнокопытных мякиш в большей степени задействован при опирании на почву и в амортизации, чем у непарнокопытных, и осуществляет меньшее давление на почвенный покров (Веремей, 2016). Маленький вольер с буйволами площадью 280 м^2 , где нагрузка животных (более $5,5\text{ кг м}^{-2}$) в $5\text{--}45$ раз превосходит нагрузку в других вольерах, характеризовался наибольшей трансформацией почвенного покрова. Все перечисленные копытные оказывают достаточно существенное физическое воздействие на почвы вольеров вследствие своего крупного размера, строения копыт и активного поведения. Даже относительно небольшие по размерам животные, такие как лани, могут значительно уплотнять почву вследствие высокой активности. В вольерах с птицами плотность почв была близка к плотности контрольной почвы парковой зоны. Размер птиц играет менее важную роль в уплотнении почвы по сравнению с их количеством и размерами вольера. Внесении речного песка в почвы вольеров с крупными животными для улучшения водопроницаемости не привело к достоверному изменению плотности их сложения. Рекреационное воздействие многочисленных посетителей зоопарка оказывает схожее влияние на плотность сложения почвы на участках парковой зоны, свободных для передвижения и не запечатанных асфальтовым покрытием (рис. 2).

Твердость почв, или сопротивление пенетрации, имеет важное значение для корней растений и геобионтов, обитающих в почве. Данный показатель также претерпевает значительные изменения в почвах вольеров с животными. Сопротивление пенетрации, так же, как и плотность сложения, имеет выраженный сезонный ритм, существенно увеличиваясь в летние сухие месяцы. Причиной сезонных изменений сопротивления пенетрации является динамика влажности почв. В сухой период при иссушении почвы значения показателя существенно возрастают. Вследствие этого выявлена отрицательная корреляционная зависимость сопротивления пенетрации от влажности почвы ($R = -0,70$). Подобная зависимость от температуры не выявлена. При этом обнаружена обратная связь между температурой поверхности почвы и влажностью ($R = -0,52$), что объясняется значительным иссушением почвы при повышенных температурах.

Почва парковой зоны характеризуется оптимальными значениями данного показателя, варьирующегося в зависимости от времени года в пределах $0,4\text{--}2,0\text{ МПа}$. Здесь зафиксированы типичные для зональных черноземов значения (Казеев и др., 2019). Во всех вольерах с животными было отмечено существенное увеличение значений сопротивления пенетрации относительно контроля (рис. 3). Особенно сильные различия были характерны для поверхностных слоев ($0\text{--}10\text{ см}$) почв. В вольерах с зебрами, ламами и верблюдом значения были в $4\text{--}5$ раз выше относительно почвы парковой зоны. Даже в вольере с птицами их повышение составило почти 70% . В большинстве вольеров отмечено снижение сопротивления пенетрации по профилю почвы. Это связано с высокой нагрузкой на поверхность почв вольеров и ее слабым влиянием на средние и нижние слои почвы. Воздействие животных снижается на глубине 20 см , а на глубине 50 см различия нивелируются. Максимальные значения отмечены летом в небольшом вольере с ламами, где ранее долгое время содержался крупный благородный олень ($7,3\text{ МПа}$). На детской площадке в результате высокой рекреационной нагрузки твердость почвы превышала контрольные значения в несколько раз ($2,9\text{--}6,1\text{ МПа}$).

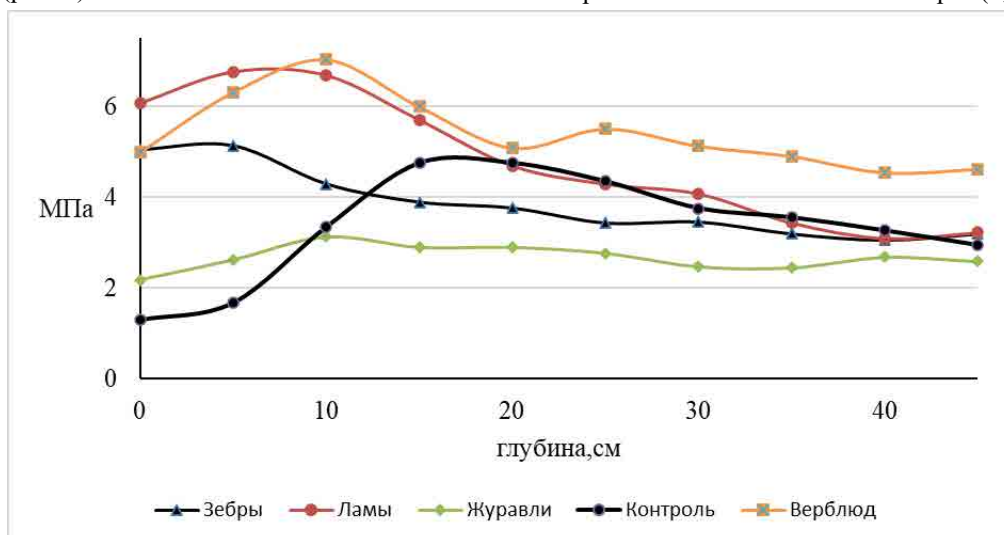


Рис. 3. Усредненные значения сопротивления пенетрации почв Ростовского зоопарка

Структура почвы является важным физическим свойством, влияющим на движение в ней воды и питательных веществ, аэрацию корней растений и развитие микроорганизмов, а также на ее устойчивость к эрозии, уплотнение и в конечном итоге на рост растений. Устойчивая структура почвы может обеспечить достаточное количество воды, питательных веществ и кислорода для поддержки роста растений и пространство для проникновения корней, в то время как плохо структурированная почва препятствует росту корней, движению воды и дренажу. Почвенные агрегаты являются основными единицами структуры почвы и служат главными переносчиками почвенного органического углерода и питательных веществ (Вальков и др., 2008; Казеев и др., 2019; Хайдапова и др., 2022). Полученные результаты оценки структурности почв в исследуемых

вольерах показали отличие всех участков с животными и птицами от контрольного. Отмечено меньшее содержание структурных отдельностей размером от 0,25 до 10 мм в почвах вольеров по сравнению с почвой контрольной парковой зоны (рис. 4). Также крупные животные способствовали изменению структуры почвы: вследствие механического воздействия структура была изменена с комковатой (как в контроле) на глыбистую. При сравнении почв вольеров с журавлями, павлинами, гусями, казарками и почвы вольера с эму выявлено, что птицы средних размеров способствуют большему нарушению почвенной структуры, чем крупные эму. Таким образом, воздействие на почву связано как с размерами содержащихся птиц, так и с их количеством в вольере, а также с размерами самого вольера.

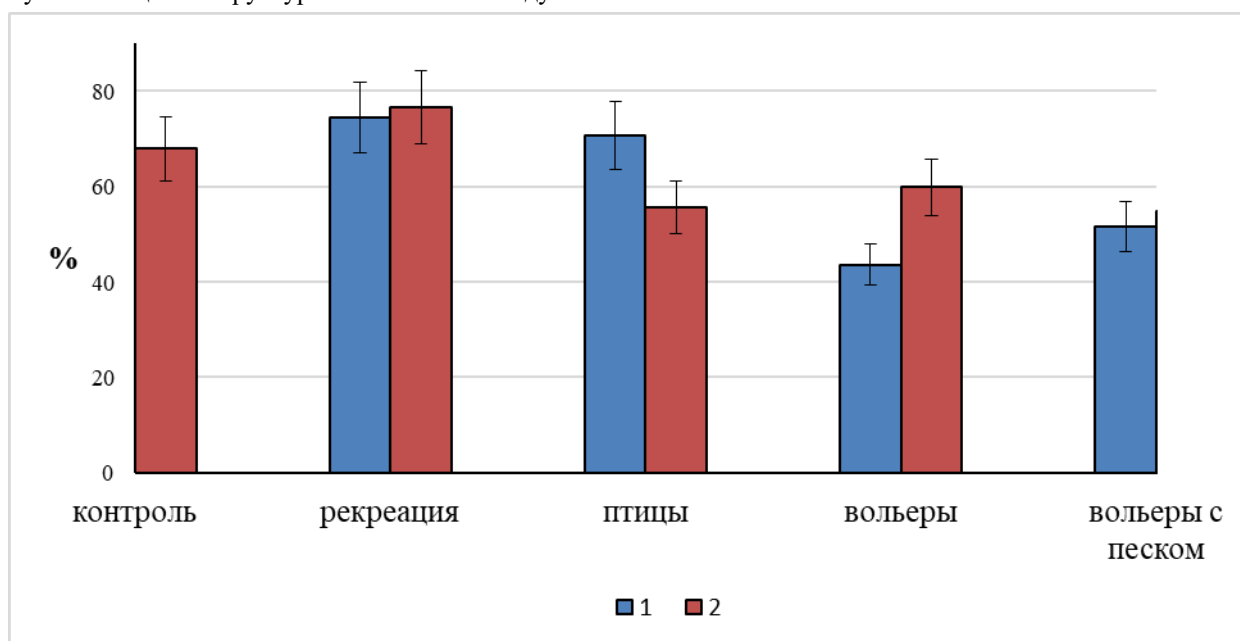


Рис. 4. Содержание агрегатов размером 0,25–10 мм (1) и водоустойчивость агрегатов (2) в почвах зоопарка, средние значения за 2017–2020 гг.

Устойчивость почвенных агрегатов является важным показателем структуры почвы, который характеризует их способность сопротивляться разрушению при воздействии воды, ветра и обработки почвы. На стабильность почвенных агрегатов влияют микробная активность в почве, питательные вещества и микроклимат (Xuran et al., 2022). Вследствие увеличения численности почвенных бактерий будет происходить объединение частиц разного размера, способствующее образованию макроагрегатов из микроагрегатов, что повысит их устойчивость. Водоустойчивость структурных отдельностей в почве контрольного участка была на высоком уровне (рис. 4). В большинстве вольеров водоустойчивость уменьшалась вследствие разрушающего воздействия животных и добавления песка в почву. Однако максимальная водоустойчивость агрегатов выявлена в наиболее загрязненном вольере с буйволами, где большое количество органического вещества, попадающего в почву с продуктами

жизнедеятельности животных, оказало благоприятное воздействие на водоустойчивость агрегатов.

Непосредственное механическое воздействие животных на почву вольеров является первопричиной изменения физических характеристик почвенного покрова территории. Расчет соотношения количества животных и их общей массы к площади исследуемых вольеров показал, что буйволы оказывают наиболее значительную нагрузку на почву по сравнению с другими животными в данных условиях ($5,54 \text{ кг м}^{-2}$). В то же время значения плотности почвы в вольере с буйволами существенно выше контрольных, но не максимальны ($1,28\text{--}1,42 \text{ г см}^{-3}$). В вольере присутствует постоянный водоем для животных, также в качестве мелиоранта в почву добавлен песок в разном количестве, который неравномерно распределен по площади вольера, что влияет на вариацию показателя плотности. Нагрузка на почву в вольере с носорогом составила $2,78 \text{ кг м}^{-2}$, значения плотности здесь максимальны по сравнению с другими исследованными вольерами. Птицы ожидаемо

оказывают минимальную нагрузку: журавли и другие птицы – $0,08 \text{ кг м}^{-2}$, казарки – $0,024 \text{ кг м}^{-2}$. Важно также учитывать анатомические особенности животных, т. к. их масса и размер копыт могут оказывать различное влияние на степень деградации растительно-почвенного покрова. Лани и зебры, имеющие относительно небольшие и острые копыта, создают давление 146 и 193 кПа см^{-2} и поэтому в большей степени преобразуют почвенный покров, чем более крупный верблюд с широким и мягким копытом, создающий давление 111 кПа см^{-2} . Полученные в результате расчетов показатели давления копыт животных зоопарка согласуются с литературными данными относительно домашних животных (Clay, Worrall, 2013). В движении давление копыт на почву может увеличиваться в несколько раз, поэтому относительно небольшие, но активные животные могут значительно нарушать поверхность почвы по сравнению с более медлительными и спокойными животными.

Список литературы

- Безуглова О.С., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1153–1159.
- Бузмаков С.А., Костылева Н.В., Сорокина Т.В. Об оценке выбросов в атмосферу от функционирования будущего Пермского зоопарка // Географический вестник. 2014. № 4 (31). С. 67–74.
- Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест, 2008. 276 с.
- Веремей Э.И., Журба В.А., Руколь В.М. Уход за копытами лошади. Ч. 1. Биомеханика (механизм) копыта // Наше сельское хозяйство. 2016. № 18. С. 63–67.
- Гобарова А.А., Жадобин А.В., Казеев К.Ш., Федоренко А.Н., Колесников С.И. Сравнительная оценка методов при мониторинге почв вольеров Ростовского-на-Дону зоопарка // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 3. С. 91–97.
- Горобцова О.Н., Хежева Ф.В., Улигова Т.С., Темботов Р.Х. Эколого-географические закономерности изменения биологической активности автоморфных почв равнинных и предгорных территорий северного макросклона Центрального Кавказа (в пределах Кабардино-Балкарии) // Почвоведение. 2015. № 3. С. 347–359.
- Казеев К.Ш., Солдатов В.П., Шапацев А.К., Шевченко Н.Е., Грабенко Е.А., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2021. № 4. С. 426–436. DOI: 10.31857/S0024114821040069.
- Казеев К.Ш., Минникова Т.В., Мокриков Г.В., Мясникова М.А., Колесников С.И. Оценка воздействия прямого посева на физические свойства черноземов Ростовской области // Агрофизика. 2019. № 2. С. 15–24. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.03
- Хайдапова Д.Д., Мищенко А.В., Карпова Д.В. Реологические свойства почв как одна из характеристик физической среды обитания растений // Агрофизика. 2022. № 1. С. 17–21. DOI: 10.25695/AGRPH.2022.01.03
- Цховребов В.С., Фаизова В.И., Никифорова А.М., Калугин Д.В., Новиков А.А. Трансформация состава и свойств черноземов Центрального Предкавказья в результате сельскохозяйственного использования. Ставрополь: СЕКВОЙЯ, 2016. 248 с.
- Цховребов В.С., Есаулко А.Н., Новиков А.А. Современные проблемы плодородия почв Ставрополя // Агрохимический вестник. 2017. № 4. С. 3–8.
- Юркова Н.Е., Юрков А.М., Смагин А.В. Оценка функционального состояния почв Московского зоопарка по микробиологическим показателям // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2008. № 3. С. 39–44.
- Юркова Н.Е., Юрков А.М., Смагин А.В. Экологическое состояние почвенных объектов Московского зоопарка // Почвоведение. 2009. № 3. С. 373–380.
- Benevenute P.A.N., de Moraes E.G., Souza A.A., Vasques I.C.F., Silva B.M. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. 106647. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106647
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuiper T.W., Mäder P., Puleman M., Sukke W.I., Groenigen J.W., Brussaard L. Soil Quality – A Critical Review // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 120. pp. 105–125.
- Chai J., Yu X., Xu C., Xiao H., Pan T. Effects of yak and Tibetan sheep trampling on soil properties in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau // Applied Soil Ecology. 2019. Vol. 144. pp. 147–154.
- Clay G.D., Worrall F. The response of CO₂ fluxes from a peat soil to variation in simulated sheep trampling // Geoderma. 2013. Vol. 197–198. pp. 59–66.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение физического состояния почв вольеров зоопарка напрямую зависит от вида и количества животных, а также от строения их копыт. Максимальное воздействие оказывают крупные копытные, особенно олени и буйволы, которые значительно уплотняют почву вольеров. В больших вольерах с журавлями и другими птицами не обнаружено значительной деградации почв вследствие их минимального воздействия на поверхность почвы. Наиболее информативными показателями экологического состояния почв являлись плотность сложения, сопротивление пенетрации и структурно-агрегатный состав почвы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-449.2022.5).

- Da Silva A.P., Kay B.D., Perfect E. Characterization of the least limiting water range of soils // Soil Science Society of America Journal. 1994. Vol. 58. № 6. pp. 1775–1781.
- Freddi O.S., Centurion J.F., Duarte A.P., Peres F.S.C. Soil compaction and yield of corn hybrids in an oxisol. ii - least limiting water range and root system // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2009. Vol. 33. Issue 4. pp. 805–818.
- Guang-Hui Yu, Chun-Mei Chen, Xin-Hua He, Xiang-Zhi Zhang, Li-Na Li Unexpected bulk density and microstructures response to long-term pig manure application in a Ferralic Cambisol Soil: Implications for rebuilding a healthy soil // Soil and Tillage Research. 2020. Vol. 203. 104668. doi.org/10.1016/j.still.2020.104668
- Kozun Y.S., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Climatic gradients of biological properties of zonal soils of natural lands // Geoderma. Vol. 425. 1 November 2022. 116031 doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116031
- Kunz M., Gonçalves A.D.M.A., Reicher J.M., Guimarães R.M.L., Reinert D.J., Rodrigues M.F. Soil compaction in a soy-dairy cattle system on a clayey Oxisol under no-tillage and chisel plowing // Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 2013. Vol. 37. Issue 6. pp. 1699–1708.
- Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. pp. 122–137.
- Tollner E.W., Calvert G.V., Langdale G. Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern U.S. ultisols // Agriculture, Ecosystems & Environment. 1990. Vol. 33. Issue 1. pp. 75–87.
- Xuran Zhang, Weiqing Zhang, Xiyalitu Sai, Feng Chun, Xiaojia Li, Xiaoxia Lu, Hairu Wang Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a Stipa kirschnii steppe of Inner Mongolia // Soil and Tillage Research. 2022. Vol. 219. 105327. doi.org/10.1016/j.still.2022.105327

References

- Bezuglova O.S., Tagiverdiyev S.S., Gorbov S.N. Fizicheskiye kharakteristiki gorodskikh pochv Rostovskoy aglomeratsii [Physical characteristics of urban soils in the Rostov agglomeration] // *Pochvovedeniye*, 2018, no. 9, pp. 1153–1159.
- Buzmakov S.A., Kostyleva N.V., Sorokina T.V. Ob otsenke vybrosov v atmosferu ot funktsionirovaniya budushchego Permskogo zooparka [On the assessment of air emissions from the operation of the future Perm Zoo] // *Geograficheskiiy vestnik*, 2014, no. 4 (31), pp. 67–74.
- Val'kov V.F., Kazeyev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soils in southern Russia]. Rostov-na-Donu: Everest, 2008, 276 p.
- Veremey E.I., Zhurba V.A., Rukol' V.M. Ukhod za kopytami loshadi. Ch. 1. Biomekhanika (mekhanizm) kopyta [Horse hoof care. Ч. 1. The biomechanics (mechanism) of the hoof] // *Nashe sel'skoye khozyaystvo*, 2016, no. 18, pp. 63–67.
- Gobarova A.A., Zhadobin A.V., Kazeyev K.Sh., Fedorenko A.N., Kolesnikov S.I. Srav-nitel'naya otsenka metodov pri monitoringe pochv vol'yerov Rostovskogo-na-Donu zooparka [Comparative assessment of methods in soil monitoring of the Rostov-on-Don zoo enclosures] // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki*, 2020, no. 3, pp. 91–97.
- Gorobtsova O.N., Khezheva F.V., Uligova T.S., Tembotov R.Kh. Ekologo-geograficheskiye zakonomernosti izmeneniya biologicheskoy aktivnosti avtomorfnykh pochv ravninnykh i predgornyykh territoriy severnogo makrosklona Tsentral'nogo Kavkaza (v predelakh Kabardino-Balkarii) [Ecological and geographical regularities of changes in the biological activity of automorphic soils in the plains and foothills of the northern macro-slope of the Central Caucasus (within Kabardino-Balkaria)] // *Pochvovedeniye*, 2015, no. 3, pp. 347–359.
- Kazeyev K.Sh., Soldatov V.P., Shkhapatsev A.K., Shevchenko N.Ye., Grabenko Ye.A., Yermolayeva O.Yu., Kolesnikov S.I. Izmeneniye svoystv dervno-karbonatnykh pochv posle sploshnoy rubki v khvoynoshirokolistvennykh lesakh Severo-Zapadnogo Kavkaza [Changes in the properties of sod-carbonate soils after clear-cutting in coniferous-broadleaved forests in the North West Caucasus] // *Lesovedeniye*, 2021, no. 4, pp. 426–436. DOI: 10.31857/S0024114821040069
- Kazeyev K.Sh., Minnikova T.V., Mokrikov G.V., Myasnikova M.A., Kolesnikov S.I. Otsenka vozdeystviya pryamogo poseva na fizicheskiye svoystva chernozemov Rostovskoy oblasti [Assessing the impact of direct seeding on the physical properties of chernozems in the Rostov region] // *Agrofizika*, 2019, no. 2, pp. 15–24. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.03
- Khaydapova D.D., Mishchenko A.V., Karpova D.V. Reologicheskiye svoystva pochv kak odna iz kharakteristik fizicheskoy sredy obitaniya rasteniy [Rheological properties of soils as one of the characteristics of the physical plant environment] // *Agrofizika*, 2022, no. 1, pp. 17–21. DOI: 10.25695/AGRPH.2022.01.03
- Tskhovrebov V.S., Faizova V.I., Nikifirova A.M., Kalugin D.V., Novikov A.A. *Transformatsiya sostava i svoystv chernozemov Tsentral'nogo Predkavkaz'ya v rezul'tate sel'skokhozyaystvennogo ispol'zovaniya* [Transformation of the composition and properties of chernozems in the Central Caucasus as a result of agricultural use]. Stavropol': SEKVOYYA, 2016, 48 p.
- Tskhovrebov V.S., Yesaulko A.N., Novikov A.A. Sovremennyye problemy plodorodiya pochv Stavropol'ya [Current problems of soil fertility in Stavropol Krai] // *Agrokhimicheskiiy vestnik*, 2017, no. 4, pp. 3–8.
- Yurkova N.Ye., Yurkov A.M., Smagin A.V. Otsenka funktsional'nogo sostoyaniya pochv Moskovskogo zooparka po mikrobiologicheskim pokazatelyam [Assessment of the functional state of soils in Moscow Zoo according to microbiological indicators] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedeniye*, 2008, no. 3, pp. 39–44.
- Yurkova N.Ye., Yurkov A.M., Smagin A.V. Ekologicheskoye sostoyaniye pochvennykh ob'yektov Moskovskogo zooparka [Ecological condition of the Moscow Zoo's soil facilities] // *Pochvovedeniye*, 2009, no. 3, pp. 373–380.

- Benevenuto P.A.N., de Moraes E.G., Souza A.A., Vasques I.C.F., Silva B.M. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 117. 106647. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106647
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuiper T.W., Mäder P., Puleman M., Sukke W.I., Groenigen J.W., Brussaard L. Soil Quality – A Critical Review // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 120. pp. 105–125.
- Chai J., Yu X., Xu C., Xiao H., Pan T. Effects of yak and Tibetan sheep trampling on soil properties in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau // *Applied Soil Ecology*. 2019. Vol. 144. pp. 147–154.
- Clay G.D., Worrall F. The response of CO₂ fluxes from a peat soil to variation in simulated sheep trampling // *Geoderma*. 2013. Vol. 197–198. pp. 59–66.
- Da Silva A.P., Kay B.D., Perfect E. Characterization of the least limiting water range of soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1994. Vol. 58. № 6. pp. 1775–1781.
- Freddi O.S., Centurion J.F., Duarte A.P., Peres F.S.C. Soil compaction and yield of corn hybrids in an oxisol. ii - least limiting water range and root system // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2009. Vol. 33. Issue 4. pp. 805–818.
- Guang-Hui Yu, Chun-Mei Chen, Xin-Hua He, Xiang-Zhi Zhang, Li-Na Li Unexpected bulk density and microstructures response to long-term pig manure application in a Ferralic Cambisol Soil: Implications for rebuilding a healthy soil // *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 203. 104668. doi.org/10.1016/j.still.2020.104668
- Kozun Y.S., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Climatic gradients of biological properties of zonal soils of natural lands // *Geoderma*. Vol. 425. 1 November 2022. 116031 doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116031
- Kunz M., Gonçalves A.D.M.A., Reicher J.M., Guimarães R.M.L., Reinert D.J., Rodrigues M.F. Soil compaction in a soy-dairy cattle system on a clayey Oxisol under no-tillage and chisel plowing // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2013. Vol. 37. Issue 6. pp. 1699–1708.
- Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. pp. 122–137.
- Tollner E.W., Calvert G.V., Langdale G. Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern U.S. ultisols // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1990. Vol. 33. Issue 1. pp. 75–87.
- Xuran Zhang, Weiqing Zhang, Xiyalitu Sai, Feng Chun, Xiaojia Li, Xiaoxia Lu, Hairu Wang Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a *Stipa kirschnii* steppe of Inner Mongolia // *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 219. 105327. doi.org/10.1016/j.still.2022.105327