

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИНВАЗИИ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ — ГЛОБАЛЬНЫЙ ВЫЗОВ ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ

© 2023 г. Ю. Ю. Дгебуадзе^{a,b,*}

^aИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: yudgeb@gmail.com, yudgeb@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2023 г.

После доработки 26.07.2023 г.

Принята к публикации 30.07.2023 г.

Биологические инвазии чужеродных видов — освоение живыми организмами территорий и акваторий за пределами их исторического ареала — приобрели в настоящее время гигантский размах, затронув все страны и континенты. Наблюдаемые в последнее время тенденции развития инвазионного процесса свидетельствуют о существенной его интенсификации. В предлагаемом обзоре приводятся сведения о масштабах биологических инвазий на Земле, истории, современном состоянии и основных направлениях научных исследований в этой области. В частности, рассмотрены факторы, определяющие возможность вселения чужеродного вида; этапы инвазионного процесса; экологические, генетические и эволюционные последствия инвазий для природных экосистем; воздействие видов-вселенцев на безопасность и здоровье людей и социальную сферу и экономику; подходы к прогнозированию и управлению инвазионным процессом.

Ключевые слова: инвазия, чужеродный вид, инвазионный вид, натурализация, интродукция.

DOI: 10.31857/S0869587323090050, **EDN:** XMYMQO

В условиях глобальных вызовов, которые стоят перед человечеством в последние десятилетия (климатические изменения, загрязнение окружающей среды и переэксплуатация возобновляемых природных ресурсов) особое место занимает проблема биологических инвазий чужеродных видов. Исследования этой проблемы во многих своих аспектах связаны с созданием научных основ стратегии обеспечения биологической безопасности многих стран мира, включая Российскую Федерацию.

Под термином *биологическая инвазия* обычно понимают создание каким-либо видом живых ор-

ганизмов самовоспроизводящейся (устойчивой) популяции за пределами его естественного (исторического) ареала. Такие расширения территорий и акваторий, в которых обитают виды живых организмов, могут происходить в результате естественного саморасселения, связанного с климатическими изменениями, флуктуациями численности и ресурсов, а также преднамеренной и случайной интродукции или реинтродукции человеком ценных в хозяйственном отношении (“полезных”) организмов (растений и животных).

Следует отметить, что инвазии чужеродных видов происходили всегда, с начала появления жизни на нашей планете. Исследователи хронологически выделяют *палеоинвазии* как отдельный тип. Палеоинвазии были связаны с глобальными геологическими и климатическими изменениями Земли в далёком прошлом: с соединениями и разъединениями континентов, преобразованиями водных бассейнов и т.п. В связи с многовековой изменчивостью Земли и соответственно мест обитания живых организмов специалисты, изучающие инвазии, столкнулись с такой проблемой, как установление времени, с которого следует считать наблюдаемый ареал вида (террито-



ДГЕБУАДЗЕ Юрий Юлианович — академик РАН, заведующий лабораторией ИПЭЭ РАН, заведующий кафедрой общей экологии и гидробиологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

рия или акватория, на которой он обитает) историческим или приобретённым.

В настоящее время на этот счёт преобладают три точки зрения: считать чужеродным (видом-вселенцем) вид, проникший за пределы своего исторического ареала после неолита (с начала нашей эры — 9.5 тыс. лет назад); после 1492 г. (год открытия Америки, который принят за начало эпохи великих географических открытий); с 1800 г. Все три точки зрения имеют под собой весомые основания. В начале нашей эры человек перешёл от собирательства к растениеводству и скотоводству и в связи с этим, как полагают, способствовал распространению живых организмов. Великие географические открытия, когда путешественники перевозили живые организмы с континента на континент, также стали причиной интенсификации инвазионного процесса. А к началу XIX столетия (после 1758 г.) среди учёных-биологов утвердилось предложенная Карлом Линнеем система каталогизации биоразнообразия — бинарная номенклатура, согласно которой каждый вид имеет название, состоящее из двух латинских слов. Именно с этого времени стало возможным составлять научные списки видов живых организмов, обитающих в том или ином регионе.

Инвазии чужеродных видов, которые происходят после обозначенных дат, обычно именуют четвертичными. Особенно интенсивно инвазионный процесс стал наблюдаться на Земле во второй половине XX в., когда практически все страны мира столкнулись с его последствиями. Именно тогда стала развиваться и терминология, связанная с вселениями организмов. В частности, появилось понятие *инвазионного вида* — чужеродного вида, который натурализовался (создал самовоспроизводящуюся популяцию) в новопривнесённом ареале и *нанёс существенный ущерб аборигенным видам и экосистемам*.

Озабоченность мирового сообщества проблемами инвазий чужеродных видов отразилась в Конвенции о биологическом разнообразии (1992), которая, признавая “непреодолимую ценность биологического разнообразия”, декларировала: “Каждая договаривающаяся сторона, насколько это возможно и целесообразно, предотвращает интродукцию чужеродных видов, которые угрожают экосистемам, местам обитания или видам, контролирует или уничтожает такие чужеродные виды” (ст. 8, раздел h).

МАСШТАБЫ ИНВАЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Анализ периодических изданий АН СССР и РАН, проведённый в конце 1990-х годов, показал, что на территории РФ обнаружено более 500 видов чужеродных видов животных. Безусловно,

Таблица 1. Живые организмы, которые к началу XXI в. вселились на территорию Европы [4]

Организмы	Число вселившихся чужеродных видов
Грибы	84
Мхи и лишайники	58
Сосудистые растения	3749
Наземные беспозвоночные животные	1522 (из них насекомые — 1306)
Пресноводные беспозвоночные животные	357
Рыбы	75
Амфибии	35
Рептилии	72
Птицы	193
Млекопитающие	88

но, реальное число вселенцев уже тогда было гораздо больше, если принять во внимание общее снижение в конце прошлого века интенсивности полевых исследований, которые позволяют получать материал о состоянии биоразнообразия, включая данные о наличии видов-вселенцев.

В России в настоящее время наблюдается несколько горячих точек инвазионного процесса. Для наземных экосистем это прежде всего европейская часть страны и отчасти Приморский край. В водных экосистемах больше всего вселенцев отмечено в Чёрном, Азовском, Каспийском, Балтийском и дальневосточных морях, а также в бассейнах крупных рек — Волги, Оби и Енисея. С начала XXI в. в европейской части России встречаются следующие вселенцы: 1150 видов растений (причём все они ранее обитали за границами региона, а не расширяли свой ареал в его пределах); 192 вида растительоядных насекомых (абсолютное большинство из которых — вредители сельского, лесного и паркового хозяйств); 59 видов рыб; 62 вида млекопитающих. К этому же времени в бассейн Чёрного моря вселилось и натурализовалось 156 чужеродных видов [1]; в дальневосточных морях РФ обнаружено 63 вида-вселенца [2]. Из пресноводных бассейнов лидирует Волга: только чужеродных рыб в её бассейне отмечено 36 видов (32.1% ихтиофауны) [3]. Схожую картину крупных масштабов инвазий демонстрируют и данные, полученные и за пределами нашей страны, в частности, в Европе (табл. 1).

Не следует забывать, что проблема инвазий чужеродных видов включает и расселение резервуаров, переносчиков и возбудителей болезней чело-

Таблица 2. Прогнозируемый рост относительного и абсолютного числа чужеродных видов с 2005 по 2050 г. [6]

Континент	Относительное увеличение 2005–2050 гг., %	Абсолютное увеличение 2005–2050 гг.
Африка	39 (14.51)	767 ± 133
Азия умеренного пояса	50 (0.117)	1597 ± 197
Тропическая Азия	30 (10.67)	360 ± 78
Австралия	16 (5.28)	1286 ± 44
Европа	64 (13.100)	2543 ± 237
Северная Америка	23 (6.42)	1484 ± 74
Тихоокеанские острова	21 (0.56)	132 ± 29
Южная Америка	49 (16.99)	1391 ± 258
В среднем	36 (0.117)	1195 ± 131

Примечание: Относительное увеличение представляет собой среднее относительное увеличение и диапазон увеличения по таксономическим группам; абсолютное увеличение – это суммы появляющихся чужеродных видов и стандартные отклонения по таксономическим группам. Абсолютный рост рассчитывался только с учётом таксономических групп, которые были доступны для большинства континентов (сосудистые растения, рыбы, птицы и членистоногие).

века, животных и растений. В частности, человечество пережило три крупные пандемии чумы, в результате одной из которых (1346–1353), по разным оценкам, в Европе погибло от 75 до 200 млн человек, что составляло 45–50% всего населения этой части света. Распространение возбудителя чумы *Yersinia pestis* в значительной степени обусловлено ареалами носителей этого микроба, а это более чем 233 вида млекопитающих и 180 видов и подвидов его переносчиков – блох [5].

Особенность современной ситуации – *интенсификация инвазионного процесса*. С каждым годом на всех континентах наблюдается рост числа видов-вселенцев. На основе имеющихся тенденций методами математического моделирования удаётся показать, сколь масштабно инвазионный процесс может развиваться в будущем (табл. 2).

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИНВАЗИЙ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ

Считается, что научные исследования биологических инвазий чужеродных видов в современном понимании этого явления начались после выхода в 1958 г. книги выдающегося британского эколога Чарльза Элтона, который показал масштабность этого явления и обобщил большой объём данных о видах-вселенцах и их влиянии на аборигенные виды и экосистемы [7]. Фактически в это время появилось новое направление науки – *инвазионная биология*. Важно, что по инициативе профессора биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Н.П. Наумова книга Ч. Эл-

тона довольно быстро была переведена и издана в СССР [8].

Очевидно, что инвазионная биология появилась не на пустом месте. Многие положения, которые теперь вошли в это направление, давно развивались эпидемиологами, паразитологами, физиологами, биогеографами, ботаниками, зоологами, экологами, генетиками и эволюционистами. Особо следует отметить научные исследования, связанные с популярной (прежде всего в XX в.) деятельностью по преднамеренной интродукции живых организмов за пределами их естественных ареалов. Первоначально работы велись в направлении поиска полезных для человека живых организмов, которых можно было бы привезти из отдалённых регионов и натурализовать в новых местах. При этом изучались как виды, которые, как считалось, могли бы повысить продуктивность аборигенных экосистем и увеличить ассортимент ресурсов, используемых человеком, так и виды, способные помочь людям бороться с вредителями сельского хозяйства. Не обсуждая целесообразность подобных мероприятий, можно с уверенностью сказать, что полученные в рамках подготовки и проведения интродукций научные результаты много дали для понимания хода инвазионного процесса, в особенности для оценки возможностей вселенцев адаптироваться к новым абиотическим факторам среды. Кроме того, в результате этих исследований была предложена схема инвазионного процесса, подробно описаны этапы и определены сроки натурализации чужеродных видов после их преднамеренной интродукции. Следующим этапом исследований стал анализ результатов многолетних исследова-

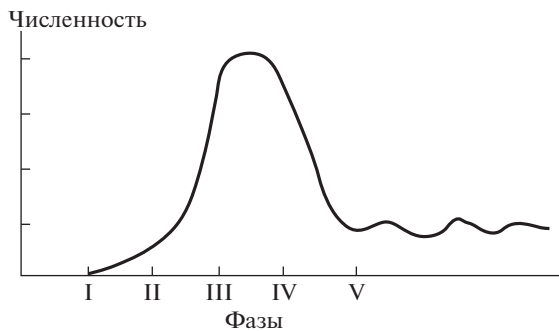


Рис. 1. Основные этапы (фазы) инвазионного процесса: I — выживание первых рекрутов; II — создание самовоспроизводящейся популяции; III — взрыв численности; IV — падение численности; V — стабилизация численности (по [9] с изменениями)

ний по интродукции и создание сводок по ряду видов-вселенцев. Так, в нашей стране были опубликованы монографии по колорадскому жуку, дрейссене, ондатре, пеляди, овцебыку и ряду других видов-вселенцев СССР и России. В некоторых работах были предприняты попытки оценить воздействие видов-вселенцев на экосистемы-реципиенты.

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О БИОЛОГИЧЕСКИХ ИНВАЗИЯХ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ

Основные факторы, определяющие возможность вселения чужеродного вида. В настоящее время в инвазионной биологии сложился основной понятийный аппарат, отражающий в том числе и направления исследований в этой области. Прежде всего представляется важным установить основные факторы, определяющие возможность вселения чужеродного вида в ту или иную экосистему. Анализ успешных инвазий показал, что к таким факторам относятся:

- наличие транзитных путей инвазий (инвазионные коридоры) — путей, по которым постоянно перемещаются живые организмы из региона-донора в регион-реципиент;
- наличие векторов (способов) распространения, которые бывают *естественными* (самораспространение, например, миграции животных; гидрохория, то есть благодаря водным течениям морей и пресноводных водотоков; аэрохория, то есть распространение с воздушными потоками) и *антропогенными* (преднамеренная или случайная интродукция — антропохория — с наземными транспортными средствами и судами (обрастания, балластные воды), “хулиганская интродукция”, например, выпуск аквариумных гидробионтов, экзотических питомцев, видов, используемых в пищу человеком, наживок для ловли рыб и проч.);

- адаптивные возможности вида-вселенца — широта нормы реакции на факторы среды;
- генетическое разнообразие вида-вселенца (например, успешность инвазии может быть выше, если в новый ареал попадает смесь вселенцев из разных аллопатрических донорских популяций вида);
- величина пресса рекрутов (*propagule pressure*) — определяемая количеством (числом вселившихся особей) и частотой проникновения чужеродного вида в новую для него экосистему;
- наличие симбионтов (ряд видов нуждается в организмах-симбионтах, которые обеспечивают им необходимые для существования жизненные функции, например, биогенные элементы, азот и фосфор);
- уязвимость аборигенных экосистем: исследования показали, что наиболее подвержены инвазиям экосистемы, нарушенные природным или антропогенным воздействием вследствие изменений климата, землетрясений, наводнений, пожаров, загрязнений (включая тепловое), изменений баланса биогенных элементов (эвтрофирование), переэксплуатации биологических ресурсов, а также нарушенные при создании новых антропогенных экосистем — агроценозов, урбоценозов, каналов, водохранилищ.

Перечисленные факторы определяют успешность и ход инвазионного процесса, причём их роль может меняться в каждом конкретном случае — в зависимости от определённой экосистемы и того или иного вида-вселенца. Выявление факторов, определяющих возможность вселения чужеродного вида, не только диктует направления научных исследований инвазионного процесса, но и является основой для оценки риска, предотвращения и контроля инвазий.

Основные этапы инвазионного процесса. Как уже отмечалось выше, ещё в период увлечения преднамеренной интродукцией “полезных” для человека живых организмов в прошлом веке была предложена общая схема хода инвазионного процесса, основанная на наблюдениях за популяциями видов-вселенцев (рис. 1).

Особенно важным для успеха инвазии является период между фазами I и II, продолжительность которого часто именуют лаг-фазой (задержкой) инвазионного процесса. Безусловно, продолжительность лаг-фазы зависит от упомянутых выше факторов, обуславливающих возможность инвазии, и часто бывает весьма протяжённой. Например, в приведённом в книге Ч. Элтона [7, 8] случае инвазии морской миноги *Petromyzon marinus* (саморасселение после постройки Уэллэндского канала) в Великие озёра Северной Америки лаг-фаза длилась более 20 лет, а при преднамеренной интродукция камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в Баренцево море в

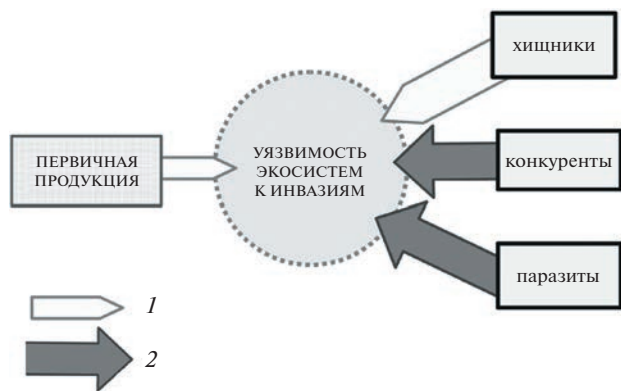


Рис. 2. Схема биологического регулирования уязвимости экосистем к инвазиям: 1 – фактор, повышающий уязвимость экосистем, 2 – фактор, понижающий уязвимость экосистем [10]

прошлом веке – 30 лет. Исследования популяций видов-вселенцев на первых этапах инвазии, когда ещё не произошла натурализация, особенно важны для прогнозирования и предотвращения нежелательных вселений.

Изменения климата как стимулятор биологических инвазий чужеродных видов. В настоящее время можно считать доказанными происходящие на Земле глобальные климатические изменения, связанные не только с потеплением, но и с неустойчивостью режимов температуры и влажности. Безусловно, климатические условия влияют на все факторы, определяющие возможность вселения чужеродного вида. Имеющиеся данные позволяют предложить упрощённую схему уязвимости экосистем к инвазиям чужеродных видов в период “стабильного климата” (рис. 2). Повышение продукции и усиление пресса хищников делает экосистему более уязвимой, а аборигенные конкуренты и паразиты препятствуют проникновению вселенцев.

Потепление климата стимулирует процесс биологической инвазии, поскольку вселенцы с юга оказываются лучше приспособлены к новым условиям, чем аборигенные виды. При потеплении экосистемы становятся более уязвимыми из-за роста первичной продукции и вследствие этого появления дополнительного пищевого ресурса и из-за снижения роли аборигенных видов, так как многие из них испытывают дискомфорт. Виды-вселенцы из более тёплых климатических зон получают конкурентное преимущество (рис. 3).

В качестве примера влияния изменения климата на инвазионный процесс можно привести ситуацию с вселенцами-гидробионтами после образования северного водного инвазионного коридора в бассейне Волги и других рек во второй половине XX в. В первые годы после гидростроительства в европейской части СССР (каналы,

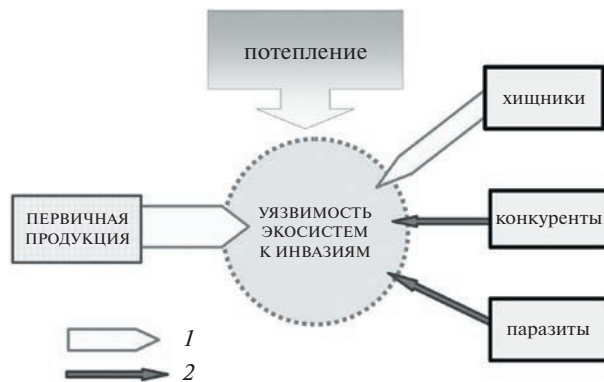


Рис. 3. Схема биологического регулирования уязвимости экосистем к инвазиям при потеплении климата: 1 – фактор, повышающий уязвимость экосистем, 2 – фактор, понижающий уязвимость экосистем [10]

связывающие бассейны разных рек, формирование водохранилищ) в 1940–1970-е годы в бассейне Волги во всех группах гидробионтов (водные растения, зоопланктон, бентос, рыбы) преобладали виды, вселившиеся из северных водоёмов, а позднее, когда началось глобальное потепление (1980–2000), большая часть вселенцев была представлена южными видами [4, 11]. Расширение ареалов южных видов на север наблюдается и для многих наземных видов. Одним из примеров инвазии, в значительной степени стимулируемой глобальным потеплением, является расширение ареала кабана *Sus scrofa* (рис. 4).

Влияние биологических инвазий на аборигенные виды и экосистемы. В настоящее время накоплен большой материал относительно влияния видов-вселенцев на местную флору и фауну и их инвазионного ареала. Появление чужеродных видов за-

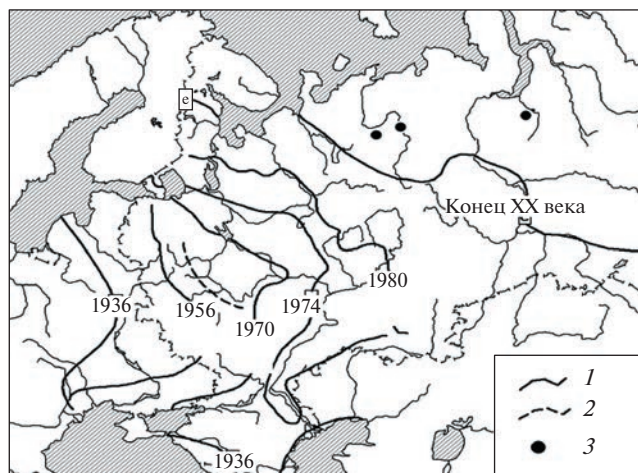


Рис. 4. Продвижение на северо-восток ареала кабана *Sus scrofa*: 1–2 – границы ареала, 3 – единичные находки [11]

частую приводит к изменению биоразнообразия, структуры и функций экосистем. Перечислю основные формы воздействия:

- виды-вселенцы могут существенно изменять местообитания аборигенных видов (особенно когда новые живые организмы являются видами-эдификаторами — ключевыми видами экосистемы);
- виды-вселенцы могут становиться конкурентами аборигенных видов, снижать их численность до полного вытеснения;
- виды-вселенцы могут стать хищниками по отношению к аборигенной фауне и также вытеснять её;
- виды-вселенцы могут переносить или вызывать болезни, а также быть паразитами аборигенных видов.

Примером инвазии ключевого вида является вселение гребневика *Mnemiopsis leidyi* в Чёрное море. Это небольшое (10—12 см) желтелое беспозвоночное животное в начале 1980-х годов проникло (предположительно с балластными водами) в Азово-Черноморский бассейн. Его родина — североамериканский континент. Довольно быстро, к концу 1980-х годов, мнемииопсис достиг гигантской численности. Биомасса его в пробах составляла до 12—13 кг на 1 м³ воды. Мнемииопсис потребляет беспозвоночных планктонов и ихтиопланктон. После его вселения наблюдалось уменьшение прозрачности воды (в прибрежье до 4—6 м, в открытых участках до 6—10 м) из-за слизи, выделяемой гребневиком как при жизни, так и при отмирании; в местах концентрации мнемииопсиса снижается содержание кислорода, кремнекислоты, рН и повышается содержание минерального фосфора, аммония, нитратов и нитритов, уменьшается соотношение Si:N и Si:P, что ведёт к эвтрофированию. Гребневик повлиял практически на все компоненты пищевой сети — от первичных продуцентов, бактериальной петли до рыб и дельфинов [12].

Другими ключевыми видами, которые часто выступают в роли чужеродных, являются речной (обыкновенный) (*Castor fiber*) и канадский (*C. canadensis*) бобры. Их строительная деятельность (норы, плотины, пруды и каналы на малых реках) и потребление древесной околотовной растительности существенно меняют местообитания и приводят к серьёзным трансформациям пищевых сетей и колебаниям скоростей сукцессий в водных и околотовных экосистемах [13—16].

Генетические и эволюционные аспекты инвазий чужеродных видов. Поскольку в новый регион попадает только небольшая часть популяции вида-вселенца, при инвазии наблюдаются изменения её генетической структуры. Обычно изменяются такие параметры, как частота редких аллелей, количество гаплотипов, доля полиморфных локу-

сов, средняя гетерозиготность. Всё это сказывается на ходе инвазионного процесса, а при определённых условиях может приводить к формообразованию. Часто при попадании в регион-реципиент, в случае различий в условиях обитания, вид-вселенец претерпевает преадаптацию, при которой происходит отбор наследуемых признаков. Случаи преадаптации описаны, в частности, для видов гидробионтов, которые при инвазии проникают в водоёмы с другими условиями температуры и солёности. Например, у черноморско-каспийской тюльки *Clupeonella cultriventris* при её инвазии из Азово-Черноморского бассейна в водохранилища Волги постепенно менялась частота аллелей мышечной лактатдегидрогеназы. Доля свойственной для морских популяций аллели, отвечающей за высокую теплоустойчивость и способность переносить более высокие концентрации неорганических ионов и мочевины, в пресноводных популяциях (инвазионный ареал) существенно снижается. Меняется и ферментативная активность отдельных локусов [17]. Схожее явление наблюдалось при инвазии в бассейн Волги двустворчатого моллюска дрейссены *Dreissena polymorpha* [18].

Важное генетическое и эволюционное последствие инвазий чужеродных видов — гибридизация видов-вселенцев с аборигенными видами. При этом происходит не только стимуляция инвазионного процесса, но и образование новых форм организмов, создаются новые генотипы, и высокая генетическая изменчивость позволяет гибридам выживать при широком диапазоне условий. Ярким примером роли гибридизации в инвазиях является случай с двумя видами бесхвостых амфибий Северной Америки — равнинного лопатонога *Spea bombifrons* (северный вид) и мексиканского лопатонога *S. multiplicata* (южный вид). При инвазии равнинного лопатонога на юг расширение ареала в направлении непривычных местообитаний привело к высокой генетической дифференциации, низкому конспецифическому потоку генов¹ и эффекту бутылочного горлышка (сокращение генетического разнообразия). Гибридизация же с аборигенным видом *S. multiplicata* привнесла генетическое разнообразие и способствовала освоению новых для вселенца местообитаний [19].

Воздействие видов-вселенцев на безопасность и здоровье людей. Многочисленные исследования в разных регионах мира показали, что основные угрозы жизни и здоровью людей в связи с инвазиями сводятся к следующему:

- виды-вселенцы вызывают заболевания людей, являясь патогенами или паразитами, резервуарами или переносчиками патогенов;

¹ То есть генов, свойственных только для вида-вселенца.

- могут возникать раны от укусов и ожогов;
- некоторые вселенцы выделяют аллергены и токсические вещества;
- новые виды могут способствовать травмам, психическим заболеваниям и даже смерти людей через другие механизмы;
- в некоторых регионах появление вселенцев приводит к голоду из-за потерь в урожае, болезней и гибели скота, сокращения водных, лесных и охотничьих ресурсов.

За последние 100 лет появилось около 20 новых опасных и чрезвычайно опасных вирусных инфекций человека и животных, распространение которых по планете фактически является частью инвазионного процесса. Значительное число таких заболеваний имеет своим источником Африканский континент. Речь идёт о СПИДе, лихорадке западного Нила, африканской чуме свиней, лихорадке Зика, лихорадке Ласса, геморрагической лихорадке Эбола. Из Азии, кроме чумы и холеры в прошлом, по всему миру распространились птичий грипп и COVID-19. В подавляющем большинстве случаев резервуарами и переносчиками этих болезней являются животные. Совершенно очевидно, что борьба с такими заболеваниями должна вестись с применением подходов инвазионной биологии и начинаться с анализа ведущих факторов и хода инвазионного процесса.

Воздействие чужеродных видов на социальную сферу и экономику. По всему миру инвазии чужеродных видов наносят ущерб человечеству. Они оказывают негативное влияние на:

- природные биологические ресурсы (рыбное, лесное и охотничье хозяйство);
- сельское хозяйство (растениеводство, животноводство);
- рекреацию и туризм;
- энергетику (повреждение сооружений);
- водное и коммунальное хозяйство;
- здравоохранение;
- охрану природы (биоразнообразие, редкие и исчезающие виды и экосистемы);
- контроль чужеродных видов;
- занятость населения;
- доходы и потребление пищи населением.

Биологические инвазии чужеродных видов влекут за собой существенное изменение природного биоразнообразия, а также большие экономические потери для общества и денежные затраты, связанные с управлением инвазиями. База данных InvaCost позволила подсчитать денежные издержки из-за биологических инвазий по всему миру: общая сумма ущерба от инвазий чужеродных видов за 1970–2017 гг. достигла минимум 1.288 трлн долл. США при среднегодовых затра-

тах в размере 26.8 млрд долл., а максимальные среднегодовые расходы могут достичь 162.7 млрд долл. [20]. Величина ущерба от биологических инвазий для России, оценённая по той же базе данных, в 2007–2019 гг. составила как минимум 51.52 млрд долл. (1.38 трлн руб.) [21]. Следует учитывать, что по многим регионам мира нет достоверных количественных оценок ущерба, наносимого видами-вселенцами.

Прогнозирование и управление инвазионным процессом. Для прогнозирования инвазионного процесса особое значение имеет анализ рисков, то есть установление вероятности инвазий и их характеристик, оценка величины риска, разработка мер его смягчения. Важный итог этой работы — обеспечение прогнозной информацией лиц, принимающих решения. Основой для анализа риска является подробное рассмотрение всех перечисленных выше факторов, определяющих вероятность вселения чужеродного вида. Например, при оценке адаптивных возможностей вида-вселенца важно знать особенности биологии успешных вселенцев: размеры и особенности морфологии организмов, наличие покоящихся стадий, широту нормы реакции на абиотические факторы среды, особенности воспроизводства, для животных — их способность совершать дальние миграции. При прогнозировании инвазий для региона-донора необходимо располагать информацией о наличии факторов, способствующих саморасселению живых организмов: созданных людьми инвазионных коридорах и новых местобитаниях (дороги, каналы, тоннели, водохранилища, урбанизированные ландшафты), а также об источниках саморасселения (объекты агро- и аквакультуры, ботанические сады, парки).

В последнее время в прогнозировании инвазий большое развитие получили методы математического моделирования. Особенно перспективным представляется прогнозирование на основе анализа современных и древних ареалов с учётом прошлых и будущих климатических изменений [22]. Особое значение в установлении рисков инвазий и их прогноза имеют информационные системы — составление перечней успешных вселенцев и соответствующих баз данных.

Управление инвазионным процессом предполагает прежде всего предупреждение вселения новых видов, раннее его выявление, уничтожение видов-вселенцев, сдерживание их распространения, мониторинг ситуации. Доказано, что наиболее эффективный с экономической точки зрения метод — предотвращение инвазий вредных чужеродных видов. Следует иметь в виду, что часто инвазии необратимы — вселившейся и натурализовавшийся вид невозможно уничтожить. Предотвращение первого вселения особенно важно там, где скорость натурализации и распространения

чужеродных видов высока. Причём действия должны быть направлены на все звенья и этапы инвазионного процесса. Превентивные меры включают законодательные акты и предписания по ограничению интродукции и транспорта вредных чужеродных видов, анализ риска, пограничный и карантинный контроль.

Если вид-вселенец уже натурализовался, то уничтожить его очень сложно, если вообще возможно, и это обычно требует больших затрат. Например, в случае проникновения чужеродного растения, возможно его уничтожение, если оно занимает площадь менее 1 га; при площади от 1 до 100 га успех достигается лишь иногда, а свыше 100 га — очень редко [23].

Предлагаются следующие меры по предотвращению распространения чужеродных видов: механический контроль (кошение растений, отстрел и отлов животных), химический контроль (применение пестицидов и гербицидов), биологический контроль, меры в отношении среды обитания (восстановление нарушенных местообитаний и снижение поступления в экосистемы дополнительных пищевых ресурсов, что делает их более уязвимыми для инвазий), интегрированный подход, включающий все вышеперечисленные меры [24]. В качестве биологического контроля практикуются вселение и размножение врагов вселенца и генетические методы. Последние получили развитие с середины прошлого века, первоначально они были нацелены на насекомых-вредителей и основывались главным образом на выпуске в контролируемые популяции стерильных самцов [25]. Позднее с вселенцами стали бороться путём нарушения полового состава популяции при внедрении особей, несущих “тройную” Y-хромосому, использования самцов с неполноценными сперматозоидами, изменения генофонда для индукции устойчивости у ценного вида-хозяина, скажем, зернового растения [26], выпуска генномодифицированных самцов, несущих доминантную леталь (применяется в борьбе с инвазионным комаром *Aedes aegypti*, переносчиком вирусов Зика и жёлтой лихорадки [25]).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИНВАЗИЙ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ В РОССИИ

Российскими биологами проблема чужеродных видов в современном её понимании интенсивно обсуждается и разрабатывается сравнительно недавно, с 1990-х годов. Именно эти годы ознаменовались интенсификацией инвазионного процесса в России. Инициаторами таких исследований стали институты Отделения биологических наук РАН.

Важный итог последних лет — выявление основных транзитных путей инвазионного процесса. Наибольшие успехи достигнуты в определении путей проникновения в Россию сорных растений, насекомых-вредителей и гидробионтов. Увеличилось число публикаций, посвящённых обнаружению чужеродных видов в пределах нашей страны, особенностям их образа жизни, воздействию на аборигенные виды и экосистемы. Предприняты шаги по инвентаризации чужеродных видов России с представлением результатов в доступной для исследователей и регулирующих организаций форме. Созданы базы данных по основным группам организмов и регионам. Из общедоступных интернет-ресурсов по проблеме чужеродных видов следует отметить проблемно ориентированный портал “Чужеродные виды на территории России” (<https://www.sevin.ru/invasive/>). Материалы по инвазиям в РФ представлены в Международной базе данных по биоразнообразию GBIF (<https://www.gbif.org/>).

Большую роль в развитии исследований по биологическим инвазиям чужеродных видов сыграли всероссийские и международные конференции, организованные в последние годы. Один из таких форумов — симпозиум “Чужеродные виды в Голарктике”, единственное международное мероприятие, посвящённое чужеродным видам, которое регулярно проводится в России и охватывает исследования по этой актуальной проблеме на значительной части Земного шара. Первый такой симпозиум был организован в 2001 г., последний, шестой, в 2021 г.

С 2008 г. издаётся электронный “Российский журнал биологических инвазий” (в открытом доступе на сайте: <http://www.sevin.ru/invasjour/>), с 2010 г. он выходит и на английском языке, распространяется издательством “Springer”. Журнал включён во все ведущие международные базы данных. С 2007 г. начата публикация монографических изданий серии “Чужеродные виды России”, к настоящему времени вышли в свет 12 книг. Они посвящены отдельным видам-вселенцам или целым группам чужеродных организмов, натурализовавшимся в России: растениям, млекопитающим, растительноядным насекомым. Понимая важность выбора видов-мишеней (особенно опасных), приоритетных для исследования и контроля, в 2018 г. была опубликована книга “Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100)” [27]. Это издание занимает особое место в данной серии, так как знаменует определённый этап в исследованиях инвазионного процесса в стране.

Предпринимаются шаги по подготовке соответствующих специалистов. На биологическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова создан и препода-

даётся курс “Биологические инвазии чужеродных видов” (лекции и семинары).

Основные перспективы исследований биологических инвазий чужеродных видов видятся в решении следующих основных задач:

- разработка научных основ и ведение мониторинга инвазионного процесса (выявление новых вселений, инвазионных коридоров и векторов, публикация и размещение этой информации в базах данных);
- исследование биологических характеристик успешных и потенциальных видов-вселенцев;
- изучение процессов, определяющих уязвимость экосистем к новым инвазиям при колебаниях абиотических факторов;
- развитие системы оценки риска и разработка мер контроля инвазионного процесса;
- исследование экологических, генетических и эволюционных последствий биологических инвазий.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и поддержана средствами государственного бюджета по государственному заданию ИПЭЭ РАН № 0109-2018-0076.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиганова Т.А. Чужеродные виды в экосистемах южных морей Евразии. Автореф. ... докт. дисс. М.: ИПЭЭ РАН, 2009.
2. Адрианов А.В. Экологическая безопасность дальневосточных морей России // Вестник РАН. 2011. № 2. С. 111–121.
3. Слынько Ю.В., Дгебуадзе Ю.Ю., Новицкий Р.А., Христов О.А. Инвазии чужеродных рыб в бассейнах крупнейших рек понто-каспийского бассейна: состав, векторы, инвазионные пути и темпы // Рос. журн. биол. инвазий. 2010. № 4. С. 74–89.
4. DAISIE Handbook of alien species in Europe. Springer, Dordrecht, 2009.
5. Каримова Т.Ю., Неронов В.М. Природные очаги чумы. М.: Наука, 2007.
6. Hanno S., Bacher S., Blackburn T.M. et al. Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050 // Glob Change Biol. 2021.27. P. 970–982. <https://doi.org/10.1111/gcb.15333>
7. Elton C.S. The ecology of invasions by animals and plants. London: Methuen, 1958.
8. Элтон Ч. Экология нашествий животных и растений. М.: Иностран. литер., 1960.
9. Каревич А.Ф. Теория и практика акклиматизации водных организмов. М.: Пищевая пром-сть, 1975.
10. Дгебуадзе Ю.Ю. Глобальные изменения климата и инвазии чужеродных видов // Изменение климата и биоразнообразие России / Под. ред. Д.С. Павлова, В.М. Захарова. М.: Акрополь, 2007. С. 8–16. ISBN 978-5-98807-012-2
11. Бобров В.В., Варшавский А.А., Хляп Л.А. Чужеродные виды млекопитающих в экосистемах России. М.: Т-во научных изданий КМК, 2008.
12. Shiganova T.A., Sommer U., Javidpour J. et al. Patterns of invasive ctenophore *Mnemiopsis leidyi* distribution and variability in different recipient environments of the Eurasian seas: a review // Marine Environmental Research 2019. 152: 104791. doi.org/. 2019.104791 <https://doi.org/10.1016/j.marenvres>
13. Schlosser I.J. Dispersal, boundary processes and trophic level interactions in streams adjacent to beaver ponds // Ecology. 1995. № 76. P. 908–925.
14. Завьялов Н.А. Средообразующая роль обыкновенного бобра (*Castor fiber* L.) в европейской части России // Тр. Гос. природного заповедника “Рдейский”. Вып. 3. Вел. Новгород, 2015.
15. Bashinskiy I.V. Beavers in lakes: a review of their ecosystem impact // Aquat Ecol. 2020. № 54. P. 1097–1120. <https://doi.org/10.1007/s10452-020-09796-4>
16. Dgebuadze Y.Y., Bashinskiy I.V., Osipov V.V. The influence of Eurasian beaver *Castor fiber* activity on fish assemblages in small steppe rivers in Russia // Environ Biol. Fish. 2021. № 104. P. 689–700. <https://doi.org/10.1007/s10641-021-01103-w>
17. Карабанов Д.П. Генетико-биохимические адаптации черноморско-каспийской тюльки *Clupeonella cultriventris* (Nordmann, 1840) при расширении ареала. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: ИПЭЭ РАН, 2009.
18. Voroshilova I.S., Artamonova V.S., Yakovlev V.N. The Origin of Populations of *Dreissena Polymorpha* Near the North-Eastern Boundary of Its Distribution Area // Mussels: Anatomy, Habitat and Environmental Impact / Ed. L.E. McGevin. Nova Science Publishers, Inc., 2011. P. 453–468. ISBN 978-1-61761-763-8
19. Pierce A.A., Gutierrez R., Rice A.M., Pfennig K.S. Genetic variation during range expansion: effects of habitat novelty and hybridization // Proc. R. Soc. 2017. B 284: 20170007. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0007>
20. Christophe D., Leroy B., Vaissire A.Ch., Gozlan R.E. et al. High and rising economic costs of biological invasions worldwide // Nature. 2021. V. 592. P. 571–585.
21. Kirichenko N., Haubrock P.J., Cuthbert R.N. et al. Economic costs of biological invasions in terrestrial ecosystems in Russia // Zenni R.D., McDermott S., García-Berthou E., Essl F. (Eds). The economic costs of biological invasions around the world // NeoBiota. 2021. № 67. P. 103–130. <https://doi.org/10.3897/neobiota.67.58529>
22. Tang Cindy Q., Matsui Tetsuya, Ohashi Haruka et al. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia // Nature communications. 2018. V. 9. № 1 (2018). 9:4488 <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06837-3> www.nature.com/naturecommunications
23. Rejmanek M., Pitcairn M.J. When is eradication of exotic plant pests a realistic goal? // C.R Veitch and

- M.N. Clout, ed. Turning the tide: the eradication of invasive species. IUCN, Gland, Switzerland, 2002. P. 249–253.
24. Wittenberg R., Cock M.J.W. Best practices for the prevention and management of invasive alien species // H.A. Mooney, R.N. Mack, J.A. McNeely, L.E. Neville, P.J. Schei, J.K. Waage, ed. SCOPE 63. Invasive alien species: a new synthesis. Washington DC.: Island Press, 2005. P. 209–232.
25. Вукторов А.Г. Генетические методы борьбы с вредными насекомыми. История и современное состояние // Рос. журн. биол. инвазий. 2021. № 1. С. 51–63. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-1-51-63>
26. Махров А.А., Карабанов Д.П., Кодухова Ю.В. Генетические методы борьбы с чужеродными видами // Рос. журн. биол. инвазий. 2014. № 2. С. 110–125.
27. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Под. ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. М.: Т-во научных изданий КМК, 2018. <http://naukamedia.ru/news/kniga-samyie-opasnyie-invazionnye-vidy-rossii-top-100-/>

BIOLOGICAL INVASIONS OF ALIEN SPECIES – A GLOBAL CHALLENGE IN THE LAST DECADES

Yu. Yu. Dgebuadze^{1,2,#}

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: yudgeb@gmail.com, yudgeb@yandex.ru*

Biological invasions of alien species – the occupation by living organisms of territories and water areas outside their historical range – have now acquired a gigantic scale, affecting all countries and continents. The recent trends in the development of the invasive process indicate its significant intensification. The proposed review provides information on the scale of biological invasions on Earth, history, current state and main directions of scientific research in this area. In particular, the factors that determine the possibility of invasion of an alien species are considered; stages of the invasive process; ecological, genetic and evolutionary consequences of invasions for natural ecosystems; the impact of invasive species on human safety and health and the social and economic sectors; approaches to forecasting and control of the invasive process.

Keywords: invasion, alien species, invasive species, naturalization, introduction.