



Научный обзор

Основные аспекты изучения инвазионных видов рода *Solidago*

Ю.В. Загурская 

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, Ленинградский пр-кт, д. 10

syjil@mail.ru

Поступила в редакцию: 29.10.2021
Доработана: 28.12.2021
Принята к печати: 10.01.2022
Опубликована онлайн: 12.05.2022

DOI: 10.23859/estr-211029
УДК 581.552/504-2:582.991

Аннотация. Воздействие инвазионных видов на экосистемы входит в число важнейших экологических проблем. Представители рода *Solidago* активно проникают в различные растительные сообщества. Чтобы определить основные задачи, стоящие перед исследователями, и выделить наиболее актуальные аспекты изучения инвазионных таксонов рода, было проанализировано порядка 2300 литературных источников. Обнаружены неоднозначные свидетельства ингибирующего влияния растений золотарника на виды местной флоры. Так, в некоторых работах констатируется инвазия представителей рода *Solidago* и вытеснение видов местной флоры в различных природно-климатических условиях, однако существует и мнение, что основные изменения касаются не таксономического, а функционального разнообразия. На результат аллелопатического воздействия могут влиять не только эдафические факторы, но и стадия развития растений, а также богатство флоры различных регионов и взаимовлияние указанных факторов. Наиболее вероятно, что ингибирующее влияние на конкурирующие растения и почвенные микроорганизмы оказывают компоненты эфирного масла (терпены и терпеноиды).

Ключевые слова: *Solidago canadensis*, *Solidago gigantea*, фитоинвайдеры, почвенная биота, конкурентные взаимодействия организмов, аллелопатия.

Для цитирования. Загурская, Ю.В., 2022. Основные аспекты изучения инвазионных видов рода *Solidago*. *Трансформация экосистем* 5 (2), 102–115. <https://doi.org/10.23859/estr-211029>

Введение

Одной из наиболее актуальных экологических проблем на сегодняшний день является инвазивное воздействие натурализовавшихся заносных растений на естественные экосистемы, приводящее к нарушению естественного развития и восстановления биоценозов.

Существует мнение, что вторжение золотарника больше влияет на функциональное биоразнообразие, чем на таксономическое, поскольку

он образует группировки на антропогенно-трансформированных участках и не распространяется на стабильные растительные сообщества (Колдимова и Науменко, 2020; Wang et al., 2019a, b). В то же время известны свидетельства прямого негативного воздействия *Solidago canadensis* L. на растительные сообщества, при котором наблюдается не только доминирование данного вида, но и внедрение других аборигенных или адвентивных сорных растений. Следовательно, отмечается су-

ществленное снижение флористического разнообразия и подавление развития потенциальных доминант (Шмелев и Панкрушина, 2019; Chen et al., 2013; Fenesi et al., 2015; Wang et al., 2019a; Zubek et al., 2020), а также сопутствующее уменьшение разнообразия фауны и численности некоторых хозяйственно ценных насекомых (Čerevková et al., 2020; Fenesi et al., 2015).

В процессе оценки распространения и характера произрастания *S. canadensis* в Республике Беларусь было обнаружено его активное внедрение в различные биотопы, причем большинство выявленных фитоценозов с доминированием чужеродных видов-трансформеров приурочено к староосвоенным антропогенным ландшафтам (Gusev, 2019). Кроме того, данный вид заселяет не подвергающиеся значительной антропогенной нагрузке открытые пустоши и светлые лиственные леса на территории города (Чумаков и Невердасова, 2017). Наблюдения в условиях Западной Сибири показали, что массовое вторжение *S. canadensis* отмечается в первую очередь при нарушении плодородного почвенного слоя в результате вспашки / перекопки или сваливания мусора. В основном это происходит на относительно недавно нарушенных территориях и не затрагивает ранее рекультивированные местообитания или экотопы, начавшие активное восстановление растительности до проникновения золотарника (Уфимцев, 2018). В европейской части России значительную часть популяций золотарников связывают с увеличением площадей выведенных из оборота пахотных земель (Савин и Шишконокова, 2021). В Польше в ходе изучения заброшенных сельскохозяйственных угодий установлены факты активного заселения *S. canadensis* на молодых залежах (2–4 года) и практически полного его исчезновения на 17-летней пустоши (Skrajna et al., 2012).

По интенсивности проникновения *Solidago canadensis* и *S. gigantea* Aiton уступают некоторым другим захватчикам, в особенности однолетним (*Impatiens parviflora* DC., *I. glandulifera* Royle, *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray) и древесным (*Robinia pseudoacacia* L., *Reynoutria japonica* Houtt., *Juglans regia* L.) видам (Bomanowska et al., 2019; Lenda et al., 2019; Zelnik et al., 2020). Кроме того, сообщества с участием *Solidago* отличаются от сообществ с доминированием других заносных видов наибольшим флористическим богатством (Abramova and Golovanov, 2019). Однако большинство исследователей относит золотарник не просто к инвазионным видам, а причисляет его к трансформерам, изменяющим естественные сообщества (Шмелев и Панкрушина, 2019; Burlutskiy et al., 2019; Gusev, 2015; Myśliwy et al., 2020; Richardson et al., 2000; Stefanowicz et al., 2019; Teixeira et al., 2020; Tokarska-Guzik et al., 2010) и

замедляющим процесс восстановления антропогенно нарушенных (Gusev, 2019). Активное вторжение *Solidago canadensis* и *S. gigantea*, как правило, отмечается на участках, нарушенных более 5 лет назад (Brzank et al., 2019), причем снижение флористического разнообразия происходит в очень короткие сроки – около 2 лет (Shelepova et al., 2019). Предполагается, что отрицательное воздействие на флористическое разнообразие обуславливается площадью проективного покрытия *S. canadensis* (Gusev, 2021).

Опубликованные на сегодняшний день статьи о видах рода *Solidago* посвящены в основном отдельным вопросам или направлениям исследований. Цель нашей работы – выявить наиболее важные экологические проблемы и определить актуальные аспекты изучения для инвазионных видов рода *Solidago*.

Материалы и методы

Для анализа литературных источников использовали международные реферативные базы ScienceDirect (издательство Elsevier) и Web of Science (Clarivate Analytics), а также Российскую библиографическую базу РИНЦ (ООО «Научная электронная библиотека») с последующим объединением результатов и их систематизацией по направлениям. Поисковый запрос: “Solidago”, сортировка: по дате опубликования. Рассмотрено содержание около 2300 источников по тематике исследования.

Названия таксонов растений приводятся по World Flora Online (2021).

Инвазионные таксоны рода *Solidago*

Solidago canadensis (s.l.) (золотарник канадский) и *Solidago gigantea* (золотарник гигантский) – травянистые многолетние растения североамериканского происхождения, занесенные в Черные книги России (Виноградова и др., 2010; Черная Книга флоры Сибири, 2016; Vinogradova et al., 2020); некоторое время назад они использовались в ходе экспериментов по рекультивации нарушенных земель. Кроме того, имеются сведения об интенсификации гибридизационных процессов во вторичном ареале (Ellstrand and Shierenbeck, 2006) и активной натурализации новых, более устойчивых таксонов (Галкина и Виноградова, 2019): в частности *S. × niedereideri* Khek, гибрид *S. canadensis* и *S. virgaurea* L., известный из Западной и Восточной Европы (Karpavičienė and Radušienė, 2016), также был зафиксирован в Европейской части России. В 2021 г. отмеченные растения обнаружены уже не только в Калининградской и Псковской, но и Тульской областях. Гибридная природа особей *S. × niedereideri* указанных попу-

ляций была подтверждена с помощью молекулярно-генетических методов (Галкина и Виноградова, 2019; Галкина и Виноградова, 2020; Лысенков и Галкина, 2021). Существует предположение о том, что популяции *S. × niedereideri* воспроизводятся в результате новых актов гибридизации родительских видов (Лысенков и Галкина, 2021).

Морфобиологические особенности инвазионных видов *Solidago*

Среди биологических особенностей наиболее изученного вида – *S. canadensis* – следует обратить внимание на его адаптивные способности: вид отличается высокой зимостойкостью, переносит длительные засухи в летний период, практически не подвержен болезням и не повреждается вредителями. *S. canadensis* предпочитает открытые места, снижая инвазионную активность при дефиците освещения (Dubovik et al., 2019), однако достаточно теневынослив (Пещанская, 2009; Balf, 1992). Репродуктивный потенциал также зависит от освещенности: при 20° С на свету прорастает до 96%, семян в темноте – до 21% (Николаева и др., 1985). Плод *Solidago* представляет собой узкоцилиндрическую, ребристую семянку. Одно средневозрастное растение может одновременно формировать около 30 генеративных побегов, а мелкие цветки собраны в корзинки, образующие сложные многоуровневые соцветия длиной до 40 см, благодаря чему развивается большое количество мелких, легких семян. Оба инвазионных вида золотарника являются корневищными (Semple and Cook, 2006; Werner et al., 1980) и легко размножаются вегетативно. Активное размножение указанными способами, как правило, обеспечивает стремительное разрастание популяций и быстрый захват территорий при внедрении в дикорастущие сообщества (Дайнеко и Тимофеев, 2018). Максимальная репродуктивная мощность (как семенная, так и вегетативная) достигается растениями на 4–6 годы жизни (Skrajna et al., 2012).

Наиболее существенные межвидовые различия между *S. canadensis* и *S. gigantea* связаны со строением корневищ, что приводит к различным моделям разрастания: *S. canadensis* формирует отдельные достаточно плотные группы, в то время как заросли длиннокорневищного *S. gigantea* обычно монодоминантные и более протяженные. В качестве отличительных признаков для данных таксонов также значимы плотность соцветий, цвет паппуса и опушение верхней части стеблей (Ustinova and Lysenkov, 2020; Weber and Jakobs, 2005; Werner et al., 1980).

Исследователи подчеркивают морфологическое разнообразие инвазионных видов *Solidago*. Особенно variabelны размеры надземных ор-

ганов растений (в том числе на внутритаксонном (популяционном) уровне) в зависимости от климата, почвенных показателей и разнообразия фитоценозов, в которых произрастают популяции данных видов (Dong and He, 2019; Hejda et al., 2019; Jakobs et al., 2004; Sakaguchi et al., 2019; Weber, 1997; Weber and Jakobs, 2005; Weber and Schmid, 1998). Суммарная адаптационная способность растений не коррелирует с полиплоидией, хотя именно с увеличением хромосомного набора связывают усиление микоризы и, как следствие, обмена веществ в ризосфере (Wan et al., 2020; Wu et al., 2019). Кроме того, следует отметить отсутствие доказательств взаимосвязи между увеличением размеров растений и их повышенной конкурентоспособностью (Pal et al., 2020).

Влияние инвазионных *Solidago* на почвы и почвенную биоту

Взаимное влияние инвазионных растений и почвенных микроорганизмов – один из наиболее исследуемых вопросов (Reinhart and Callaway, 2006). Известно, что инвазия *S. canadensis* оказала положительное воздействие на некоторые почвенные характеристики (микробную биомассу почвы, дыхание и использование источников углерода и др.) (Liao et al., 2011) и ингибировала развитие не только местных растений, но и почвенных патогенов (Zhang et al., 2009b). Корневые экссудаты *S. canadensis* стимулировали прорастание семян растения из семейства Fabaceae (*Kummerowia striata* Thumb), что, по мнению авторов, обуславливается опосредованным влиянием на сообщества грибов арбускулярной микоризы. Обработка инокулятами микоризных культур увеличивала биомассу и концентрацию фосфора в надземной массе *S. canadensis* (Yang et al., 2014). В ходе изучения аллелопатического воздействия отмечено, что при отсутствии почвенных патогенов происходило ингибирование проростков томата растениями *S. canadensis*, хотя при добавлении *Pythium ultimum* Trow подавление проростков томата снижалось на участках с *S. canadensis* по сравнению с контролем (Zhang et al., 2011). Однако наряду с этим получены данные, свидетельствующие о статистически значимом снижении разнообразия сообществ грибов арбускулярной микоризы в результате инвазии *S. canadensis* вне зависимости от параметров почвы (Řezáčová et al., 2021).

Из 7 видов рода *Solidago* наиболее выраженный эффект восстановления ацетилена (метод измерения скорости фиксации N_2 *in vitro*) обнаружили *S. rigida* L. и *S. canadensis* (McKone and Biesboer, 1986), но содержание и скорость поглощения азота при этом не увеличивались (Yang et al., 2014). Учеными отмечается тот факт, что раз-

вите и влияние корневых экссудатов *Solidago* напрямую зависит от состава и численности почвенных микроорганизмов (в особенности грибов арбускулярной микоризы) (Jin et al., 2004; Sun and He, 2018); это следует принимать во внимание при постановке экспериментов на стерильном субстрате (автоклавирование и др.) (Sun and He, 2018). Отметим, что к составу и структуре субстрата растения не требовательны, но наилучшее и наиболее длительное развитие *Solidago canadensis* достигается на тяжелых (богатых) почвах (Bornkamm and Hennig, 1982).

Наряду с *S. canadensis* среди наиболее успешных захватчиков новых территорий также отмечают *S. gigantea*; при изучении его воздействия на почвенные показатели отмечено положительное влияние на биомассу грибов и соотношение грибы/бактерии (Stefanowicz et al., 2019), однако однозначных выводов о его способности стимулировать или подавлять развитие микроорганизмов нет (Scharfy et al., 2010; Zhang et al., 2009a).

Исследователи предполагают, что одним из лимитирующих факторов при определении конкурентоспособности растений является соотношение N:P в окружающей среде благодаря различной потребности видов в этих химических элементах и перераспределению ресурсов вследствие инвазии (Wan et al., 2018).

Существуют данные о том, что инвазия *S. canadensis* по сравнению с аборигенными доминантами пионерных сообществ ускоряет круговорот макроэлементов за счет увеличения надземной продуктивности и накопления питательных веществ, что положительно сказывается на почвенных процессах (Ye et al., 2019). Однако, согласно указанному исследованию, все аборигены являлись видами семейства *Poaceae*, поэтому различия могут объясняться таксономическими особенностями. В целом отмечается снижение качества субстрата в результате инвазии *S. canadensis*; это может служить фактором ухудшения воспроизводства конкурирующих видов (в том числе снижать доступность азота) и сопутствующего увеличения корневой массы инвайдера (Ren et al., 2019; Ren et al., 2020a; Zubek et al., 2020). При повышении почвенной температуры и концентрации азота показатели продуктивности *S. canadensis* возрастают, следовательно, усиливается риск его инвазии (Ren et al., 2020b; Zhou et al., 2019). Наиболее существенно после вторжения изменяется (повышается) pH почв; этим может объясняться и изменение некоторых микробиологических показателей (Bobul'ská et al., 2019). Кроме того, существует гипотеза о том, что некоторые химические свойства почвы и микробные параметры могут использоваться в качестве индикаторов плотности инвазионных популяций *S. canadensis* (Zhang et al., 2009a).

Конкурентные взаимодействия растений (аллелопатия)

Среди наиболее важных признаков потенциально опасных для экосистем видов выделяют их аллелопатические свойства, способствующие экологической инвазии (Кондратьев и Ларинова, 2018; Кондратьев и др., 2017; Bais et al., 2003; Gao et al., 2018; Hierro and Callaway, 2003; Rice, 1984; Ridenour and Callaway, 2001; Zhang et al., 2019a). Свидетельства угнетающего влияния *S. canadensis* на развитие аборигенных растений и объяснения его механизмов разнообразны: даже эксперименты в лаборатории и мезокосмах (микрокосмах) (Bruckner et al., 1995; Del Fabbro and Prati, 2015a, b; Stefanowicz et al., 2019) не всегда имеют однозначные результаты. Китайскими учеными отмечается, что негативный эффект саженцев *S. canadensis* на растения местного происхождения (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., *Cichorium intybus* L., *Elymus dahuricus* Turcz. ex Griseb., *Poa pratensis* L. и *Setaria plicata* (Lam.) T. Cooke) оказался намного слабее, чем на растения, полученные из Северной Америки: *Achillea millefolium* L., *Calamagrostis canadensis* (Michx.) P. Beauv., *Carex vulpinoidea* Michx., *Elymus canadensis* L. и *Poa secunda* J. Presl (Sun and He, 2018).

Изучение влияния корневых экссудатов *S. canadensis* из различных популяций Европы и Америки на европейские виды (*Arrhenatherum elatius* (L.) Presl., *Trifolium pretense* L., *Lythrum salicaria* L., *Stachys officinalis* (L.) Trevis., *Dactylis glomerata* L. и *Achillea millefolium* L.), произрастающие совместно с *S. canadensis* (как правило, на краю зарослей, за исключением *A. millefolium*, ингибирующее воздействие на который оказалось наименьшим), установило, что наиболее сильным эффектом обладали растения из европейских (инвазивных) популяций по сравнению с растениями естественного ареала (Abhilasha et al., 2008); данный факт подтверждается результатами исследования других инвазионных растений (Mallik and Pellissier, 2000; Prati and Bossdorf, 2004).

На результат аллелопатического воздействия могут влиять не только эдафические факторы, но и стадии развития растений, происхождение растительного материала, состав аборигенных растений в различных регионах (Del Fabbro and Prati, 2015a; Prati and Bossdorf, 2004; Sun and He, 2018).

Согласно одной из последних гипотез об успешности инвазии заносных видов (Novel weapons), решающее значение при этом отводится внесению в почву растениями-захватчиками ранее неизвестных естественным сообществам органических веществ, чаще всего – эфирных масел (Callaway and Aschchoug, 2000).

Изменчивость химического состава исследуемых золотарников относительно низка (Radusiene et al., 2015). Наиболее изученными соединениями,

характерными для золотарника, являются полифенолы (в том числе полисахаридно-полифенольные конъюгаты (Kraujalienė et al., 2017)) и терпены, с которыми связаны основные лекарственные свойства растений *Solidago*: антиоксидантное, бронхолитическое, гипотензивное, противомикробное, противогрибковое и антипролиферативное (Apáti et al., 2003; Bonaterra et al., 2019; Deng et al., 2015; Gomes et al., 2018; Liu et al., 2018; Saluk-Juszczak et al., 2010; Šutovská et al., 2013).

Попытки объяснить воздействие *S. canadensis* на проростки томата (через аллелопатическое влияние на почвенный возбудитель корневой гнили *Pythium ultimum*) наличием сапонинов и фенольных соединений (Zhang et al., 2011) недостаточно обоснованы. Растительные фенольные соединения (хлорогеновая кислота, рутин, гиперозид, изокверцитрин, кверцитрин и др.) представляют собой адаптивные вещества, которые не представляют важности для инвазивного распространения (Radusiene et al., 2015). Кроме того, наличие в почве указанных соединений скорее является следствием частичного разложения органических соединений почвы (гуминовых веществ) и/или вымывания из микроскопических остатков корней растений, а не результатом их выделения корнями живых растений *S. canadensis*.

При изучении аллелопатии инвазивных видов имеют значение механизмы воздействия аллелохимикатов: немедленное (гипотеза о «новом оружии» (Callaway and Aschoug, 2000; Callaway and Ridenour, 2004)) или отложенное во времени (аллелопатическое наследие) воздействие, причем «наследственные» эффекты могут сохраняться после гибели или удаления захватчиков, оказывая влияние на сообщества в долгосрочной перспективе (Inderjit et al., 2011). Воздействие также может быть прямым или косвенным (благодаря регуляции почвенной микрофлоры) (Del Fabbro and Prati, 2015b). Наиболее вероятными аллелопатическими агентами *Solidago* являются терпены и терпеноиды (Abhilasha et al., 2008), а также летучие ароматические соединения. В составе растений *S. canadensis* и других видов рода обнаружено около 80 таких компонентов, в основном принадлежащих к классам ди-, три- и сесквитерпенов (Amtmann, 2010; Chaturvedula et al., 2004; Kalemba and Thiem, 2004; Kasali et al., 2002). Косвенное влияние на почвенную микрофлору также могут оказывать производные терпенов, например циклоколоренон, который в большом количестве обнаружен в эфирном масле *S. gigantea* (Chaturvedula et al., 2004; Stefanowicz et al., 2019).

Таким образом, в ходе изучения аллелопатического воздействия инвазивных видов не всегда получает подтверждение теория о подавлении роста местных растений в связи с высвобождением

в почву химических соединений и стимуляцией развития патогенной почвенной биоты (Del Fabbro and Prati, 2015a) или влиянием на почвенные азотфиксирующие бактерии (Wang et al., 2018).

Изменение структуры фитоценоза при инвазии *Solidago* как причина нарушения равновесия в фаунистических комплексах

Серьезность влияния частных изменений на экосистему, как правило, оценивают по степени нарушения функционирования смежных структур и по последствиям для экологического благополучия и хозяйственной деятельности человека.

При изучении инвазивных растительных сообществ отмечают изменение состава и структуры экосистем в результате образования новых механизмов взаимодействия с местной биотой (Aerts et al., 2017; Wolfe and Klironomos, 2005; Zhang et al., 2019b). Однако все полученные результаты и высказанные гипотезы до сих пор разрознены и объединяются только непостоянством наблюдаемых эффектов в отношении роста, поведения, разнообразия и продуктивности организмов и сообществ даже в ходе аналогичных или параллельных экспериментов (Vilà et al., 2011).

В процессе изучения зарослей инвазивных золотарников на рудеральных городских территориях в Германии (г. Карлсруэ) зафиксировано увеличение в них количества пауков-бокоходов (Thomisidae), однако на общую численность и таксономический состав Araneae эти флористические изменения не повлияли (Bauer et al., 2021).

Инвазия *S. canadensis* в некоторых случаях может негативно отражаться на численности жу-желиц и пчел (в том числе медоносных) и других групп опылителей (Fenesi et al., 2015; Groot et al., 2007; Moroń et al., 2009). Основным механизмом воздействия инвазивных *Solidago* на аборигенные растительные сообщества заключается в способности конкурировать с местными видами за насекомых-опылителей (Sun et al., 2013). Предположительно, это происходит благодаря большей высоте растений, размеру соцветий и продолжительности цветения. Интересно, что при равных возможностях выбора насекомые-опылители отдадут предпочтение растениям *S. gigantea* перед *S. canadensis*; это может быть связано с различными моделями распространения указанных видов (Ustinova and Lysenkov, 2020).

Выводы о модифицирующем воздействии золотарника на почвенную фауну естественных биогеоценозов не всегда подтверждаются современными исследованиями. В частности, при сопоставлении сообществ почвенных членистоногих под зарослями *S. gigantea* и местных растений обнаружено высокое таксономическое сходство этих

сообществ (Ustinova et al., 2021). Было установлено воздействие *S. gigantea* на характеристики сообщества почвенных нематод, однако констатируется неоднозначность изменений в различных экосистемах (Čerevková et al., 2020).

Проблемы сохранения и восстановления биоразнообразия

Независимо от механизмов проникновения и способов влияния на экосистемы инвазионные виды-трансформеры должны стать первоочередными для экологического контроля (Хорун, 2014). В связи с активным распространением инвазионных видов *Solidago* возникают вопросы применения постоянно увеличивающихся сырьевых запасов его фитомассы. Эфирные масла из *S. gigantea* и *S. canadensis* могут применяться как материал для производства почвенных пестицидов, поскольку обладают инсектицидным действием, но при этом не токсичны для дождевых червей (*Eisenia fetida* (Savigny, 1826)) (Benelli et al., 2019).

Природные механизмы регуляции распространения золотарника практически отсутствуют: установлен низкий уровень влияния улиток и слизней на жизнедеятельность *S. canadensis* и *S. gigantea* и их неспособность подавлять экспансию данных видов растений в природных популяциях (Устинова, 2019). Несмотря на широкий спектр условий распространения инвазионных золотарников, в высокогорных районах их внедрение ограничено. P.C.D. Perera et al (2021) объясняют отмеченный факт низкотемпературными климатическими условиями, однако данные о типах и структуре почв в местах нахождения/отсутствия *S. canadensis* и *S. gigantea* в данной статье недостаточно информативны. Расселение *S. canadensis* при этом тесно связывают с человеческим фактором (в отличие от *S. gigantea*).

В качестве мер по ограничению внедрения и распространения инвазионных растений необходимо осуществление мероприятий по возвращению в сельскохозяйственный оборот залежей (в особенности бывших пахотных земель) (Kozak and Pudelko, 2021) или их альтернативное использование. Рекомендуется создание и поддержание вдоль рек комплексных охраняемых прибрежных зон достаточной ширины (Zelnik et al., 2020). В ходе долгосрочного эксперимента установлен факт воздействия беспозвоночных травоядных животных на популяционную динамику *S. canadensis*, однако оно начинает проявляться через шесть и более лет (Korell et al., 2019). Кроме того, отмечается, что совместное влияние 2-х различных инвайдеров (на примере *Juglans regia* и *Solidago canadensis*), вероятно, менее губительно для сукцессионных процессов, чем воздействие каждого вида в отдельности (Lenda et al., 2019).

Эфирные масла из *S. gigantea* и *S. canadensis* могут применяться как материал для производства почвенных пестицидов, поскольку обладают инсектицидным действием, но при этом не токсичны для дождевых червей (*Eisenia fetida* (Savigny, 1826)) (Benelli et al., 2019).

Установлена возможность использования указанных растений в роли индикаторов загрязнения углеводородами (Chapman et al., 2013; Ficko et al., 2010). В настоящее время рассматривается возможность применения растений и надземной части фитомассы *Solidago canadensis* в качестве источника органического удобрения (Izydorczyk et al., 2020; Tang et al., 2020), биоаккумуляторов при фиторемедиации почв, загрязненных полихлорированными бифенилами (ПХБ) и сорбентов для удаления Cd (II) из сточных вод (Zhang et al., 2018), биотоплива (Ciesielczuk et al., 2014; Zihare et al., 2018), а также в качестве источника для производства растительных лекарственных средств и биологически активных добавок к пище (Amtmann, 2010; Chaturvedula et al., 2004; Kalemba and Thiem, 2004; Kasali et al., 2002).

Заключение

Три таксона рода *Solidago* являются инвазионными: североамериканские виды *S. canadensis* и *S. gigantea*, а также *S. × niedereideri*, имеющий гибридное происхождение (*S. canadensis* × *S. virgaurea*). Они занимают преимущественно антропогенно нарушенные сообщества; их способность внедряться в естественные биоценозы, влияние на ход восстановительных сукцессий и развитие агроценопопуляций существенно зависит от климатических, эдафических факторов, а также от богатства флоры конкретной территории.

Анализ источников из международных баз научной литературы по химии, биологии и экологии видов рода *Solidago* позволил установить, что наиболее активно исследуются вопросы влияния лимитирующих почвенных факторов и состава почвенной микробиоты на конкурентные взаимодействия растений. Однако судить о воздействии корневых экссудатов этих растений на почвенную микрофлору весьма затруднительно, поскольку результат зависит от исходной почвенной биоты, а стерилизация субстрата приводит к нарушению развития растений.

Механизмы влияния и аллелопатический потенциал инвазионных видов растений (фитоинвайдеров) существенно различаются в зависимости от объектов воздействия и стадии развития растений. Наиболее вероятными аллелопатическими агентами видов рода *Solidago* являются компоненты эфирного масла (терпены и терпеноиды). Гипотеза об ингибирующей роли фенольных соединений на конкурирующие растения безосновательна.

Благодарности

Выражаем признательность к.б.н. Бабаевой Елене Юрьевне (ВИЛАР, Россия) и анонимным рецензентам за ценные рекомендации. Благодарим Рыжкову О.В. (ПИН РАН, Москва) за высокопрофессиональное литературное редактирование статьи.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта гос. задания № 0286-2021-0010 (ЕГИСУ НИОКТР № ААА-А-А21-121011590010-5).

ORCID

Ю.В. Загурская  [0000-0001-8101-0945](https://orcid.org/0000-0001-8101-0945)

Список литературы

- Виноградова, Ю.К., Майоров, С.Р., Хорун, Л.В., 2010. Черная книга флоры Средней России. Чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. ГЕОС, Москва, Россия, 502 с.
- Галкина, М.А., Виноградова, Ю.К., 2019. Инвазионные таксоны рода *Solidago* L. в окрестностях города Пскова. *Трансформация экосистем* 2 (2), 62–68. <https://www.doi.org/10.23859/estr-190207>
- Галкина, М.А., Виноградова, Ю.К., 2020. Гибридогенная активность *Solidago* L. в Северо-Восточной Европе. *Трансформация экосистем* 3 (3), 139–147. <https://www.doi.org/10.23859/estr-200429>
- Дайнеко, Н.М., Тимофеев, С.Ф., 2018. Развитие инвазивного вида золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.) в Ветковском и Чечерском районах Гомельской области. *Бюллетень науки и практики* 4 (4), 12–19.
- Колдомова, Е.А., Науменко, Н.И., 2020. Некоторые особенности распространения *Solidago canadensis* в городах Удмуртской Республики. *Экосистемы* 21, 68–74.
- Кондратьев, М.Н., Евдокимова, Д.П., Ларинова, Ю.С., 2017. Роль инвазий чужеродных видов растений в лесные экосистемы. *Актуальные проблемы лесного комплекса* 47, 127–131.
- Кондратьев, М.Н., Ларинова, Ю.С., 2018. Роль аллелопатии в инвазии растительных видов (обзор). *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии* 2, 48–61. <https://www.doi.org/10.26897/0021-342X-2018-2-48-61>
- Лысенков, С.Н., Галкина, М.А., 2021. Первая находка *Solidago* × *niederederi* Khek (Asteraceae) в Тульской области (Европейская часть России). *Российский журнал биологических инвазий* 14 (4), 106–113. <https://www.doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-106-113>
- Николаева, М.Г., Разумова, М.В., Гладкова, В.Н., 1985. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Наука, Ленинград, СССР, 347 с.
- Пещанская, Е.В., 2009. Биологические особенности золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.) при интродукции в условиях Ставропольской возвышенности. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Москва, Россия, 110 с.
- Савин, И.Ю., Шишконокова, Е.А., 2021. Пространственные особенности экспансии инвазивных видов золотарника в центральных областях европейской части России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая* 85 (3), 446–457. <https://doi.org/10.31857/S2587556621030134>
- Устинова, Е.Н., 2019. Изучение способности наземных моллюсков московской области использовать в пищу инвазионные виды рода *Solidago* (*S. canadensis*, *S. gigantea*). *Российский журнал биологических инвазий* 12 (3), 117–129.
- Уфимцев, В.И., 2018. Особенности распространения *Solidago canadensis* L. в нарушенных сообществах междуреченского городского округа. *Материалы V международной конференции «Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов»*. Кемерово, Россия, 119–120.
- Хорун, Л.В., 2014. Проблемы инвазионной экологии растений в зарубежной научной литературе. *Вестник Удмуртского университета: Серия Биология. Науки о земле* 3, 64–77.
- Черная Книга флоры Сибири, 2016. Виноградова, Ю.К., Куприянов, А.Н. (ред.). Гео, Новосибирск, Россия, 440 с.
- Чумаков, Л.С., Невердасова, М.А., 2017. Золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.) в различных биотопах на территории белорусской столицы. *Материалы XII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии»*. Гродно, Беларусь, 27–29.

- Шмелев, В.М., Панкрушина, А.Н., 2019. Особенности распространения инвазионных *Solidago* (Asteraceae) и их воздействие на природные виды. *Вестник ТвГУ. Серия: Биология и экология* 3 (55), 130–135. <https://www.doi.org/10.26456/vtbio105>
- Abhilasha, D., Quintana, N., Vivanco, J., Joshi, J., 2008. Do allelopathic compounds in invasive *Solidago canadensis* s.l. restrain the native European flora? *Journal of Ecology* 96 (5), 993–1001. <https://www.doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01413.x>
- Abramova, L.M., Golovanov, Ya.M., 2019. Classification of communities with alien species in the South Urals. IV. Communities with species of *Solidago* genus, *Lupinus polyphyllus* and *Phalacrolooma annuum*. *Vegetation of Russia* 36, 3–24. <https://www.doi.org/10.31111/vegrus/2019.36.3>
- Aerts, R., Ewald, M., Nicolas, M., Piat, J., Skowronek, S., Lenoir, J., Honnay, O., 2017. Invasion by the alien tree *Prunus serotina* alters ecosystem functions in a temperate deciduous forest. *Frontiers of Plant Science* 8, 179. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00179>
- Amtmann, M., 2010. The chemical relationship between the scent features of goldenrod (*Solidago canadensis* L.) flower and its unifloral honey. *Journal of Food Composition and Analysis* 23 (1), 122–129. <https://www.doi.org/10.1016/j.jfca.2009.10.001>
- Apáti, P., Szentmihályi, K., Kristó, Sz.T., Papp, I., Vinkler, P., Szoke, É., Kéry, Á., 2003. Herbal remedies of *Solidago* – correlation of phytochemical characteristics and antioxidative properties. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 32 (4–5), 1045–1053. [https://www.doi.org/10.1016/S0731-7085\(03\)00207-3](https://www.doi.org/10.1016/S0731-7085(03)00207-3)
- Bais, H.P., Vepachedu, R., Gilroy, S., Callaway, R.M., Vivanco, J.M., 2003. Allelopathy and exotic plant invasion: From molecules and genes to species interactions. *Science* 301, 1377–1380. <https://www.doi.org/10.1126/science.1083245>
- Balf, K., 1992. Garden worthy goldenrods. *Garden West* 6 (6), 36–37.
- Bauer, T., Bäte, D.A., Kempfer, F. Schirmel, J., 2021. Differing impacts of two major plant invaders on urban plant-dwelling spiders (Araneae) during flowering season. *Biological Invasions* 23, 1473–1485. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02452-w>
- Benelli, G., Canale, A., Pavela, R., Cianfaglione, K., Nagy, D.U., Maggi, F., 2019. Evaluation of two invasive plant invaders in Europe (*Solidago canadensis* and *Solidago gigantea*) as possible sources of botanical insecticides. *Journal of Pest Science* 92 (2), 805–821. <https://www.doi.org/10.1007/s10340-018-1034-5>
- Bobuľská, L., Demková, L., Čerevková, A., Renčo, M., 2019. Plant invasion alter activity of soil microbial community in forest and grassland ecosystems of eastern Slovakia. *Proceedings of 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019*. Sofia, Bulgaria, 595–602. <https://www.doi.org/10.5593/sgem2019/5.2/S20.074>
- Bomanowska, A., Rewicz, A., Adamowski, W., Kirpluk, I., Otręba, A., 2019. Invasive alien plants in Polish National parks – threats to species diversity. *PeerJ* 12, e8034. <https://www.doi.org/10.7717/peerj.8034>
- Bonaterra, G.A., Schwarzbach, H., Kinscherf, R., Kelber, O., Weiser, D., 2019. Anti-inflammatory effects of Phytodolor® (Stw 1) and components (Poplar, Ash And Goldenrod) on human Monocytes/Macrophages. *Phytomedicine* 58, 152868. <https://www.doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152868>
- Bornkamm, R., Hennig, U., 1982. Experimentell-ökologische Untersuchungen zur Sukzession von ruderalen Pflanzengesellschaften auf unterschiedlichen Boden. I. Zusammensetzung der Vegetation. *Flora* 172, 267–316. (In German). <https://www.doi.org/10.1007/BF00118399>
- Bruckner, A., Wright, J., Kampichler, C., Bauer, R., Kandeler, E. A., 1995. A method of preparing mesocosms for assessing complex biotic processes in soils. *Biology and Fertility of Soils* 19, 257–262. <https://www.doi.org/10.1007/BF00336169>
- Brzank, M., Piekut, K., Dabrowski, P., Pawluskiewicz, B., 2019. The succession and regression of plant species on Lowland Hay Meadows in Poland. *Polish Journal of Environmental Studies* 28 (3), 1567–1577. <https://www.doi.org/10.15244/pjoes/85302>
- Burlutskiy, V.A., Mazurov, V.N., Osokin, I.E., Peliy, A.F., Semeshkina, P.S. et al., 2019. Development and use of synanthropic phytocenoses with complex invasion in Kaluga Region. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries* 14

- (2), 114–122. <https://www.doi.org/10.22363/2312-797X-2019-14-2-114-122>
- Callaway, R.M., Aschoug, E.T., 2000. Invasive plant versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion. *Science* **290**, 521–523. <https://www.doi.org/10.1126/science.290.5491.521>
- Callaway, R.M., Ridenour, W.M., 2004. Novel weapons: Invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Frontiers in Ecology and the Environment* **2** (8), 436–443. [https://www.doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0436:NWIS AT\]2.0.CO;2](https://www.doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NWIS AT]2.0.CO;2)
- Čerevková, A., Miklisová, D., Renčo, M., Bobuľská, L., 2020. Impact of the invasive plant *Solidago gigantea* on soil nematodes in a semi-natural grassland and a temperate broadleaved mixed forest. *Journal of Helminthology* **94**, e51. <https://www.doi.org/10.1017/S0022149X19000324>
- Chapman, E., Dave, V.G., Murimboh, J.D., 2013. A review of metal (Pb and Zn) sensitive and pH tolerant bioassay organisms for risk screening of metal-contaminated acidic soils. *Environmental Pollution* **179**, 326–342. <https://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.027>
- Chaturvedula, V.S.P., Zhou, B.-N., Gao, Z., Thomas, S.J., Hecht, S.M., Kingston, D.G. I., 2004. New lupane triterpenoids from *Solidago canadensis* that inhibit the lyase activity of DNA polymerase β . *Bioorganic & Medicinal Chemistry* **12** (23), 6271–6275. <https://www.doi.org/10.1016/j.bmc.2004.08.048>
- Chen, G., Zhang, Ch., Ma, L., Qiang, Sh., Silander, J.A., Qi, L.L., 2013. Biotic homogenization caused by the invasion of *Solidago canadensis* in China. *Journal of Integrative Agriculture* **12** (5), 835–845. [https://www.doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60302-0](https://www.doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60302-0)
- Ciesielczuk, T., Poluszyńska, J., Sporek, M., 2014. Potential uses for solid biofuels from non-food crops. *Proceedings of ECOpole* **8** (2), 363–368. [https://www.doi.org/10.2429/proc.2014.8\(2\)044](https://www.doi.org/10.2429/proc.2014.8(2)044)
- Del Fabbro, C., Prati, D., 2015a. Invasive plant species do not create more negative soil conditions for other plants than natives. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* **17**, 87–95. <http://https://www.doi.org/10.1016/j.ppees.2015.02.002>
- Del Fabbro, C., Prati, D., 2015b. The relative importance of immediate allelopathy and allelopathic legacy in invasive plant species. *Basic and Applied Ecology* **16** (1), 28–35. <http://https://www.doi.org/10.1016/j.baae.2014.10.007>
- Deng, Y., Zhao, Y., Padilla-Zakour, O., Yang, G., 2015. Polyphenols, antioxidant and antimicrobial activities of leaf and bark extracts of *Solidago canadensis* L. *Industrial Crops and Products* **74** (15), 803–809. <https://www.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.014>
- Dong, L.-J., He, W.-M., 2019. The relative contributions of climate, soil, diversity and interactions to leaf trait variation and spectrum of invasive *Solidago canadensis*. *BMC Ecology* **19** (1), 24. <https://www.doi.org/10.1186/s12898-019-0240-1>
- Dubovik, D.V., Skuratovich, A.N., Miller, D., Spiridovich, E.V., Gorbunov, Yu.N., Vinogradova, Yu.K., 2019. The invasiveness of *Solidago canadensis* in the Sanctuary “Prilepsky” (Belarus). *Nature Conservation Research* **4** (2), 48–56. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.013>
- Ellstrand, N.C., Shierenbeck, K.A., 2006. Hybridization as a stimulus for the evolution of invasiveness in plants? *Euphytica* **148**, 35–46. <https://www.doi.org/10.1007/s10681-006-5939-3>
- Fenesi, A., Vágási, C.I., Beldean, M., Földesi, R., Kolcsár, L.-P. et al., 2015. *Solidago canadensis* impacts on native plant and pollinator communities in different-aged old fields. *Basic and Applied Ecology* **16**, 335–346. <https://www.doi.org/10.1016/j.baae.2015.03.003>
- Ficko, S.A., Rutter, A., Zeeb, B.A., 2010. Potential for phytoextraction of PCBs from contaminated soils using weeds. *Science of The Total Environment* **408**, 3469–3476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.036>
- Gao, L., Hou, B., Cai, M.L., Zhai, J.J., Li, W.H., Peng, C.L., 2018. General laws of biological invasion based on the sampling of invasive plants in China and the United States. *Global Ecology and Conservation* **16**, e00448. <https://www.doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00448>
- Gomes, D.B., Zanchet, B., Locateli, G., Benvenuto, R.C., Vechia, C.A.D. et al., 2018. Antiproliferative potential of solidagenone isolated of *Solidago chilensis*. *Revista Brasileira de Farmacognosia* **28** (6), 703–709. <https://www.doi.org/10.1016/j.bjp.2018.09.001>

- Groot (de), M., Kleijn, D., Jogan, N., 2007. Species groups occupying different trophic levels respond differently to the invasion of semi-natural vegetation by *Solidago canadensis*. *Biological Conservation* **136** (4), 612–617. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.01.005>
- Gusev, A.P., 2015. The impact of invasive Canadian goldenrod (*Solidago canadensis* L.) on regenerative succession in old fields (the Southeast of Belarus). *Russian Journal of Biological Invasions* **6** (2), 74–77. <https://www.doi.org/10.1134/S2075111715020034>
- Gusev, A.P., 2019. Invasive plant species as inhibitors of restorative successions. *Contemporary Problems of Ecology* **12** (3), 213–219. <https://www.doi.org/10.1134/S1995425519030053>
- Gusev, A.P., 2021. Effect of *Solidago canadensis* on the species diversity of phytocenoses in Belarusian Polesye. *Russian Journal of Ecology* **52**, 340–343. <https://doi.org/10.1134/S1067413621030061>
- Hejda, M., Štajerová, K., Pergl, J., Pyšek, P., 2019. Impacts of dominant plant species on trait composition of communities: comparison between the native and invaded ranges. *Ecosphere* **10** (10), e02880. <https://www.doi.org/10.1002/ecs2.2880>
- Hierro, J.L., Callaway, R.M., 2003. Allelopathy and exotic plant invasion. *Plant and Soil* **256**, 29–39. <https://www.doi.org/10.1023/A:1026208327014>
- Inderjit, S., Wardle, D.A., Karban, R., Callaway, R.M., 2011. The ecosystem and evolutionary contexts of allelopathy. *Trends in Ecology & Evolution* **26**, 655–662. <https://www.doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.003>
- Izydorczyk, G., Sienkiewicz-Cholewa, U., Baśladyńska, S., Kocek, D., Mironiuk, M., Chojnacka, K., 2020. New environmentally friendly bio-based micronutrient fertilizer by biosorption: From laboratory studies to the field. *Science of The Total Environment* **710**, 136061. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136061>
- Jakobs, G., Weber, E., Edwards, P.J., 2004. Introduced plants of the invasive *Solidago gigantea* (Asteraceae) are larger and grow denser than conspecifics in the nativerange. *Diversity and Distribution* **10** (1), 11–19. <https://www.doi.org/10.1111/j.1472-4642.2004.00052.x>
- Jin, L., Gu, Y., Xiao, M., Chen, J., Li, B., 2004. The history of *Solidago canadensis* invasion and the development of its mycorrhizal associations in newly-reclaimed land. *Functional Plant Biology* **31**, 979–986. <https://www.doi.org/10.1071/FP04061>
- Kalemba, D., Thiem, B., 2004. Constituents of the essential oils of four micropropagated *Solidago* species. *Flavour and Fragrance Journal* **19** (1), 40–43. <https://www.doi.org/10.1002/ffj.1271>
- Karpavičienė, B., Radušienė, J., 2016. Morphological and anatomical characterization of *Solidago × niedereideri* and other sympatric *Solidago* species. *Weed Science* **64** (1), 61–70. <https://www.doi.org/10.1614/WS-D-15-00066.1>
- Kasali, A.A., Ekundayo, O., Paul, C., König, W.A., 2002. epi-Cubebanes from *Solidago canadensis*. *Phytochemistry* **59** (8), 805–810. [https://www.doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00006-7](https://www.doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00006-7)
- Korell, L., Auge, H., Schädler, M., Brandl, R., Schreiter, S., 2019. Release from above- and belowground insect herbivory mediates invasion dynamics and impact of an exotic plant. *Plants* **8** (12), 544. <https://www.doi.org/10.3390/plants8120544>
- Kozak, M., Pudelko, R., 2021. Impact assessment of the long-term fallowed land on agricultural soils and the possibility of their return to agriculture. *Agriculture* **11** (2), 148. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020148>
- Kraujalienė, V., Pukalskas, A., Venskutonis, P.R., 2017. Biorefining of goldenrod (*Solidago virgaurea* L.) leaves by supercritical fluid and pressurized liquid extraction and evaluation of antioxidant properties and main phytochemicals in the fractions and plant material. *Journal of Functional Foods* **37**, 200–208. <https://www.doi.org/10.1016/j.jff.2017.07.049>
- Lenda, M., Tryjanowski, P., Skórka, P., Żmihorski, M., Knops, J. et al., 2019. Multispecies invasion reduces the negative impact of single alien plant species on native flora. *Diversity and Distribution* **25** (6), 951–962. <https://www.doi.org/10.1111/ddi.12902>
- Liao, M., Xie, X., Peng, Y., Ma, A., 2011. Changes of soil microbiological characteristics after *Solidago canadensis* L. invasion. *Agricultural Sciences in China* **10** (7), 1064–1071. [https://www.doi.org/10.1016/S1671-2927\(11\)60095-3](https://www.doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60095-3)
- Liu, J., Bai, R., Liu, Y., Zhang, X., Kan, J., Jin, C., 2018. Isolation, structural characterization and bioactivities of naturally occurring polysaccharide–

- polyphenolic conjugates from medicinal plants A review. *International Journal of Biological Macromolecules* **107** (B), 2242–2250. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.097>
- Mallik, A.U., Pellissier, F., 2000. Effects of *Vaccinium myrtillus* on spruce regeneration: testing the notion of coevolutionary significance of allelopathy. *Journal of Chemical Ecology* **26** (9), 2197–2209. <https://www.doi.org/10.1023/A:1005528701927>
- McKone, M.J., Biesboer, D.D., 1986. Nitrogen fixation in association with the root systems of goldenrods (*Solidago* L.). *Soil Biology and Biochemistry* **18** (5), 543–545. [https://www.doi.org/10.1016/0038-0717\(86\)90013-1](https://www.doi.org/10.1016/0038-0717(86)90013-1)
- Moroń, D., Lenda, M., Skórka, P., Szentgyörgyi, H., Settele, J., Woyciechowski, M., 2009. Wild pollinator communities are negatively affected by invasion of alien goldenrods in grassland landscapes. *Biological Conservation* **142** (7), 1322–1332. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.036>
- Myśliwy, M., 2020. Senecionetum fluviatilis in Poland from a european perspective – diversity, distribution and threats. *Plant Biosystems* **154** (6), 814–826. <https://www.doi.org/10.1080/11263504.2019.1701120>
- Pal, R.W., Nagy, D.U., Maron, J.L., Waller, L.P., Callaway, R.M., Tosto, A., Liao, H., 2020. What happens in Europe stays in Europe: apparent evolution by an invader does not help at home. *Ecology* **101** (8), e03072. <https://www.doi.org/10.1002/ecy.3072>
- Perera, P.C.D., Szymura, T.H., Zając, A., Chmolewska, D., Szymura, M., 2021. Drivers of *Solidago* species invasion in Central Europe-Case study in the landscape of the Carpathian Mountains and their foreground. *Ecology and Evolution* **11** (18), 12429–12444. <https://www.doi.org/10.1002/ece3.7989>
- Prati, D., Bossdorf, O., 2004. Allelopathic inhibition of germination by *Alliaria petiolata* (Brassicaceae). *American Journal of Botany* **91** (2), 285–288. <https://www.doi.org/10.3732/ajb.91.2.285>
- Radusiene, J., Marska, M., Ivanauskas, L., Jakstas, V., Karpaviciene, B., 2015. Assessment of phenolic compound accumulation in two widespread goldenrods. *Industrial Crops and Products* **63**, 158–166. <https://www.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.015>
- Reinhart, K.O., Callaway, R.M., 2006. Soil biota and invasive plants. *New Phytologist* **170**, 445–457. <https://www.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01715.x>
- Ren, G., He, M., Li, G., Anandkumar, A., Dai, Z. et al., 2020a. Effects of *Solidago canadensis* invasion and climate warming on soil net n mineralization. *Polish Journal of Environmental Studies* **29** (5), 3285–3294. <https://www.doi.org/10.15244/pjoes/114237>
- Ren, G.-Q., Yang, H.-Y., Li, J., Prabakaran, K., Dai, Z.-C. et al., 2020b. The effect of nitrogen and temperature changes on *Solidago canadensis* phenotypic plasticity and fitness. *Plant Species Biology* **35** (4), 283–299. <https://www.doi.org/10.1111/1442-1984.12280>
- Ren, G.-Q., Li, Q., Li, Y., Li, J., Adomako, O.M. et al., 2019. The enhancement of root biomass increases the competitiveness of an invasive plant against a co-occurring native plant under elevated nitrogen deposition. *Flora* **261**, 151486. <https://www.doi.org/10.1016/j.flora.2019.151486>
- Řezáčová, V., Řezáč, M., Gryndler, M., Hřelová, H., Gryndlerová, H., Michalová, T., 2021. Plant invasion alters community structure and decreases diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Applied Soil Ecology* **167**, 104039. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104039>
- Rice, E.L., 1984. Allelopathy. Academic Press, New York, USA, 422 p.
- Richardson, D.M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M.G., Panetta, F.D., West, C.J., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distribution* **6** (2), 93–107. <https://www.doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>
- Ridenour, W.M., Callaway, R.M., 2001. The relative importance of allelopathy in interference: the effects of an invasive weed on a native bunchgrass. *Oecologia* **126** (3), 444–450. <https://www.doi.org/10.1007/s004420000533>
- Sakaguchi, S., Horie, K., Ishikawa, N., Ito, M., Nishio, S. et al., 2019. Maintenance of soil ecotypes of *Solidago virgaurea* in close parapatry via divergent flowering time and selection against immigrants. *Journal of Ecology* **107** (1), 418–435. <https://www.doi.org/10.1111/1365-2745.13034>

- Saluk-Juszczak, J., Pawlaczyk, I., Olas, B., Kołodziejczyk, J., Ponczek, M. et al., 2010. The effect of polyphenolic-polysaccharide conjugates from selected medicinal plants of Asteraceae family on the peroxy-nitrite-induced changes in blood platelet proteins. *International Journal of Biological Macromolecules* **47** (5), 700–705. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.09.007>
- Scharfy, D., Güsewell, S., Gessner, M.O., Venterink, H.O., 2010. Invasion of *Solidago gigantea* in contrasting experimental plant communities: effects on soil microbes, nutrients and plant-soil feedbacks. *Journal of Ecology* **98** (6), 1379–1388. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01722.x>
- Semple, J.C., Cook, R.E., 2006. *Solidago*. Flora of North America: 20. Asteraceae, Part. 2. Astereae and Senecioneae. Интернет-ресурс. URL: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=200024550 (дата обращения: 28.10.2021).
- Shelepova, O., Galkina, M., Vinogradova, Y., Dubovik, D., Skuratovich, A., Spiridovich, E., 2019. *Solidago canadensis* impacts on tillable land withdrawn from the farming turnover. *IOP conference series. Earth and Environmental Science* **390**, 012013. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/390/1/012013>
- Skrajna, T., Ługowska, M., Pawlonka, Z., 2012. Wybrane cechy morfologiczne i biologia *Solidago canadensis* L. na odłogach środkowej części Niziny Południowopodlaskiej. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu – Rolnictwo* **585**, 79–93. (In Polish).
- Stefanowicz, A.M., Stanek, M., Majewska, M.L., Nobis, M., Zubek, S., 2019. Invasive plant species identity affects soil microbial communities in a mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology* **136**, 168–177. <https://www.doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.01.004>
- Sun, S.-G., Montgomery, B.R., Li, B., 2013. Contrasting effects of plant invasion on pollination of two native species with similar morphologies. *Biological Invasions* **15**, 2165–2177. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0440-0>
- Sun, Z.-K., He, W.-M., 2018. Invasive *Solidago canadensis* versus its new and old neighbors: Their competitive tolerance depends on soil microbial guilds. *Flora* **248**, 43–47. <https://www.doi.org/10.1016/j.flora.2018.08.015>
- Šutovská, M., Capek, P., Kocmálová, M., Fraňová, S., Pawlaczyk, I., Gancarz, R., 2013. Characterization and biological activity of *Solidago canadensis* complex. *International Journal of Biological Macromolecules* **52**, 192–197. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.09.021>
- Tang, J., Zhang, S., Zhang, X., Chen, J., He, X., Zhang, Q., 2020. Effects of pyrolysis temperature on soil-plant-microbe responses to *Solidago canadensis* L.-derived biochar in coastal saline-alkali soil. *The Science of the Total Environment* **731**, 138938. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138938>
- Teixeira, L.H., Yannelli, F.A., Ganade, G., Kollmann, J., 2020. Functional diversity and invasive species influence soil fertility in experimental grasslands. *Plants* **9** (1), 53. <https://doi.org/10.3390/plants9010053>
- Tokarska-Guzik, B., Węgrzynek, B., Urbisz, A., Urbisz, A., Nowak, T., Bzdęga, K., 2010. Alien vascular plants in the Silesian Upland of Poland: distribution, patterns, impacts and threats. *Biodiversity Research and Conservation* **19**, 33–54. <https://www.doi.org/10.2478/v10119-010-0019-x>
- Ustinova, E.N., Lysenkov, S.N., 2020. Comparative study of the insect community visiting flowers of invasive goldenrods (*Solidago canadensis* and *S. gigantea*). *Arthropod-Plant Interactions* **14**, 825–837. <https://doi.org/10.1007/s11829-020-09780-7>
- Ustinova, E.N., Schepetov, D.M., Lysenkov, S.N., Tiunov, A.V., 2021. Soil arthropod communities are not affected by invasive *Solidago gigantea* Aiton (Asteraceae), based on morphology and metabarcoding analyses. *Soil Biology and Biochemistry* **159**, 108288. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108288>
- Vilà, M., Espinar, J.L., Hejda, M., Hulme, P.E., Jarošík, V., Maron, J.L., Pyšek, P., 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters* **14**, 702–708. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x>
- Vinogradova, Y.K., Aistova, E.V., Antonova, L.A., Chernyagina, O.A., Chubar, E.A. et al., 2020. Invasive plants in flora of the Russian Far East: the checklist and comments. *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation* **9** (1), 103–129. <https://www.doi.org/10.17581/bp.2020.09107>

- Wan, J., Oduor, A.M.O., Pouteau, R., Wang, B., Chen, L. et al., 2020. Can polyploidy confer invasive plants with a wider climatic tolerance? A test using *Solidago canadensis*. *Ecology and Evolution* **10** (12), 5617–5630. <https://www.doi.org/10.1002/ece3.6303>
- Wan, L.-Y., Qi, S.-S., Zou, C.B., Dai, Z.-C., Zhu, B., Song, Y.-G., Du, D.-L., 2018. Phosphorus addition reduces the competitive ability of the invasive weed *Solidago canadensis* under high nitrogen conditions. *Flora* **240**, 68–75. <https://www.doi.org/10.1016/j.flora.2017.12.012>
- Wang, C., Jiang, K., Zhou, J., Wu, B., 2018. *Solidago canadensis* invasion affects soil N-fixing bacterial communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Science of The Total Environment* **631–632** (1), 702–713. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.061>
- Wang, C., Wu, B., Jiang, K., Zhou, J., Du, D., 2019a. Canada goldenrod invasion affect taxonomic and functional diversity of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Urban Forestry & Urban Greening* **38**, 145–156. <https://www.doi.org/10.1016/j.ufug.2018.12.006>
- Wang, C., Wu, B., Jiang, K., Zhou, J., Liu, J., Lv, Y., 2019b. Canadagoldenrodinvasioncausesignificant shifts in the taxonomic diversity and community stability of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Ecological Engineering* **127**, 504–509. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.002>
- Weber, E., 1997. Phenotypic variation of the introduced peren-nial *Solidago gigantea* in Europe. *Nordic Journal of Botany* **17** (6), 631–638. <https://www.doi.org/10.1111/j.1756-1051.1997.tb00359.x>
- Weber, E., Jakobs, G., 2005. Biological flora of central Europe: *Solidago gigantea* Aiton. *Flora* **200** (2), 109–118. <https://www.doi.org/10.1016/j.flora.2004.09.001>
- Weber, E., Schmid, B., 1998. Latitudinal population differentiation in two species of *Solidago* (Asteraceae) introduced into Europe. *American Journal of Botany* **85** (9), 1110–1121.
- Werner, P.A., Bradbury, I.K., Gross, R.S., 1980. The biology of Canadian weeds. 45. *Solidago canadensis* L. *Canadian Journal of Plant Science* **60**, 1393–1409.
- Wolfe, B.E., Klironomos, J.N., 2005. Breaking new ground: soil communities and exotic plant invasion. *BioScience* **55**, 477–487. <https://doi.org/10.1641/0006-3568>
- World Flora Online, 2021. Интернет-ресурс. URL: <http://www.worldfloraonline.org> (дата обращения: 25.10.2021).
- Wu, S., Xu, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Li, H., Cheng, J., Qiang, S., 2019. Polyploidy in invasive *Solidago canadensis* increased plant nitrogen uptake, and abundance and activity of microbes and nematodes in soil. *Soil Biology and Biochemistry* **138**, 107594. <https://www.doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107594>
- Yang, R., Zhou, G., Zan, Sh., Guo, F., Su, N., Li, J., 2014. Arbuscular mycorrhizal fungi facilitate the invasion of *Solidago canadensis* L. in southeastern China. *Acta Oecologica* **61**, 71–77. <https://www.doi.org/10.1016/j.actao.2014.10.008>
- Ye, X.-Q., Yan, Y.-N., Wu, M., Yu, F.-H., 2019. High capacity of nutrient accumulation by invasive *Solidago canadensis* in a coastal grassland. *Frontiers in Plant Science* **10**, 575. <https://www.doi.org/10.3389/fpls.2019.00575>
- Zelnik, I., Klenovšek, V.M., Gaberščik, A., 2020. Complex undisturbed riparian zones are resistant to colonisation by invasive alien plant species. *Water* **12** (2), 345. <https://www.doi.org/10.3390/w12020345>
- Zhang, C.B., Wang, J., Qian, B.Y., Li, W.H. 2009a. Effects of the invader *Solidago canadensis* on soil properties. *Applied Soil Ecology* **43**, 163–169. <https://www.doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.07.001>
- Zhang, Sh., Jin, Y., Tang, J., Chen, X., 2009b. The invasive plant *Solidago canadensis* L. suppresses local soil pathogens through allelopathy. *Applied Soil Ecology* **41** (2), 215–222. <https://www.doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.11.002>
- Zhang, J., Bi, F., Wang, Q., Wang, W., Liu, B. et al., 2018. Characteristics and influencing factors of cadmium biosorption by the stem powder of the invasive plant species *Solidago canadensis*. *Ecological Engineering* **121** (1), 12–18. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.10.001>
- Zhang, K.-M., Shen, Y., Yang, J., Miu, X., Bhowmik, P.C. et al., 2019a. The defense system for *Bidens pilosa* root exudate treatments in *Pteris multifida* gametophyte. *Ecotoxicology and*

- Environmental Safety* **173**, 203–213. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.097>
- Zhang, P., Li, B., Wu, J., Hu, S., 2019b. Invasive plants differentially affect soil biota through litter and rhizosphere pathways: a meta-analysis. *Ecology Letters* **22**, 200–210. <https://doi.org/10.1111/ele.13181>
- Zhang, Sh., Zhu, W., Wang, B., Tang, J., Chen, X., 2011. Secondary metabolites from the invasive *Solidago canadensis* L. accumulation in soil and contribution to inhibition of soil pathogen *Pythium ultimum*. *Applied Soil Ecology* **48** (3), 280–286. <https://www.doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.011>
- Zhou, X., Peng, P., Li, J., 2019. Simulated climate warming and nitrogen deposition influence leaf traits and leaf trait spectrum in *Solidago canadensis* from China and North America. *Shengtai Xuebao* **39** (5), 1605–1615. <https://www.doi.org/10.5846/stxb201805111040>
- Zihare, L., Soloha R., Blumberga, D., 2018. The potential use of invasive plant species as solid biofuel by using binders. *Agronomy Research* **16** (3), 923–935. <https://doi.org/10.15159/AR.18.102>
- Zubek, S., Majewska, M.L., Rożek, K., Karpowicz, F., Zalewska-Gałosz, J. et al., 2020. *Solidago canadensis* invasion in abandoned arable fields induces minor changes in soil properties and does not affect the performance of subsequent crops. *Land Degradation and Development* **31** (3), 334–345. <https://www.doi.org/10.1002/ldr.3452>

Review

Study issues of invasive species of the genus *Solidago*

Yulia V. Zagurskaya 

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Leningradskii prospekt 10, Kemerovo, 650065 Russia

syjl@mail.ru

Abstract. The impact of invasive species on the ecosystems belongs to the most important environmental problems. Representatives of the genus *Solidago* actively invade various plant communities. About 2300 literary sources were analyzed in order to determine the main tasks for the researchers of invasive species of this genus and to highlight the most relevant issues. Ambiguous evidence of the inhibitory effect of goldenrod on native flora species has been observed. Some studies report on the invasion of species of the genus *Solidago* and the displacement of species of local flora in various natural and climatic conditions. Opposite opinion states that the main changes relate not to taxonomic, but to the functional diversity. The allelopathic effect may be influenced both by edaphic factors and by the stage of plant development, as well as by the flora diversity in different regions and by the mutual influence of these factors. Most likely, essential oil components (terpenes and terpenoids) have an inhibitory effect on competing plants and soil microorganisms.

Keywords: *Solidago canadensis*, *Solidago gigantea*, plant invaders, soil biota, competitive interactions of organisms, allelopathy.