

РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 581.527.7 (470-25)

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17>

Трансформация компонентов биогеоценозов видами рода рейнутрия (*Reynoutria* Houtt.) на примере Московской агломерации

Никита Геннадьевич Кадетов¹, Мария Артёмовна Шамонова²

^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^{1,2} biogeonk@mail.ru

Аннотация. На основе анализа оригинальных полевых материалов исследованы непосредственные механизмы трансформации компонентов биогеоценозов одними из наиболее агрессивных инвазионных видов – представителями рода рейнутрия (*Reynoutria* Houtt.). Исследование проводилось в границах Московской агломерации, где проблема биологических инвазий стоит весьма остро. Особое беспокойство вызывают именно виды рода рейнутрия, более распространённые в урбанизированном ландшафте, нежели в сельской местности, и при этом способные повреждать фундаменты построек и коммуникации. Показано, что при длительном сохранении популяций рейнутрии возможна полная деградация изначальных фитоценозов с разрушением их состава и структуры. Большое количество корней позволяет рейнутрии задерживать более мелкие частицы почвы и тем самым изменять физические свойства почв. Минерализация почв в местах произрастания рейнутрии падает в 1,3-2 раза по сравнению с контрольными точками; поверхностные горизонты почв беднеют и подвержены осолонцеванию. Отмечена тенденция к закислению почв рейнутрией. Столь значительная трансформация поверхностных горизонтов почв указывает на неэффективность механических методов борьбы с рейнутрией, а также сложность рекультивации земель после удаления вида. Существенное значение приобретает организация мероприятий, направленных на ограничение распространения растений рода на территории Средней полосы Европейской России.

Ключевые слова: инвазионные виды, рейнутрия, трансформация, почва, фитоценоз, Московская агломерация

Благодарности: за помощь в проведении полевых исследований авторы выражают благодарность сотруднику факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова Н.М. Петржик; неоценимую помощь в обработке почвенных проб оказали А.В. Дзубан (химический факультет МГУ), О.В. Шопина и И.Н. Семенов (географический факультет МГУ), О.В. Шальнова, Г.М. Жомин.

Для цитирования: Кадетов Н.Г., Шамонова М.А. Трансформация компонентов биогеоценозов видами рода рейнутрия (*Reynoutria* Houtt.) на примере Московской агломерации // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. №1. С. 6-17. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17>

SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original paper

Transformation of biogeocenoses components by species of *Reynoutria* Houtt. on the example of Moscow agglomeration

Nikita G. Kadetov¹, Maria A. Shamonova²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{1,2} biogeonk@mail.ru

Annotation. Based on the analysis of original field materials, the direct mechanisms of biogeocenosis components transformation by one of the most aggressive invasive species - representatives of the genus *Reynoutria* Houtt. - have been studied. The study was conducted within the boundaries of the Moscow agglomeration, where the problem of biological invasions is very acute. Of particular concern are species of the genus *Reynoutria*, which are more common in urban landscapes than in rural areas, and at the same time can damage the foundations of buildings and communications. It has been shown that with long-term preservation of *Reynoutria* populations, complete degradation of the original phytocenoses with the destruction of their composition and structure is possible. A large number of roots allows *Reynoutria* to retain smaller soil particles and thereby change the physical properties of soils. Soil mineralization in places where *Reynoutria* grows drops by 1,3-2 times compared to control points; surface soil horizons become poorer and are susceptible to salinity. A tendency towards acidification of soils by *Reynoutria* has been noted. Such a significant transformation of the surface soil horizons indicates the ineffectiveness of mechanical methods of combating *Reynoutria*, as well as the

complexity of land reclamation after removal of the species. The organization of measures aimed at limiting the spread of plants of the genus in the territory of central European Russia is becoming essential.

Keywords: invasive species, *Reynoutria*, transformation, soil, phytocenosis, Moscow agglomeration

Acknowledgments: for assistance in conducting field research, the authors express gratitude to the employee of the Faculty of Soil Science of Moscow State University named after M.V. Lomonosova N.M. Pietrzyk; A.V. provided invaluable assistance in processing soil samples. Dzuban (Faculty of Chemistry, Moscow State University), O.V. Shopin and I.N. Semenov (Department of Geography, Moscow State University), O.V. Shalnova, G.M. Zhomin.

For citation: Kadetov, N., Shamonova, M., 2024. Transformation of biogeocenoses components by species of *Reynoutria* Houtt. on the example of Moscow agglomeration. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(1). pp. 6-17. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17> (in Russian)

Введение

В наше время существует достаточно много инвазионных видов растений, способных к агрессивному захвату местообитаний и внедрению в природные экосистемы, что создаёт угрозу сохранению биологического разнообразия и нередко приводит к существенным экономическим потерям. Инвазионные растения оказывают различные по силе и характеру воздействия на окружающую среду и её компоненты, однако в большей степени последствия их расселения оказываются негативными. Проблема биологических инвазий признана одной из наиболее существенных угроз развитию человечества. [3, 18]. В связи с сказанным выше важное значение имеет наблюдение и контроль за популяциями инвазионных видов. Данная проблема особо остро стоит в условиях урбанизированных территорий, где экосистемы более уязвимы [27].

В Средней полосе Европейской России и на сопредельных территориях среди наиболее широко распространившихся за последние десятилетия и при этом наиболее агрессивных видов выделяются растения рода рейннурия (*Reynoutria* sp.) семейства гречишных [3, 4, 12, 13, 17, 19, 22, 24 и др.]. Обладая значительной скоростью роста, они причиняют существенный экологический и экономический урон, являясь к тому же достаточно трудноискоренимыми. До сих пор ни в одном регионе Средней полосы Европейской России не осуществляется контроль за состоянием популяции рейннурии. Более того, до конца неясно каким образом рейннурия распространяется, а также каковы конкретные механизмы и параметры трансформации этими растениями экосистем, что затрудняет разработку методов борьбы с ними.

В Средней полосе Европейской России наиболее широко представлены рейннурия богемская (*Reynoutria* x *bohemica* Chrtek et Chrtkova) и японская (*R. japonica* Houtt.). Изредка, в основном в культуре встречается рейннурия сахалинская (*R. sachalinensis* (Fr. Schmidt ex Maxim.) Nakai). Естественный ареал рода охватывает юг Приморья, юг Сахалина, Южные Курилы, Китай, Японию, Корею и Тайвань. В Китае и Японии рейннурия встречается на склонах гор, выступает пионерным видом вулканических пустынь. В 1825 г. Лондонским сельскохозяйственным обществом рейннурия японская была интродуцирована из Китая в Европу. В середине XIX в. растение стало сравнительно популярной в Западной Европе экзотической декоративной культурой. В 1880-х годах в США было отмечено, что рейннурия расселяется вдоль автострад и водотоков. В настоящее время растения рода рейннурия широко распространены в Европе. Во вторичном ареале рейннурия является в основном рудеральным

растением, произрастая около железных дорог, шоссе, на пустырях [3, 22]. Вместе с тем, отмечено распространение рейннурии в долинах рек и на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) [7, 8].

В Средней полосе Европейской России дичание отмечено в 1970-е годы. Поначалу имелись указания на встречи только с рейннурией японской, а имеющая гибридное происхождение рейннурия богемская впервые указана только в 2002 г. Вместе с тем, в последствие сборы растений 1970-х годов и многие другие были переопределены именно как рейннурия богемская. Отмечено, что в Москве и Подмосковье этот вид встречается значительно чаще, чем родительские виды, в частности рейннурия японская [12, 13, 25]. В связи со сложностью определения и близостью биологии и экологии [19] в настоящей работе оба вида рассматриваются вместе. Отметим, однако, что в абсолютном большинстве изученных популяций, в том числе на участках, где проводились комплексные исследования, согласно приводимым определительным признакам [14] растения принадлежали к гибридной рейннурии богемской.

Расселению рейннурии, в том числе в Московском регионе и сопредельных с ним территориях, способствует в первую очередь внедрение её в культуру как декоративных растений. Вероятно, наиболее активное расселение вида в Москве и окрестностях началось в конце 1980-х – 1990-е годы с расширением популярности дачных посёлков.

Во вторичном ареале рейннурия размножается в основном, а в Московском регионе в настоящий момент, видимо, исключительно вегетативно, что, помимо прочего, связано с поздним цветением и невозможностью вызревания плодов из-за низких температур. Вместе с тем, способность рейннурии к вегетативному возобновлению огромна: отрезок корневища весом 5 г способен к регенерации, оно способно прорасти с глубины 1 м и разрушить пятисантиметровый слой асфальта [30].

Расселение, видимо, происходит фрагментами корневищ и стеблей с переносимой почвой, вдоль водотоков с ливневыми водами [2, 4, 12]. Вид, как правило, образует обширные заросли (рис. 1 / fig. 1). Растения рода рейннурия вошли в список ста наиболее агрессивных инвазионных видов мира, Европы и России [22, 28, 29]. Вид оказывает мощное воздействие на фитоценозы. Отмечено, что абorigенные виды в её зарослях практически отсутствуют, а разнообразие беспозвоночных значительно меньше, чем в зарослях другой рудеральной растительности [4, 28]. Поселяясь в поймах рек, рейннурия вытесняет местные дерновинные виды, тем самым лишая почву защиты от смыва

при половодьях. Корневища, как уже отмечалось, могут разрушать асфальт; в Москве отмечены случаи разрушения фундаментов построек и гидротехнических сооружений [2; личные наблюдения]. Отмечена крайне высокая стоимость рекультивации земель при борьбе с рейнутрией [4].

Вместе с тем, отмечено, что рейнутрия накапливает в себе ценные биологические вещества фенольной

природы. Предполагается, что экстракт рейнутрии может найти применение в качестве стимулятора роста семян [5] и лекарственного средства или биологически-активной добавки [6]. Отмечались стимулирующее воздействие низких концентраций водного экстракта рейнутрии на развитие отдельных культур при ингибирующем воздействии высоких (более 1%) [21].

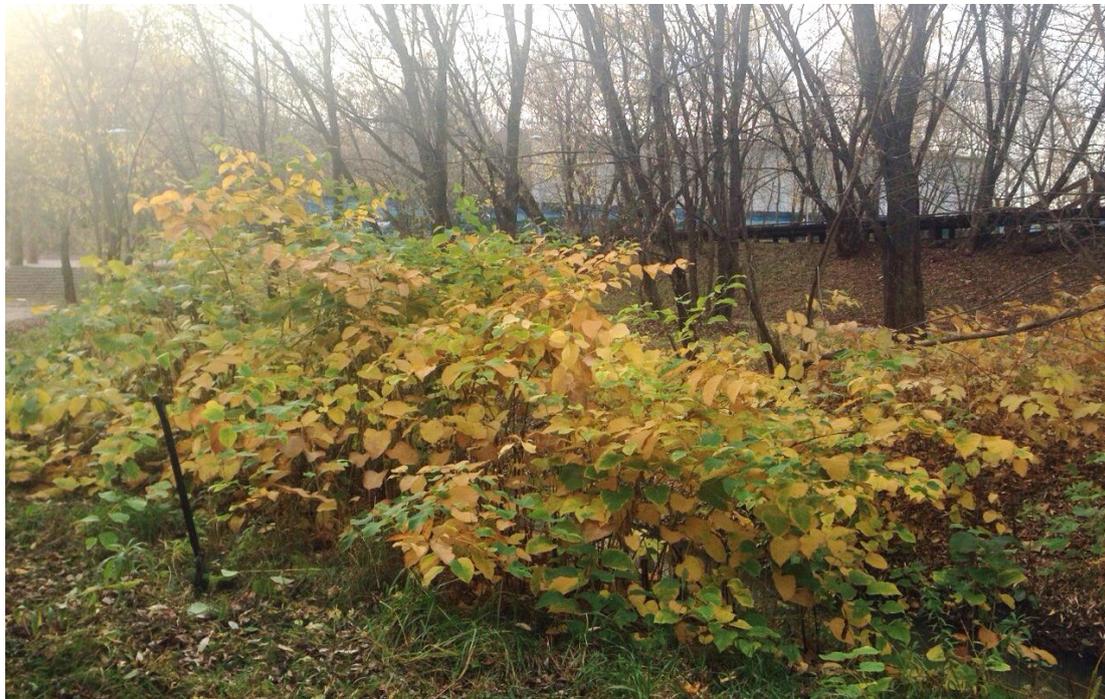


Рис. 1. Заросли рейнутрии в долине р. Чермянки
Fig. 1. Thickets of Reynoutria in the valley of Chermlyanka river

Эффективных методов борьбы с рейнутрией практически нет. Механическое скашивание лишь немного сдерживает рост популяции. Обработка раундапом более эффективна, однако не подходит для пойм рек и ООПТ. Из биологических мер борьбы возможно использование жуков *Gallerucida nigromacidata* Baly и ржавчинного гриба *Puccinia polygoni-weyrichii* Miyabe [4, 11, 24, 28].

В числе связанных с инвазией рейнутрии экологических рисков – деградация экосистем (в том числе за счёт снижения биологического разнообразия), снижение почвенного плодородия, развитие опасных геолого-геоморфологических процессов.

В связи с изложенным выше целью настоящей работы было выявление возможных путей влияния рейнутрии на фитоценозы и почвы мест её массового произрастания.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Обследование территорий с известными популяциями рейнутрии, выбор характерных участков для комплексного обследования и проведение их геоботанических и почвенных описаний, включая отбор почвенных проб;
- Анализ характера влияния рейнутрии на состав и структуру фитоценозов;

- Анализ проб верхних горизонтов почв по комплексу геохимических и физических параметров (кислотность и щелочность почв, содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , гранулометрический состав, pH, электропроводность, минерализация, влажность и др.);
- Выработка возможных подходов борьбы с рейнутрией на изученных участках.

Материалы и методы

На начальном этапе исследования были проанализированы имеющиеся сведения о распространении и приуроченности зарослей рейнутрии в Москве для выбора наиболее характерных участков для подробных исследований. Использованы литературные источники [2, 8, 12, 13, 26] и результаты авторских обследований в различных районах Москвы (природно-исторические парки «Москворецкий» и «Сокольники», природный заказник «Воробьёвы горы» и др.). Отмечено, что подавляющее большинство зарослей приурочены к долинам рек (склоны или поймы). В связи с этим в доступной для регулярных наблюдений долине р. Чермянки на северо-востоке Москвы были выбраны 3 участка (рис. 2 / fig. 2). Для сравнения был также выбран участок в долине р. Лихоборки, расположенной в той же ландшафтной провинции, что и р. Чермянка [1]. На каждом участке обследовались две точки: занятая зарослями рейнутрии и контрольная, расположенная рядом в сходных условиях с таким же рельефом и близким растительным покровом.

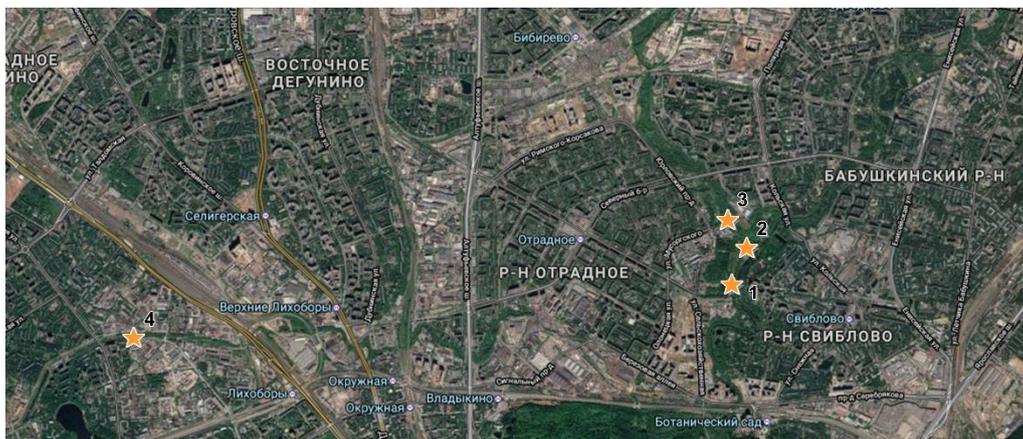


Рис. 2. Расположение участков обследования: 1-3 – долина р. Чермянки, 4 – долина р. Лихоборки
 Fig. 2. Location of survey sites: 1-3 – Chermyanka river valley, 4 – Likhoborka river valley

Влияние растений рода рейннутрии изучали на:

- состояние фитоценозов: были проведены геоботанические описания по стандартной методике [15, 16] на указанных участках и популяциях рейннутрии на других территориях;

- верхние горизонты почв и их геохимические свойства, измеряя следующие показатели [9, 10]:

1. влажность (гигроскопическую воду) – высушиванием в предварительно доведённых до постоянной массы фарфоровых тиглях при температуре 105 °С в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ в течение 72 часов и измерением потери массы;

2. гранулометрический состав лазерным дифрактометром Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus

3. общее содержание водорастворимых веществ (tds – total dissolved solids) – по проводимости водной вытяжки 1:5 (датчик электропроводности, цифровая лаборатория LabQuest) и по массе сухого остатка после её прокаливании до 105 °С в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ в течение 72 часов;

4. катионно-анионный состав – методом атомно-абсорбционной спектроскопии для водной вытяжки 1:5 (выполнено в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова);

5. содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} – комплексометрическое титрование раствора обменных катионов, полученного методом Гедройца (вытеснение аммонийным ионом 1,0 М раствора NH_4Cl), 0,1 Н раствором трилона Б в щелочной среде (хлоридно-аммиачный буфер, рН 10) по мурексиду (Ca^{2+}) и эриохрому чёрному Т (Mg^{2+});

6. кислотность актуальную – по рН водной вытяжки 1:5 (стеклянный электрод, цифровая лаборатория LabQuest) и её титрованию 0,1 Н раствором NaOH в присутствии фенолфталеина, и обменную – по методу Дайкухара (титрование 1,0М KCl вытяжки 0,1 Н раствором NaOH в присутствии фенолфталеина);

7. щёлочность частную (от растворимых карбонатов) и общую (от гидрокарбонатов) – титрованием водной вытяжки 1:5 0,02 Н раствором H_2SO_4 в присутствии фенолфталеина и метилового оранжевого;

8. углерод органических соединений (ОУ) – методом Тюрина, то есть окислением навески почвы (0,05-0,2 г) 0,4 Н раствором $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в серной кислоте

(1:1) при температуре 150 °С (в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ) в течение 20 мин и последующим титрованием 0,2 Н раствором соли Мора в присутствии фенилантраниловой кислоты для определения количества непрореагировавшего окислителя.

Для двух участков также были исследованы нижележащие горизонты почв по тем же группам параметров.

Перед проведением аналитических исследований пробы почв высушивали до воздушно-сухого состояния в тени. Значения всех показателей приведены на воздушно-сухую почву.

Рабочие растворы готовили растворением точно известного количества вещества в воде в мерных колбах на 100, 250, 500 и 1000 мл. Для титрованных растворов использовали фиксаналы либо проводили стандартизацию (NaOH – по 0,1 Н HCl , соль Мора – по 0,1 Н KMnO_4).

Все навески брали на аналитических весах ВЛ-224 (ГОСМЕТР) с точностью до 0,1 мг.

На участках 1 и 2 производились измерения высоты снежного покрова в период с ноября 2018 г. по март 2019 г. (замер производился в точках контроля и точках с рейннутрией). Привлечены данные по состоянию снежного покрова в местах произрастания рейннутрии в других районах Москвы.

Результаты и обсуждение

Влияние рейннутрии на состав и структуру фитоценозов. Геоботанические описания проводились на всех 4 участках (3 в долине Чермянки и 1 в долине Лихоборки) для двух точек: одной с популяцией рейннутрии и парной ей точке контроля. Отметим, что, судя по меньшей высоте растений, их плотности и проективному покрытию, популяции рейннутрии на втором и третьем участках/парах точек несколько более молодые, чем на первом и четвёртом.

На всех 4 участках заметно снижение числа видов, слагающих фитоценоз в точке произрастания рейннутрии, по сравнению с точкой контроля. На приуроченном к склону останца террасы в долине Чермянки первом участке эта разница наиболее заметна: в сложении описанной в контроле ясенево-кленовой разнотравно-сорнотравной ассоциации принимает участие 21 вид, из которых 18 – виды травяно-кустарничкового яруса, в сложении соседствующей кленовой рейннутриевой ассоциации – 10 и 6 видов соответственно. На участке

2 (пойма Чермянки) травяно-кустарничковый ярус представлен в точке контроля 6 видами, а в точке произрастания рейнутрии – 4. На участках 3 (пойма Чермянки) и 4 (долина Лихобрки) также отмечается резкое снижение числа видов растений в фитоценозах с участием рейнутрии: в точках контроля наблюдается 26 и 43 вида, в точках с рейнутрией 10 и 11 видов соответственно.

На расположенных выше по течению Чермянки участках и других обследованных территориях – природный заказник «Воробьёвы горы», природно-исторический парк «Сокольники», памятник природы «Карамышевский берег р. Москвы», участки долины Яузы в среднем течении – отмечены сообщества, в которых травяно-кустарничковый ярус образован или исключительно рейнутрией или ещё двумя-тремя видами,

кроме неё. Таким образом, обеднение флористического состава сообществ в результате внедрения рейнутрии очевидно.

Существенным образом влияет рейнутрия и на структуру сообществ. В первую очередь это влияние сказывается на травяно-кустарничковом ярусе: постепенно увеличивая своё обилие, и рейнутрия в итоге достигает практически стопроцентного проективного покрытия (ПП). Так, на первом участке ПП травяно-кустарничкового яруса в контроле – 70%, на точке с рейнутрией – 100%; на втором в контроле – 70%, в точке с рейнутрией – 90% (рис. 3-4 / fig. 3-4). На участках 3 и 4 ПП травяно-кустарничкового яруса в контроле 90%, в точке с рейнутрией – 100%. Подобная ситуация наблюдалась и на других обследованных территориях. Вытесняя прочие виды, рейнутрия в конечном счёте приводит к упрощению яруса – исчезновению его членения на подъярусы, фитоценотические горизонты.

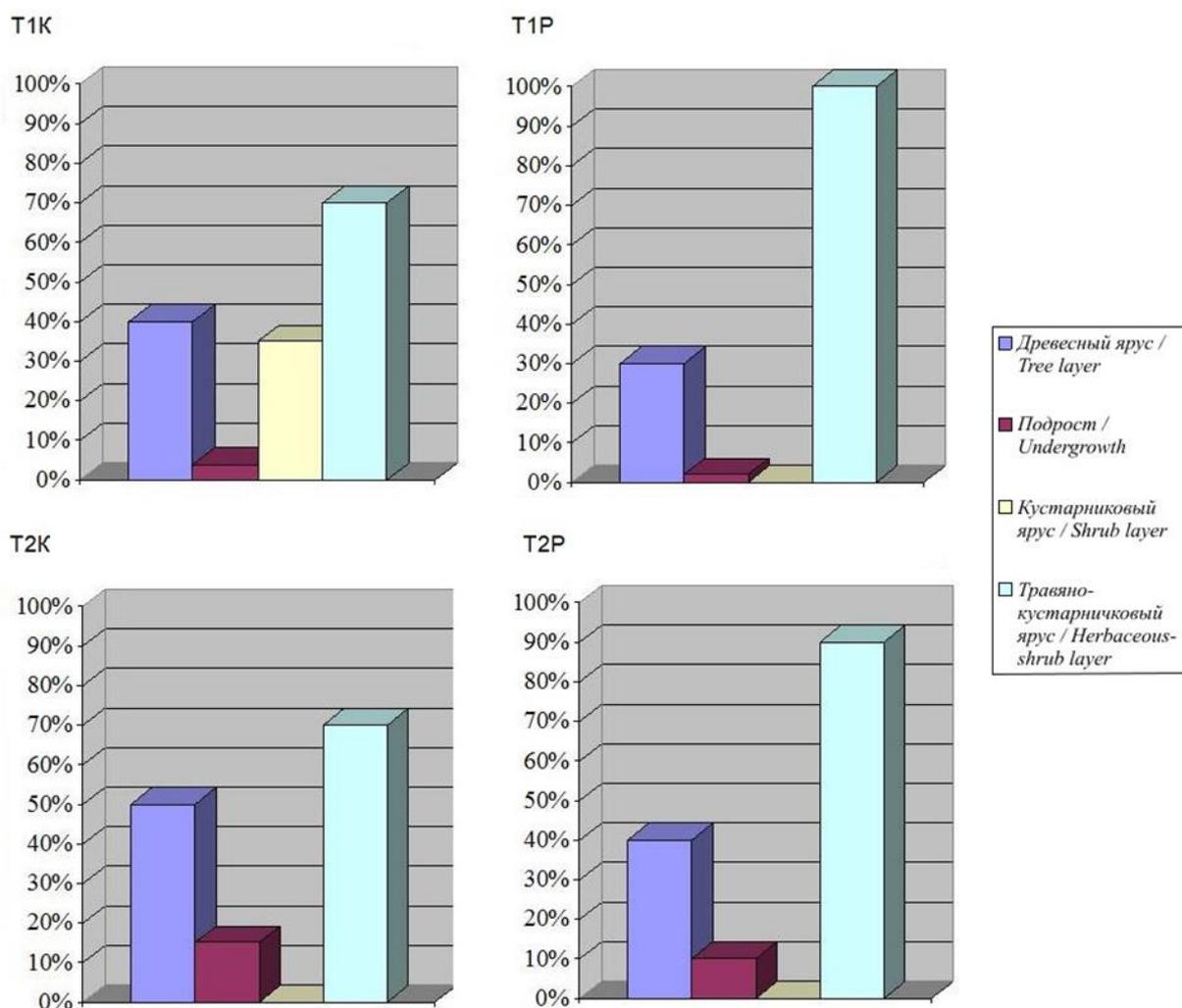


Рис. 3. Проективное покрытие структурных компонентов сообществ

* **Примечание:** T1, T2 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией.

Fig. 3. Projective coverage of structural components of communities

* **Note:** T1, T2 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species.

Появление рейнутрии фактически приводит к исчезновению подростка. Так, кустарничковый ярус в контроле первого участка имеет ПП 35%, а в точке с рейнутрией отсутствует вовсе. За счёт мощного разрастания и последующего затенения рейнутрия приводит к

исчезновению подростка. На всех участках ПП подростка в точках с рейнутрией в 1,5-2 раза меньше, чем в точках контроля. Количество видов и их распространенность уменьшается при переходе от точек контроля к точкам с рейнутрией.

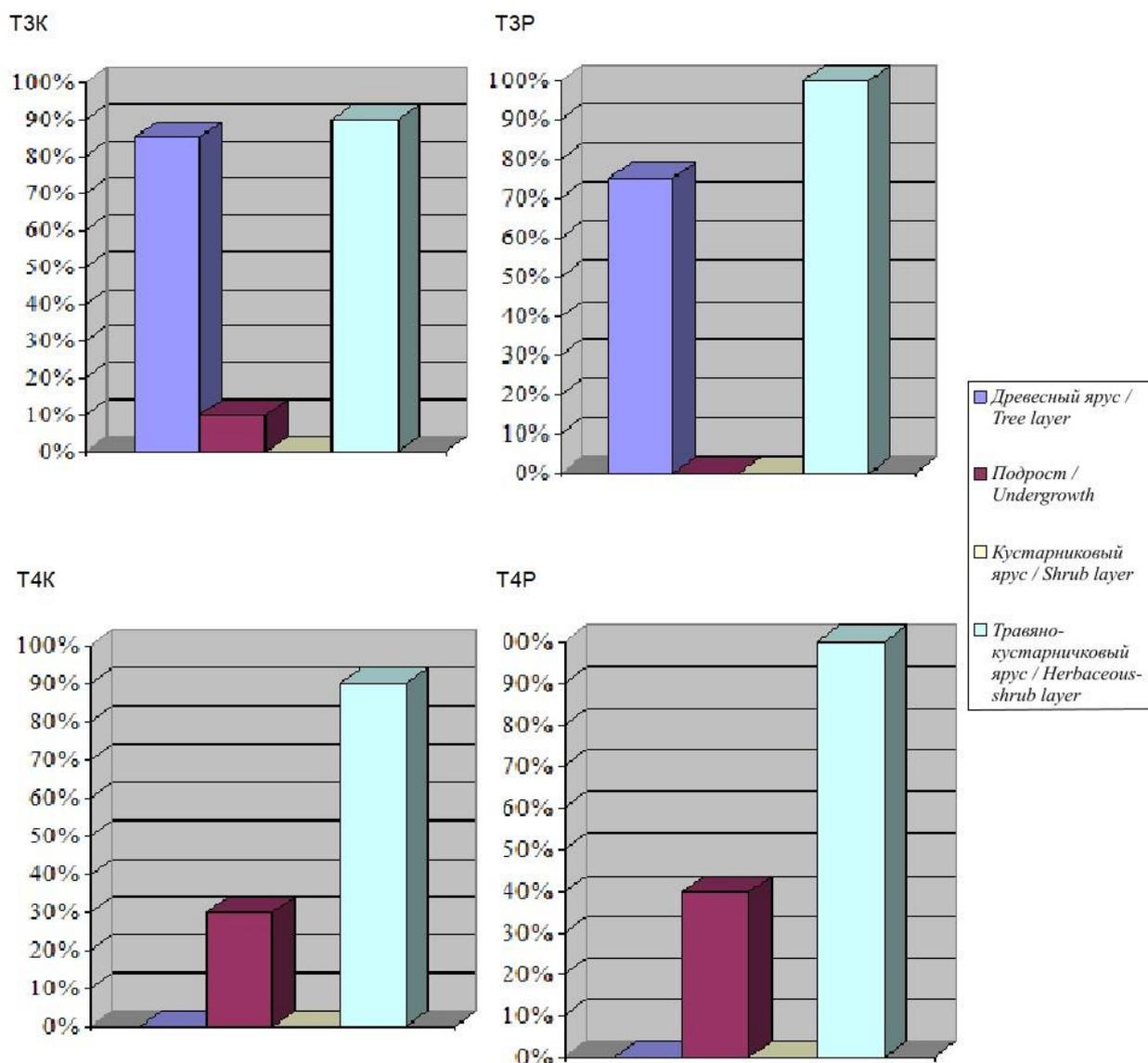


Рис. 4. Проективное покрытие структурных компонентов сообществ

* **Примечание:** T1, T2 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией.

Fig. 4. Projective coverage of structural components of communities

* **Note:** T1, T2 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species.

Таким образом, при долговременном сохранении зарослей рейнутрии и отмирании со временем существующего древостоя можно ожидать практически полной деградации изначальных фитоценозов с разрушением как их состава, так и структуры.

Судя по наблюдающемуся ходу изменения фитоценозов, воздействие рейнутрии на прочие виды происходит как за счёт затенения, так и за счёт физического занятия пространства при большей способности к вегетативному росту.

В подобных ситуациях логичным методом борьбы с видом кажется скашивание его зарослей. В ходе обследований нами отмечались участки, на которых проводилось скашивание зарослей рейнутрии. Теоретически, подобная мера должна сдерживать рост популя-

ции, однако, согласно имеющимся литературным данным [4, 24] и нашим наблюдениям, этого не происходит.

Выяснению причин неэффективности данного метода может, в частности, поспособствовать анализ влияния рейнутрии на свойства почв, предпринятый нами в дальнейшем. Вместе с тем, скашивание рейнутрии может опосредованно оказывать положительное влияние, в частности через нивелирование разницы в накоплении и таянии снега, для чего нами были начаты наблюдения за уровнем снежного покрова, показавшие, что высота снега в точках контроля в среднем на 1 см больше высоты снега в точках произрастания рейнутрии. Данное распределение можно объяснить тем, что рейнутрия, за счёт длительно (часто всю зиму) сохраняющихся листьев и стеблей задерживает часть снежного покрова. Потенциально подобный процесс

перераспределения снега может оказывать влияния как на свойства самого участка с рейнтурией, так и сопредельных территорий. Сопоставление наблюдений на исследуемых участках, где скашивание рейнтурии не проводилось, с данными по участкам со скошенными популяциями рейнтурии не выявили чётких тенденций.

Влияние рейнтурии на верхние горизонты почв.

Согласно полевым описаниям почв на точках с рейнтурией относительно контроля повышается плотность поверхностных горизонтов. В качестве вероятной причины можно рассматривать увеличение плотности корней.

Данное наблюдение коррелирует с лабораторным определением гранулометрического состава: на участках 1, 2 и 3 процентное содержание пылеватых и или-

стых частиц становится больше (рис. 5 / fig. 5). Исключение составляет участок 4, где данное соотношение в слабой мере отмечается только для горизонта А2, что связано с насыпным характером горизонта А1. Подобное распределение можно связать с тем, что рейнтурия за счёт значительного числа корней удерживает мелкие частицы, тем самым трансформируя местообитание. Вместе с тем, нельзя исключать, хотя и с крайне низкой вероятностью, что точки с рейнтурией могли быть изначально расположены в относительных понижениях рельефа, по сравнению с контрольными участками, либо сама рейнтурия предпочитает изначально селиться в микропонижениях, которые затем нивелируются. В таком случае наблюдаемые отличия в соотношении частиц и наличие рейнтурии являются параллельными процессами, а не взаимообусловленными.

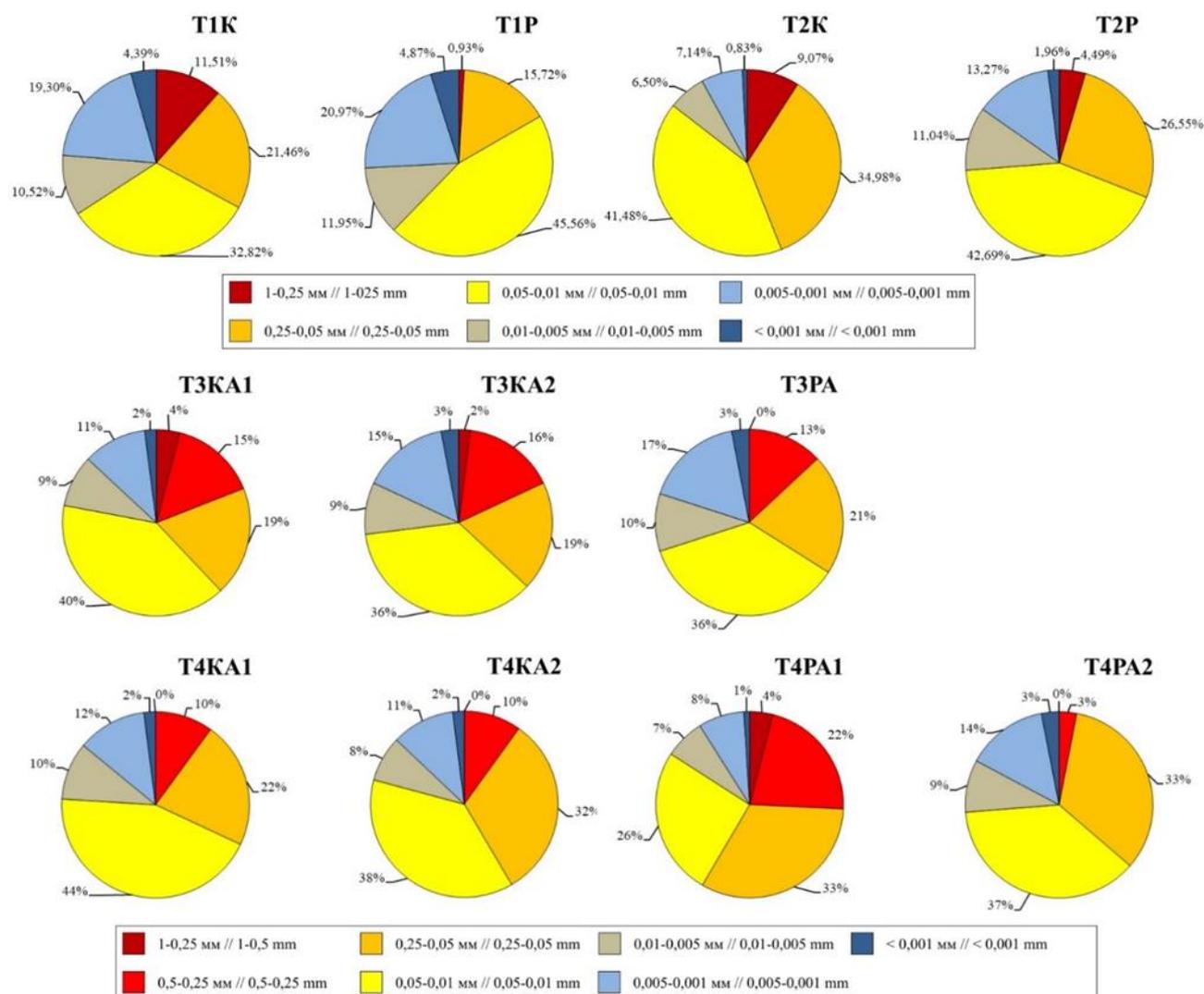


Рис. 5 Гранулометрический состав почв исследованных участков*

* **Примечание:** Т1, Т2, Т3, Т4 – номера участков; К – контроль, Р – сообщества с рейнтурией; А1 – гумусовый горизонт, А2 – элювиальный горизонт.

Fig. 5. Granulometric composition of soils in the studied areas

***Note:** Т1, Т2, Т3, Т4 – plot numbers; К – control, Р – communities with reynoutria species; А1 – humus horizon, А2 – eluvial horizon.

Величина рН в изученных пробах составляет 7,5; 7,4; 7,6 и 7,6 для контроля и 6,6; 7,1; 7,5 и 6,6 для точек с рейнтурией соответственно, что в целом выше, чем свойственная природным почвам Подмосквья кислая

и слабокислая реакция (5,5-6,5) (таб. 1 / tabl. 1). Однако в городской среде из-за строительства, применения реагентов, промышленной пыли и других причин рН ста-

новится в среднем нейтрально-слабощелочным до щелочного. Полученные значения рН таким образом укладываются в приемлемые для города значения [20]. Отметим, что величина рН в каждой паре точек выше в контроле, чем в точках с рейнутрией. Возможной причиной снижения рН поверхностных горизонтов почв в точках произрастания рейнутрии можно считать большее количество биомассы, в том числе и корневой, обменивающих протоны на катионы важных для растения элементов.

Минерализация почв в точках контроля в 1,2-1,3 (местами – в 2) раза больше, чем в точках произрастания рейнутрии. Можно сказать, что на данных участках прослеживается тенденция к "вытягиванию" рейнутрией солей и минеральных соединений из поверхностных горизонтов почв в местах её произрастания, что не может не сказываться на видовом составе соответствующих фитоценозов.

Таблица 1.

Химические свойства обследованных почв

Table 1.

Chemical properties of the studied soils

	Образцы почв / Soil samples*											
	T1K	T1P	T2K	T2P	T3KA1	T3KA2	T3PA	T4KA1	T4KA2	T4PA1	T4PA2	
Na ⁺ , мг/л // mg/l	4,41	3,86	27,5	14,8	3,63	2,84	2,96	12,9	22	13,1	8,7	
NH ₄ ⁺ мг/л // mg/l	0,38	0,5	0,78	0,46	1	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
K ⁺ , мг/л // mg/l	19,6	16,5	9,53	7,47	8,8	2,8	2,65	9,92	7,63	7,6	5,68	
Mg ²⁺ , мг/л // mg/l	1,85	1,82	15,4	6,44	1,76	1,33	1,3	2,45	2,77	2,2	1,09	
Ca ²⁺ , мг/л // mg/l	38,3	44,3	128	65,2	40,87	32,78	26,31	40,63	58,71	26,7	45,2	
F, мг/л // mg/l	0,58	0,6	0,34	0,43	0,52	0,41	0,63	1,16	1,46	0,7	0,56	
Cl, мг/л // mg/l	5,16	6,21	12,1	13,8	15,67	13,5	6,89	17,71	24,93	23,05	17,58	
NO ₂ ⁻ , мг/л // mg/l	0,49	0,5	7,9	17,1	5,8	0,1	<0,1	12,65	<0,1	<0,1	<0,1	
NO ₃ ⁻ , мг/л // mg/l	34,5	38,2	341	74,9	22,81	6,29	3,84	9,7	19,04	22,85	3,42	
PO ₄ ³⁻ , мг/л // mg/l	0,1	0,26	1,4	1,42	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
SO ₄ ²⁻ , мг/л // mg/l	10,1	11,3	56,6	25,3	8,64	4,46	4,57	14,53	120	34,5	92,2	
Гигроскопическая вода, % // Hygroscopic moisture, %	2,5	3,6	11,7	8,4	3,6	1,9	1,6	3,3	2,5	3,8	3,8	
Водорастворимые вещества, % // Dissolved solids, %	0,22	0,1	0,43	0,21	0,064	0,165	0,042	0,029	0,14	0,08	0,062	
рН	7,5	7,4	6,6	7,1	7,61	7,43	7,53	7,56	6,24	6,59	4,09	
Минерализация // Soil salinity, мг/л // mg/l	0,1	0,08	0,15	0,11	0,134	0,14	0,107	0,196	0,35	0,208	0,27	
HCO ₃ ⁻ , ммоль (-)/100 г // HCO ₃ ⁻ , mmol (-)/100 g	0,62	0,35	0,44	0,65	0,168	0,131	0,144	0,169	0,125	0,01	0,037	
Ca ²⁺ обм, ммоль (+)/100 г // Ca ²⁺ , mmol (+)/100 g	0,84	0,8	1,61	1,18	1,125	0,9688	0,847	1,3125	0,6875	0,5625	0,4688	
Mg ²⁺ обм, ммоль (+)/100 г // Mg ²⁺ , mmol (+)/100 g	0,01	0	0,2	0,15	0,4375	1,25	0,844	0,4063	0,1818	0,375	0,751	
Обменн. катионы, ммоль (+)/100 г // Exchange cations, mmol (+)/100 g	0,33	0,27	0,82	0,41	0,016	0,0238	0,017	0,0317	0,0476	0,0634	0,0477	

* **Примечание:** T1, T2, T3, T4 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией; A1 – гумусовый горизонт, A2 – элювиальный горизонт.

* **Note:** T1, T2, T3, T4 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species; A1 – humus horizon, A2 – eluvial horizon.

На первом участке содержание общего углерода ниже, чем на втором. Стоит отметить, что в точках контроля содержание углерода в 1,2-1,5 раз меньше, чем в точках с рейнутрией, что, вероятно, объясняется достаточно большим количеством опада, образованного рейнутрией, что приводит как к изменению состава ви-

дов по требовательности к условиям почвенного богатства, так и делает невозможным развитие (и даже попадание диаспор) ряда видов вовсе.

По результатам анализа катионно-анионного состава заметим, что почвы на втором участке более солонцеватые (содержание натрия в 1,1 - 1,9 раз больше

под рейннутрией). Подобная ситуация может быть объяснена как тем, что там оседает больше солей из реагентов, так и осолонцеванием (что, в принципе, может рассматриваться как относительно естественный процесс под рейннутрией).

Количество обменных катионов Mg^{2+} и Ca^{2+} в почвах из точек с рейннутрией меньше, чем в почвах из точек контроля. Суммарное количество обменных катионов в точках контроля в 1,2-2 раза больше, чем в точках произрастания рейннутрии. Содержание таких ионов, как Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , в точках контроля выше, чем в точках произрастания рейннутрии. Содержание же анионов F^- , Cl^- , NO_2^- , наоборот, ниже в точках контроля.

В целом, прослеживается тенденция к выщелачиванию поверхностных горизонтов почв рейннутрией. Это обусловлено следующими причинами:

- количество катионов натрия (в 1,1-1,9 раза) и калия (в 1,2-1,3 раза) больше под рейннутрией (на участках 1 и 2 – это справедливо уже для верхних горизонтов; на участках 3 и 4 – для нижних горизонтов, что связано с наличием насыпных грунтов);

- минерализация (%) уменьшается в 4 парах точек в 1,3-1,8 раза;

- уменьшается кол-во обменных катионов кальция (до 1,4 раза) и магния (в 1,3-2,0 раза).

При этом отмечена тенденция к удержанию анионов в поверхностных горизонтах почв: содержание ряда, в частности, на участках 1 и 2 анионов больше под рейннутрией (хлора в 1,1-1,2 раза, нитритов NO_2^- до 2,2 раза, фосфатов PO_4^{3-} до 2,6 раза).

Это означает, что под рейннутрией поверхностные горизонты почв, по сравнению с теми же условиями на контрольных точках, постепенно подкисляются, беднеют (выщелачиваются, теряют питательные катионы) и больше подвержены осолонцеванию. При этом отмечена тенденция к снижению pH (таб. 1).

Таким образом, формирование зарослей рейннутрии приводит к комплексному изменению свойств поверхностных горизонтов почв, что доказывает практически полную неэффективность механических методов борьбы с ней и указывает на крайнюю сложность рекультивации территорий после удаления вида.

Поскольку рейннутрия нуждается в достаточно большом количестве ионов кальция и магния, то, вероятно, их нехватка сможет уменьшить ее рост и распространение.

Известно, что в стеблях рейннутрии присутствуют друзы с оксалатом кальция [23], возможно, изменяя содержание кальция в почве, можно добиться ухудшения роста растения. Согласно проведенному нами исследованию в точках контроля содержание обменного катиона Ca^{2+} заметно выше, чем в точках произрастания рейннутрии.

Заключение

Анализ фитоценозов в долинах Чермянки и Лихоборки подтвердил снижение числа видов, слагающих фитоценозы в точках произрастания рейннутрии по сравнению с точками контроля. На участках произрастания рейннутрии происходит постепенное упрощение структуры сообществ. Показано, что при длительном сохранении популяции рейннутрии следует ожидать

практически полной деградации изначальных фитоценозов с разрушением их состава и структуры.

За счёт большого количества корней, рейннутрия задерживает более мелкие частицы почвы, тем самым изменяя местообитание. Химический анализ почв показал, что рейннутрия «вытягивает» значительную часть полезных веществ из почвы, что неблагоприятно влияет на видовой состав фитоценозов. Поверхностные горизонты почв под рейннутрией беднеют, подвержены осолонцеванию. Отмечена тенденция к закислению почв рейннутрией.

Образование зарослей рейннутрии влечет за собой существенные изменения свойств поверхностных горизонтов почв, что указывает на неэффективность механических методов борьбы с ней и на серьезные сложности при рекультивации территорий после удаления вида.

Скашивание зарослей рейннутрии не является эффективным способом борьбы с ней. За счет сохранения стеблей и листьев в течение зимнего периода, рейннутрия способна задерживать часть снежного покрова. Данное явление может оказывать серьезное влияние на свойства в том числе и близлежащих местообитаний. При сопоставлении результатов наблюдений за изменением высоты снежного покрова на территориях, где заросли рейннутрии не скашивались, и территориях, где заросли подвергались механическому воздействию, четких тенденций выявить не удалось.

В силу вышеизложенного существенное значение приобретает организация мероприятий, направленных на ограничение распространения растений рода рейннутрия на территории Средней полосы Европейской России. Учитывая опасность распространения рейннутрии и малую эффективность мер борьбы с ней, необходимо как можно более раннее тщательное наблюдение за расселением рейннутрии на территории Москвы. Это предоставит возможность на ранних стадиях организовать мероприятия, направленные на ограничение распространения данного растения.

Выявленные тенденции и сделанные выводы в полной мере применимы только к обследованным долинам Чермянки и Лихоборки и лишь с оговорками – к территории Средней полосы Европейской России.

Сведения об авторском вкладе

Н.Г. Кадетов – разработка проблематики и концепции исследования, участие в полевых работах, участие в анализе результатов, вычитка финального варианта статьи

М.А. Шамонова – сбор сведений об особенностях вида и способах борьбы с ним, участие в полевых работах, проведение химических анализов, первичный анализ результатов, подготовка первичного текста статьи.

Contribution of the authors

N.G. Kadetov – development of the research problems and concept, participation in field work, participation in the analysis of results, proofreading of the final version of the article.

M.A. Shamonova – collecting information about the characteristics of the species and methods of combating it, participating in field work, conducting chemical analyzes,

primary analysis of the results, preparing the primary text of the article.

Список источников

1. Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.В., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: Изд-во Смол. гуманитар. ун-та, 1997. 296 с.
2. Васильев О.Д., Михеева А.И., Кадетов Н.Г. Картографирование популяций инвазивных растений на городских ООПТ с использованием ДДЗ // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 261-262.
3. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Чёрная книга флоры Средней России. М.: Геос, 2010. 494 с.
4. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Нотов А.А. Чёрная книга флоры Тверской области. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2011. 279 с.
5. Зорикова С.П., Зорикова О.Г. Изучение рейннутрии японской (*Reynoutria japonica*) на объектах животного и растительного происхождения. // Изв. Самар. НЦ РАН. 2011. т.13, №1-4. С. 831-834.
6. Иванов В.В., Денисенко О.Н. Полифенольные соединения горца (рейннутрии) сахалинского. // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-2. С. 374-377.
7. Кадетов Н.Г., Сулова Е.Г. Инвазивные растения на региональных особо охраняемых природных территориях Московской области // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. С. 131-133.
8. Кадетов Н.Г., Чернышов М.П. Влияние инвазивных видов растений на элементы зелёной инфраструктуры городов на примере Московской агломерации // Социально-экологические технологии. 2021. Т. 11, № 3. С. 305-321. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-327-344>
9. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2009. 148 с.
10. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Техника лабораторных работ. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2010. 116 с.
11. Куклина А.Г., Каштанова О.А., Ткаченко О.Б., Келдыш М.А., Червякова О.Н. Фитосанитарный мониторинг инвазивных видов гибридогенного комплекса *Reynoutria* Houtt. (Polygonaceae) // Бюллетень Главного ботанического сада. 2020. № 2. С. 63-68.
12. Майоров С.Р., Бочкин В.Д., Насимович Ю.А., Щербаков А.В. Адвентивная флора Москвы и Московской области. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. 538 с.
13. Майоров С.Р., Алексеев Ю.Е., Бочкин В.Д., Насимович Ю.А., Щербаков А.В. Чужеродная флора Московского региона: состав, происхождение и пути формирования. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2020. 576 с.
14. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2014. 635 с.
15. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
16. Методы полевых и лабораторных исследований растений и растительного покрова. Петрозаводск, 2001. 360 с.
17. Мотыль М., Бакей С. Риск тотальной инвазии рейннутрии японской в новом климате Беларуси // Наука и инновации. 2019. №7. С. 71-74. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2019-10-71-74>
18. Неронов В.М., Луцкекина А.А. Чужеродные виды и сохранение биологического разнообразия // Успехи современной биологии, 2001, т. 121, № 1. С. 121-128.
19. Панасенко Н.Н. Роль инвазивных растений в современных процессах преобразования растительного покрова. Дисс. ... д.б.н. Брянск, 2021. 326 с.
20. Почва, город, экология / ред. Г.В. Добровольский. М., 1997. 320 с.
21. Прохоров В.Н. Аллелопатический потенциал адвентивных видов с высокой инвазивной активностью во флоре Беларуси // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биял. наук. 2018. Т. 63, №2. С. 163-170.
22. Самые опасные инвазивные виды России (ТОП-100) / Ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 688 с.
23. Серебряная Ф.К., Иванов В.В., Денисенко О.Н., Бережная Л.А. Морфолого-анатомическое исследование горца (рейннутрии) сахалинской // Современные проблемы науки и образования. 2014. №2. С. 274-279.
24. Решетникова Н.М., Майоров С.Р., Крылов А.В. Чёрная книга Калужской области. Сосудистые растения. Калуга: ООО «Ваш Домь», 2019. 342 с.
25. Флора Москвы / под. ред. В.С. Новикова. М.: Голден-Би, 2007. 512 с.
26. Шамонова М.А., Кадетов Н.Г. Влияние растений рода рейннутрия на компоненты экосистем долин малых рек в условиях города // Актуальные вопросы охраны биоразнообразия на заповедных территориях: мат. Всерос. науч.-практ. Конф. Уфа: РИЦ БашГУ, 2020. С. 379-384.
27. Экология крупного города (на примере Москвы). М.: «ПАСЬВА», 2001. 192 с.
28. Handbook of alien species in Europe/ Invading nature: springer series in invasion ecology. Vol. 3. Springer, 2009. 400 p.
29. Lowe S., Browne M., Boudjelas S., De Poorter. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A selection from the *Global Invasive Species Database* (IUCN). The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 2000. 12 p.
30. Shaw R.H., Seiger L.A. Japanese knotweed // Biological control of invasive plants in the Eastern United States. USDA APHIS PPQ and USDA Forest Service, 2002. P. 159-166.

References

1. Annenskaya, G., Zhuchkova, V., Kalinina, V. Mamai, I., Nizovtsev, V., Khrustaleva, M. and Tseselchuk, Yu., 1997. *Landshafty Moskovskoy oblasti i ikh sovremennoye sostoyaniye* [Landscapes of the Moscow region and their current state]. Smolensk, Izd-vo Smol. humanit. un-ta, 296 p. (in Russian)

2. Vasil'yev, O., Mikheyeva, A. and Kadetov, N., 2013. Kartografirovaniye populyatsiy invazivnykh rasteniy na gorodskikh OOPT s ispol'zovaniyem DDZ [Mapping populations of invasive plants in urban protected areas using remote sensing]. *Aerokosmicheskiye metody i geoinformatsionnyye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaystve*. Moscow: TSEPL RAN, pp. 261-262. (in Russian)
3. Vinogradova, Yu., Mayorov, S. and Khorun, L., 2010. *Chornaya kniga flory Sredney Rossii* [Black Book of the Flora of Central Russia]. Moscow, Geos publ., 494 p. (in Russian)
4. Vinogradova, Yu., Mayorov, S. and Notov, A., 2011. *Chernaya kniga flory Tverskoy oblasti* [Black book of flora of the Tver region]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 279 p. (in Russian)
5. Zorikova, S. and Zorikova, O., 2011. Izucheniye reynutrii yaponskoy (*Reynoutria japonica*) na ob'yektakh zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Study of Japanese Reynoutria japonica on objects of animal and plant origin]. // *Izv. Samar. NTS RAN*. 13(1-4), pp. 831-834. (in Russian)
6. Ivanov, V. and Denisenko, O., 2013. Polifenol'nyye soyedineniya gortsa (reynutrii) sakhalinskogo [Polyphenolic compounds of Sakhalin knotweed (reynutria)]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. (10-2), pp. 374-377. (in Russian)
7. Kadetov, N. and Suslova, E., 2017. *Invasive plants on the natural protected areas of Moscow region. Biodiversity: approaches to study and conservation*. Tver, Tver. state Univ., pp. 131-133. (in Russian)
8. Kadetov, N. and Chernyshov, M., 2021. Invasive plant species influence on the elements of green infrastructure of cities on the example of the Moscow agglomeration. *Environment and Human: Ecological Studies*, 11(3), pp. 327-344. (in Russian) <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-327-344>
9. Krechetov, P. and Dianova, T. *Khimiya pochv* [Soil chemistry]. *Analiticheskiye metody issledovaniya*. Moscow, Geogr. f-t MGU, 148 p. (in Russian)
10. Krechetov, P. and Dianova, T., 2010. *Khimiya pochv. Tekhnika laboratornykh rabot* [Soil chemistry. Laboratory technology]. Moscow, Geogr. f-t MGU, 116 p. (in Russian)
11. Kuklina, A., Kashtanova, O., Tkachenko, O., Keldysh, M. and Chervyakova, O., 2020. Phytosanitary monitoring of invasive species of the reynoutria houtt. (polygonaceae) hybrid complex. *Byulleten' glavnogo botanicheskogo sada*, (2), pp. 63-68. (in Russian)
12. Mayorov, S., Bochkina, V., Nasimovich, Yu. And Shcherbakov, A., 2012. *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoy oblasti* [Adventive flora of Moscow and the Moscow region]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 538 p. (in Russian)
13. Mayorov, S., Alekseyev, Yu., Bochkina, V., Nasimovich, Yu. and Shcherbakov, A., 2020. *Chuzherodnaya flora Moskovskogo regiona: sostav, proiskhozhdeniye i puti formirovaniya* [Alien flora of the Moscow region: composition, origin and ways of formation]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 576 p. (in Russian)
14. Mayevskiy, P., 2014. *Flora sredney polosy yevropeyskoy chasti Rossii* [Flora of the central zone of the European part of Russia]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 635 p. (in Russian)
15. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg, NIIKhimii SPbGU, 2002, 240 p. (in Russian)
16. *Metody polevykh i laboratornykh issledovaniy rasteniy i rastitel'nogo pokrova* [Methods of field and laboratory research of plants and vegetation]. Petrozavodsk, 2001. 360 p. (in Russian)
17. Motyl', M., Bakey, S., 2019. Risk total'noy invazii reynutrii yaponskoy v novom klimate Belarusi [The risk of total invasion of Rhinenutria japonica in the new climate of Belarus]. *Nauka i innovatsii*. (7), pp. 71-74. (in Russian) <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2019-10-71-74>
18. Neronov, V. and Lushchekina, A., 2001. Chuzherodnyye vidy i sokhraneniye biologicheskogo raznoobraziya [Alien species and conservation of biological diversity]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 121(1), pp. 121-128. (in Russian)
19. Panasenko, N., 2021. *Rol' invazionnykh rasteniy v sovremennykh protsessakh preobrazovaniya rastitel'nogo pokrova* [The role of invasive plants in modern processes of vegetation transformation]. Doctor's Dissertation of Sciences in Biology. Bryansk, 326 p. (in Russian)
20. Dobrovolskiy, G. (ed.), 1997. *Pochva, gorod, ekologiya* [Soil, city, ecology]. Moscow. 320 p. (in Russian)
21. Prokhorov, V., 2018. Allelopathic potential of adventive species with high invasive activity in flora of Belarus. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 63(2), pp. 163-170. (in Russian)
22. Dgebuadze Yu., Petrosyan V., Khlyap L. (ed.), 2018. Samyye opasnyye invazionnyye vidy Rossii (TOP-100) [The most dangerous invasive species of Russia (TOP-100)]. Moscow, T-vo nauch. izd. KMK, 688 p. (in Russian)
23. Serebryanaya, F., Ivanov, V., Denisenko, O., Berezhnaya, L., 2014. Morfologo-anatomicheskoye issledovaniye gortsa (reynutrii) sakhalinskoy [Morphological and anatomical study of the Sakhalin knotweed (reynutria)]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. (2), pp. 274-279. (in Russian)
24. Reshetnikova, N., Mayorov, S. and Krylov, A., 2019. *Chornaya kniga Kaluzhskoy oblasti. Sosudistyye rasteniya* [Black book of the Kaluga region. Vascular plants]. Kaluga: OOO «Vash Dom»», 342 p. (in Russian)
25. Novikova S. (ed.), 2017. *Flora Moskvy* [Flora of Moscow]. Moscow, Golden-Bi. 512 p. (in Russian)
26. Shamonova, M. and Kadetov N., 2020. *Vliyaniye rasteniy roda reynutriya na komponenty ekosistem dolin malykh rek v usloviyakh goroda* [The influence of plants of the genus Reynoutria on the components of ecosystems of small river valleys in urban conditions]. *Current issues of biodiversity protection in protected areas: Proceedings of All-Russian scientific-practical Conf., Ufa, RITS BashGU*, pp. 379-384. (in Russian)
27. *Ekologiya krupnogo goroda* (na primere Moskvy) [Ecology of a large city (using the example of Moscow)]. Moscow, «PAS'VA», 2001. 192 p. (in Russian)
28. Handbook of alien species in Europe/ Invading nature: springer series in invasion ecology. 3. Springer, 2009. 400 p.

29. Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S. De Poorter, 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A selection from the *Global Invasive Species Database* (IUCN). The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 12 p.

30. Shaw, R. and Seiger L., 2002. Japanese knotweed. *Biological control of invasive plants in the Eastern United States*. USDA APHIS PPQ and USDA Forest Service, pp. 159-166.

Статья поступила в редакцию 18.11.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 18.11.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 15.01.2024.