

Д. Г. Груммо, Н. М. Роговский

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com, zm.hrumo@gmail.com**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ИНВАЗИВНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ В ПОЛЕССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМ ЗАПОВЕДНИКЕ**

Аннотация. Представлены текущая и прогнозная вероятностные оценки пригодности территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) к внедрению инвазивных древесных видов растений – *Acer negundo* и *Robinia pseudoacacia*. Использован подход максимальной энтропии (MaxEnt) с включением сведений о местах произрастания и условиях среды, в которых для каждого вида выявлены наиболее значимые факторы для распространения. Определено, что в настоящее время благоприятные условия для произрастания *A. negundo* встречаются на 31,53 тыс. га (14,7 % площади ПГРЭЗ), *R. pseudoacacia* – на 33,60 тыс. га (15,7 %). Прогнозная вероятность распространения видов построена по SSP-сценариям изменения климата, в соответствии с которыми выявлено, что только для *R. pseudoacacia* по SSP1-2.6 к концу XXI в. будет наблюдаться увеличение площадей (39,52 тыс. га, или 18,5 %) с благоприятными условиями для произрастания. Во всех остальных случаях прогнозируется уменьшение пригодных площадей для формирования сообществ с инвазивными древесными видами растений: у *A. negundo* – от 17,15 тыс. га (8,0 % площади ПГРЭЗ) до 0,04 тыс. га (< 0,1 %), *R. pseudoacacia* – от 10,45 тыс. га (4,9 %) до 2,79 тыс. га (1,4 %).

Ключевые слова: инвазивные древесные виды растений, *Robinia pseudoacacia*, *Acer negundo*, пригодность территории для вселения видов растений, прогнозное моделирование, машинное обучение, метод максимальной энтропии, дистанционное зондирование, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник

D. G. Grummo, N. M. Rogovsky

V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com, zm.hrumo@gmail.com**PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION OF INVASIVE WOODY PLANT SPECIES
IN THE POLESSKY STATE RADIOECOLOGICAL RESERVE**

Abstract. This study presents current and predicted probabilistic assessments of the suitability of the Polesky State Radioecological Reserve (PSRR) territory for the introduction of invasive woody plant species – *Acer negundo* and *Robinia pseudoacacia*. The maximum entropy (MaxEnt) approach was used, incorporating information on habitats and environmental conditions, identifying the most significant factors for the spread of each species. It was determined that favorable conditions for the growth of *A. negundo* currently exist on 31.53 kha (14.7 % of the PSRR area), while favorable conditions for *R. pseudoacacia* are found on 33.6 kha (15.7 %). The predicted probability of species spread is based on SSP climate change scenarios, which revealed that only for *R. pseudoacacia* under SSP1-2.6, by the end of the 21st century, there will be an increase in area (39.52 kha, or 18.5 %) with favorable growing conditions. In all other cases, a reduction in areas suitable for the formation of communities with invasive woody plant species is predicted: for *A. negundo* – from 17.15 kha (8.0 % of the PSRR area) to 0.04 kha (< 0.1 %), *R. pseudoacacia* – from 10.45 kha (4.9 %) to 2.79 kha (1.4 %).

Keywords: invasive woody plant species, *Robinia pseudoacacia*, *Acer negundo*, suitability of the territory for plant species introduction, predictive modeling, machine learning, maximum entropy method, remote sensing, Polesky State Radioecological Reserve

Дз. Г. Грумо, М. М. Рагоўскі

Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
Мінск, Беларусь, e-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com, zm.hrumo@gmail.com**ВЕРАГОДНАЯ АЦЭНКА РАСПАЎСЮДЖАННЯ ІНВАЗІВНЫХ ДРЭЎНЫХ ВІДАЎ РАСЛІН
У ПАЛЕСКІМ ДЗЯРЖАЎНЫМ РАДЫЯЦЫЙНА-ЭКАЛАГІЧНЫМ ЗАПОВЕДНІКУ**

Анацыя. Прадстаўлены бягучая і прагнозная імаверная ацэнка прыгоднасці тэрыторыі Палескага дзяржаўнага радыяцыйна-экалагічнага заповедніка (ПДРЭЗ) да ўкаранення інвазіўных дрэўных відаў раслін – *Acer negundo* і *Robinia pseudoacacia*. Выкарыстаны падыход максімальнай энтрапіі (MaxEnt) з уключэннем звестак аб месцах вырасцання і ўмоў асяроддзя, у якіх для кожнага віду выяўлены найбольш значныя фактары для распаўсюджвання. Вызначана, што ў цяперашні час спрыяльныя ўмовы для вырасцання *A. negundo* сустракаюцца на 31,53 тыс. га (14,7 % плошчы ПДРЭЗ), *R. Pseudoacacia* – на 33,60 тыс. га (15,7 %). Прагнозная верагоднасць распаўсюджвання відаў пабудавана па SSP-сцэнарыях змены клімату, у адпаведнасці з якімі выяўлена, што толькі для *R. pseudoacacia* па SSP1-2.6 да канца XXI ст. будзе назірацца павелічэнне плошчаў (39,52 тыс. га, або 18,5 %) са спрыяльнымі ўмовамі для росту. Ва

ўсіх астатніх выпадках прагназуецца памяншэнне прыгодных плошчаў для фарміравання супольнасцяў з інвазіўнымі дрэўнымі відамі раслін: у *A. negundo* – ад 17,15 тыс. га (8,0 % плошчы ПДРЭЗ) да 0,04 тыс. га (< 0,1 %), *R. Pseudoacacia* – ад 10,45 тыс. га (4,9 %) да 2,79 тыс. га (1,4 %).

Ключавыя словы: інвазіўныя дрэўныя віды раслін, *Robinia pseudoacacia*, *Acer negundo*, прыгоднасць тэрыторый для ўсялення відаў раслін, прагназнае мадэліраванне, машыннае навучанне, метады максімальнай энтрапіі, дыстанцыйнае зандзіраванне, Палескі дзяржаўны радыяцыйна-экалагічны запаведнік

Введение. Современное изменение климата является важнейшим фактором, во многом определяющим динамику биоразнообразия природных экосистем. Изменение режима температур и выпадения осадков приводит к смещению ареалов распространения видов растений, в результате чего становится актуальным вопрос прогнозирования вероятности их произрастания на территориях, где ранее они не встречались. Часть мигрировавших видов успешно внедряется как в естественные, так и антропогенно-преобразованные экосистемы, где их инвазионный потенциал раскрывается в полной мере.

По современным данным, к особо опасным чужеродным видам растений в Беларуси относятся 8 таксонов [1, 2], распространение которых остается довольно широким даже с учетом принимаемых мер по борьбе с ними. Среди них выделяются два древесных вида – клен ясенелистный (*A. negundo* L.) и робиния лжеакация (*R. pseudoacacia* L.), интродукция которых проводилась в питомниках и усадебных парках [3, 4], откуда в последующем началась их экспансия. Сегодня основные места локализации *A. negundo* сконцентрированы вдоль водотоков и линейной инфраструктуры, на селитебных территориях равномерно по всей территории Беларуси [3]. В свою очередь, сообщества с доминированием *R. pseudoacacia* в основном произрастают в границах бывших сельскохозяйственных земель и населенных пунктов юга страны.

Наиболее репрезентативной территорией для определения потенциала экспансии указанных видов является Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ). Здесь многообразие характеристик природных компонентов и почти полное прекращение хозяйственной деятельности в послеаварийный период определили разнонаправленность восстановительных процессов растительного покрова, где особое место занимает инвазивный компонент, в частности древесные виды. В основном насаждения с ними сформированы спонтанно – лишь в северной части заповедника имеются единичные культурные посадки *R. pseudoacacia*. Это определяет уникальность объекта, где только условия природной среды диктуют пространственную динамику видов растений.

Для ее выявления одним из трендов в современной экологии является моделирование распространения видов (англ. – Species distribution modeling, SDM). Исследования такого рода преимущественно базируются на достижениях в сфере биоинформатики. К основным достоинствам моделей можно отнести устойчивость к переобучению и мультиколлинеарности, а также возможность работы с небольшой выборкой наземных данных.

Цель исследования – на примере ПТРЭЗ выявить текущие закономерности размещения инвазивных древесных видов растений и оценить пригодность территории для их произрастания к середине и концу XXI в.

Для выполнения цели исследования необходимым является выполнение следующих задач: сформировать блоки входных данных, включающих места произрастания изучаемых видов растений и параметры среды в заповеднике; выявить факторы среды с наибольшим вкладом в текущее распространение видов растений; провести оценку текущей пригодности территории заповедника для произрастания видов растений; спрогнозировать степень благоприятности среды для формирования сообществ с исследуемыми видами растений к 2040–2060 и 2080–2100 гг. по ряду сценариев изменения климата.

Материалы и методы исследования. Заповедник расположен на землях Брагинского, Наровлянского и Хойникского р-нов Гомельской обл. между 51°20′–51°50′ северной широты и 29°30′–30°30′ восточной долготы. Южная граница проходит вдоль Государственной границы Республики Беларусь с Украиной. Площадь района исследования составляет 216,2 тыс. га.

Пространственная изоляция территории ПГРЭЗ привела к тому, что здесь уровень синантропизации флоры сохранился на уровне конца 1980-х гг., что значительно ниже, чем в целом по стране. В границах заповедника выявлено 42 вида, или 79 % от всех признанных в Беларуси агрессивными инвазивных видов (всего 53) [2, 5, 6]. Установлено, что инвазионная активность этих видов в пределах модельной территории неоднородная. К видам-трансформерам (растения, приводящие к коренной трансформации растительного покрова) можно отнести 8 таксонов во флоре ПГРЭЗ: череда ольственная (*Bidens frondosa* L.), мелколепестники однолетний и северный (*Phalacrologium annuum* (L.) Dumort., *Ph. septentrionale* (Fernald & Wiegand) Tzvelev), облепиха крушиновидная (*Hippophaë rhamnoides* L.), топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.), рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun), клен ясенелистный (*A. negundo* L.) и робиния лжеакация (*R. pseudoacacia* L.) [6].

Последние два являются особенно интересными древесными адвентивными видами, поскольку являются новыми лесообразующими видами в регионе. В заповеднике доля таких лесов поступательно растет: 2,7 % (2000 г.) < 3,9 % (2011 г.) < 4,3 % (2020 г.) [7]. Такие насаждения развиваются, как правило, на бывших сельскохозяйственных землях в пределах или окрестностях отселенных деревень [6, 8–13].

Определение потенциала дальнейшей экспансии инвазивных видов растений в ПГРЭЗ проводилось с использованием метода максимальной энтропии, реализованного в программе MaxEnt [14–16]. Его применение довольно широко как в мире [17–21], так и на постсоветском пространстве [22–26]. Для его реализации необходимо провести ряд действий по сбору и обработке информации о местах произрастания и параметрах среды.

Места произрастания вида. Прогнозирование потенциала территории к заселению инвазивных видов начинается в первую очередь с определения их текущего распространения. В среде MaxEnt необходимо их представление в виде сведений с координатами точек произрастания. В исследовании предлагается извлечение данных из результатов наземных наблюдений, проведенных нами и сотрудниками научного отдела ПГРЭЗ в период 2021–2025 гг., а также из ряда научных публикаций [8–13, 27]. Они представлены пространственными сведениями о наличии инвазивных видов в границах лесотаксационных выделов. В соответствии с ними площади выделов с наличием мест произрастания *A. negundo* и *R. pseudoacacia* составляют 10,57 и 3,11 тыс. га соответственно (рис. 1, а).

Во многих выделах в пределах бывших сельскохозяйственных земель и населенных пунктов весомую долю занимают прогадины. Для выявления только лесопокрытых участков проводилась классификация безоблачного композитного снимка Sentinel-2 за 2025 г. с применением машинного обучения. В результате площадь лесов с доминированием или присутствием *A. negundo* и *R. pseudoacacia* в составе древостоя составляет 2,32 и 0,72 тыс. га соответственно (рис. 1, б).

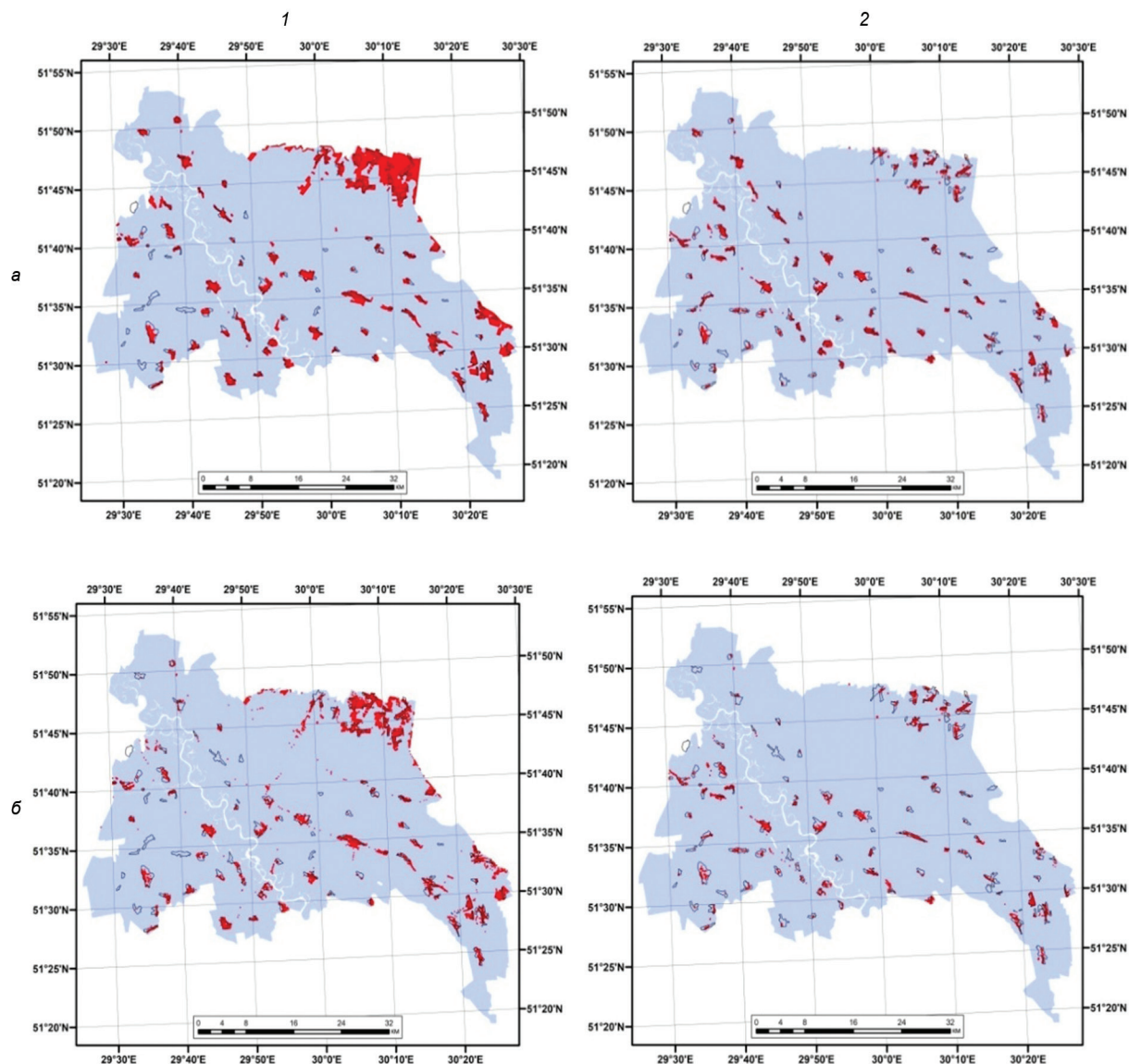


Рис. 1. Текущее распространение *A. negundo* (1) и *R. pseudoacacia* (2) в границах лесотаксационных выделов (а) и на лесопокрытых территориях (б)

На этой основе создано 500 случайных точек, часть определена в качестве тестовых (25 %) и тренировочных (75 %) данных случайным образом.

Параметры среды. В модели определяется ряд пространственных тематических сведений: биоклиматические показатели, рельеф, виды земель, почвенный покров.

Биоклиматические показатели. Климат является фактором с наиболее активным изменением во времени и влиянием на динамику растительного покрова. Перечень и значения биоклиматических показателей базируются на данных WorldClim [28] (табл. 1).

Для оценки текущей пригодности территории ПГРЭЗ к заселению инвазивных видов используются значения показателей за 1970–2000 гг. За указанный период среднегодовая температура в заповеднике составила 6,9 °С, а сумма осадков – 603 мм. Прогнозная динамика определялась на период 2040–2060 и 2080–2100 гг. по четырем сценариям изменения климата, соответствующим Общим социально-экономическим путям (англ. Shared Socioeconomic Pathways, SSP): 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0, 5-8.5 [29–35] (табл. 2).

Таблица 1. Биоклиматические показатели базы данных WorldClim

Показатель	Сущность показателя	Сокращение
BIO1	Среднегодовая температура	T _{year}
BIO2	Средний суточный диапазон температур	T _{day-range}
BIO3	Изотермичность (BIO2/BIO7) (×100)	T _{iso}
BIO4	Сезонность температуры (стандартное отклонение ×100)	T _{season.}
BIO5	Максимальная температура самого теплого месяца	T _{max-warm}
BIO6	Минимальная температура самого холодного месяца	T _{max-cold}
BIO7	Годовой диапазон температур (BIO5–BIO6)	T _{year-range}
BIO8	Средняя температура самого влажного квартала	T _{humid-quarter}
BIO9	Средняя температура самого сухого квартала	T _{dry-quarter}
BIO10	Средняя температура самого теплого квартала	T _{warm-quarter}
BIO11	Средняя температура самого холодного квартала	T _{cold-quarter}
BIO12	Годовое количество осадков	Pr _{year}
BIO13	Осадки самого влажного месяца	Pr _{humid}
BIO14	Осадки самого сухого месяца	Pr _{dry}
BIO15	Сезонность осадков (коэффициент вариации)	Pr _{season.}
BIO16	Осадки самого влажного квартала	Pr _{humid-quarter}
BIO17	Осадки самого сухого квартала	Pr _{dry-quarter}
BIO18	Осадки самого теплого квартала	Pr _{warm-quarter}
BIO19	Осадки самого холодного квартала	Pr _{cold-quarter}

Примечание. Таблица составлена на основании [28].

Таблица 2. Краткая характеристика Общих социально-экономических путей (SSP)

Уровни сценария	Радиационное воздействие, Вт/м ²	Принятое название	Изменение среднегодовых температур в мире, °С		Краткая характеристика
			2041–2060 гг.	2080–2100 гг.	
1	2,6	Устойчивое развитие (SSP1-2.6)	+1,7	+1,8	Выбросы CO ₂ сократятся до 0 к 2075 г. при улучшении управления глобальными ресурсами
2	4,5	Срединный путь (SSP2-4.5)	+2,0	+2,7	Выбросы CO ₂ останутся на уровне текущих значений к 2050 г. при медленном прогрессе в достижении целей устойчивого развития
3	7,0	Региональное соперничество (SSP3-7.0)	+2,1	+3,6	Выбросы CO ₂ удвоятся к 2100 г. при дисбалансе между регионами в достижении целей энергетической и продовольственной безопасности
5	8,5	Развитие на ископаемом топливе (SSP5-8.5)	+2,4	+4,4	Выбросы CO ₂ утроятся к 2075 г. при повышении интеграции глобальных рынков, быстром технологическом прогрессе и развитии человеческого капитала

Примечание. Таблица составлена на основании [29–35].

Изменение атмосферной циркуляции в пределах заповедника по данным климатической модели INM-CM5-0 в целом соответствует региональному тренду для Белорусского Полесья [36] и будет, вероятно, иметь следующее развитие (табл. 3):

2040–2060 гг. – среднегодовая температура в заповеднике будет варьироваться от 9,6 °C (SSP2-4.5, ↑2,6 °C) до 11,2 °C (SSP5-8.5, ↑4,2 °C) и количество осадков – от 597 мм (SSP3-7.0, ↓6 мм) до 623 мм (SSP2-4.5, ↑20 мм);

2080–2100 гг. – среднегодовые значения температур будут достигать значений от 9,4 °C (SSP1-2.6, ↑2,4 °C) до 13,3 °C (SSP5-8.5, ↑6,4 °C), а суммы осадков – от 601 мм (SSP5-8.5, ↓2мм) до 632 мм (SSP2-4.5, ↑29 мм).

Таблица 3. Прогнозируемые значения климатических показателей для Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Сценарий изменения климата	Период, гг.	Среднегодовая температура		Годовая сумма осадков	
		°C	Изменение к 1970–2000 гг., °C	мм	Изменение к 1970–2000 гг., мм
	1970–2000	+7,0	–	603	–
SSP1-2.6	2040–2060	+9,9	↑ 2,9	602	↓ 1
	2080–2100	+9,4	↑ 2,4	616	↑ 13
SSP2-4.5	2040–2060	+9,6	↑ 2,6	623	↑ 20
	2080–2100	+11,0	↑ 4,0	632	↑ 29
SSP3-7.0	2040–2060	+10,6	↑ 3,6	597	↓ 6
	2080–2100	+12,4	↑ 5,4	620	↑ 17
SSP5-8.5	2040–2060	+11,2	↑ 4,2	598	↓ 5
	2080–2100	+13,4	↑ 6,4	601	↓ 2

Виды земель. Данные о землепользовании являются немаловажной частью в прогнозировании вероятности появления видов, в частности, для ПГРЭЗ, территория которого характеризуется высокой степенью антропогенной преобразованности.

В Западной и Центральной Европе, где виды отличаются более активной экспансией, нежели в Беларуси, их тяготение к определенным видам земель отражено довольно ярко: у *A. negundo* – к прибрежным местообитаниям и нарушенным землям в населенных пунктах [37, 38], у *R. pseudoacacia* – к сухим открытым и деградирующим лугам, песчаным пойменным гривам, заброшенным сельскохозяйственным землям, промышленным зонам и нарушенным местообитаниям после пожаров, ветровалов и подтоплений [39]. Использование сведений о видах земель способно увеличить достоверность результатов моделирования.

Пространственное распределение основывается на открытом наборе данных от GLC_FCS30D, разработанным в Институте исследований аэрокосмической информации Китайской академии наук в 2023 г. [40]. Сведения представлены классифицированными по 35 субкатегориям растрами за период 1985–2022 гг. В соответствии с данными на 1985 г. в ПГРЭЗ выделяется 13 видов земель (рис. 2, табл. 4).

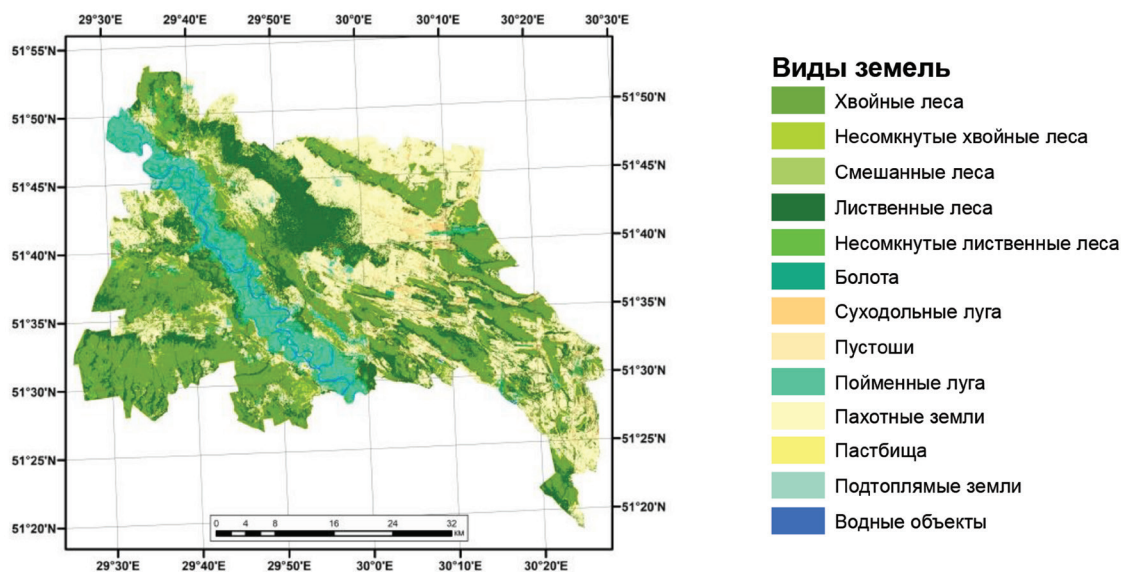


Рис. 2. Виды земель в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике по состоянию на 1985 г.

Таблица 4. Пространственная структура видов земель на 1985 г. по GLC_FCS30D

Вид земель	Площадь	
	тыс. га	%
Хвойные леса	65,70	30,3
Несомкнутые хвойные леса	2,11	1,0
Смешанные леса	0,01	< 0,1
Лиственные леса	51,38	23,7
Несомкнутые лиственные леса	0,08	< 0,1
Болота	5,09	2,3
Суходольные луга	9,75	4,5
Пустоши	< 0,10	< 0,1
Пойменные луга	15,79	7,3
Пахотные земли	65,07	30,0
Пастбища	0,27	0,1
Подтопляемые земли	0,14	0,1
Водные объекты	1,78	0,8
Итого	217,17	100,0

Почвенный покров. Как и структура земель, является важным ограничивающим компонентом природной среды для распространения видов.

Отмечается, что наиболее оптимальным субстратом для *A. negundo*, несмотря на высокий уровень экологической пластичности, являются умеренно влажные, периодически затопляемые почвы с высоким содержанием питательных веществ [37, 38, 41]. Места произрастания *R. pseudoacacia* отличаются большим разнообразием почвенных условий, однако наиболее активное внедрение вида происходит на небогатых, хорошо дренируемых песчаных почвах [39].

Источником сведений о параметре являются почвенные районные карты [42–44], по результатам оцифровки которых в пределах в ПГРЭЗ почвенные разновидности агрегировались в 16 подтипов (рис. 3, табл. 5).

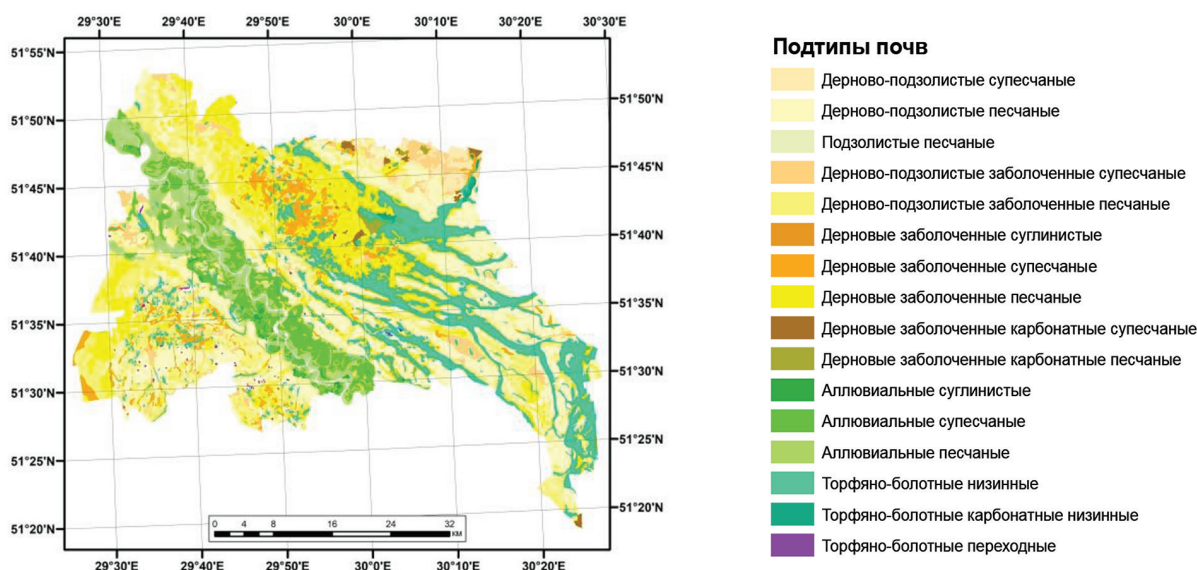


Рис. 3. Почвенный покров Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Таблица 5. Пространственная структура почвенного покрова на уровне подтипов

Почвы	Площадь	
	тыс. га	%
Дерново-подзолистые супесчаные	4,71	2,2
Дерново-подзолистые песчаные	54,32	25,0
Подзолистые песчаные	0,40	0,2
Дерново-подзолистые заболоченные супесчаные	10,50	4,8
Дерново-подзолистые заболоченные песчаные	39,05	18,0

Окончание табл. 5

Почвы	Площадь	
	тыс. га	%
Дерновые заболоченные суглинистые	0,18	0,1
Дерновые заболоченные супесчаные	11,08	5,1
Дерновые заболоченные карбонатные супесчаные	0,90	0,4
Дерновые заболоченные песчаные	32,43	14,9
Дерновые заболоченные карбонатные песчаные	0,88	0,4
Аллювиальные суглинистые	0,84	0,4
Аллювиальные супесчаные	13,30	6,1
Аллювиальные песчаные	14,13	6,5
Торфяно-болотные низинные	32,60	15,0
Торфяно-болотные карбонатные низинные	0,51	0,2
Торфяно-болотные переходные	0,34	0,2
Водные объекты	0,99	0,5
Итого	217,17	100,0

Рельеф. Гипсометрия может являться важным элементом моделирования ввиду приуроченности мест произрастания к определенным высотным уровням в пределах ПГРЭЗ. Для составления входного слоя с абсолютными отметками высот наиболее подробными материалами являются топографические карты масштаба 1 : 100 000 [45–48], имеющиеся в свободном доступе. Оцифрованные изолинии и точки с абсолютными высотами после ряда преобразований в среде ArcGIS были конвертированы в растровый слой со сведениями о рельефе заповедника (рис. 4).

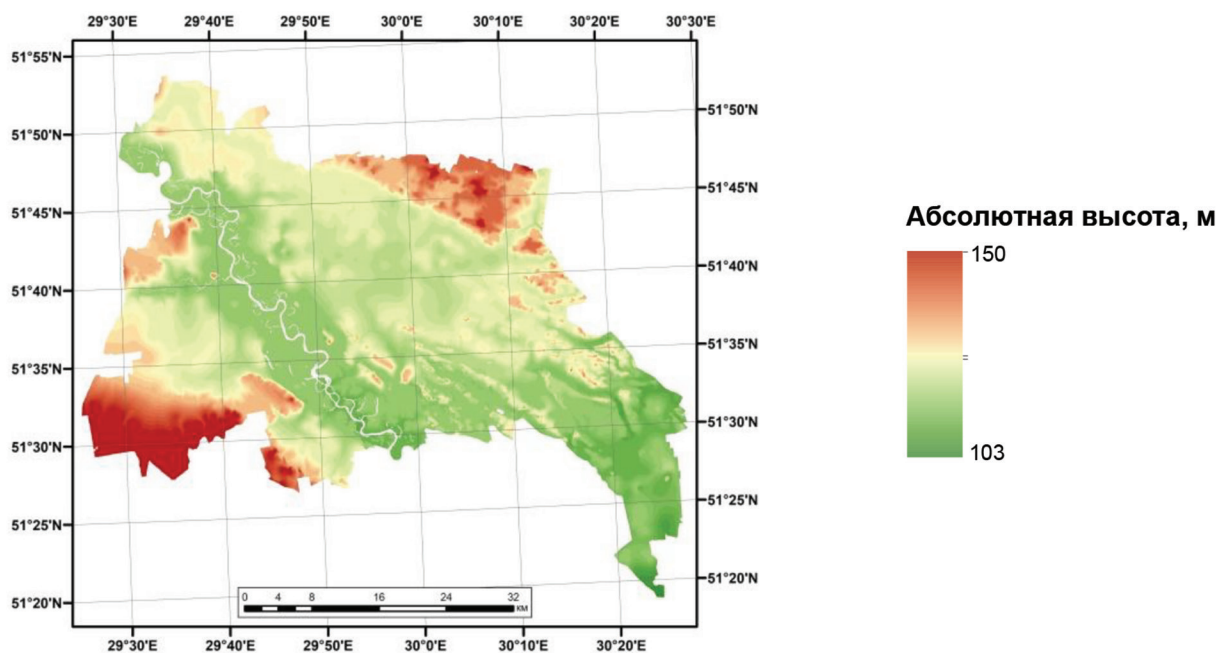


Рис. 4. Рельеф Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Формирование итоговой выборки. Все пространственные сведения приводятся в систему координат WGS84 и растровый формат .asc. Для определения вклада параметров в текущее распределение видов в заповеднике во избежание мультиколлинеарности и переобучения проводится корреляционный анализ значений параметров среды. Показатели, имеющие значения коэффициента корреляции Пирсона $\geq |0,8|$, исключаются из перечня [49].

Стоит учесть тот факт, что необязательно два показателя с сильной корреляционной связью элиминируются – в таком случае обращается внимание на то, что он отражает. Например, если один показатель не имеет больше высоких значений коэффициента корреляции в паре с иными, а другой характеризуется наличием множеством сильных взаимосвязей, то стоит отсеять только последний из двух.

Биоклиматические показатели, сведения о рельефе относятся к непрерывному типу данных, а почвы и виды земель – к категориальному.

Дальнейший тестовый запуск MaxEnt позволяет оценить качество полученных результатов моделирования через оценку производительности AUC (Area under curve, рус. – площадь над кривой) [50] и выявление вклада параметров среды с Jackknife test (рус. – тест «кладной нож»).

AUC отражает ранжирование случайных точек присутствия выше случайного предсказания (=0,5) на графике ROC (Receiver operating characteristic, кривая рабочей характеристики приемника) [15]. Принято, что значение показателя < 0,5 описывает высокую вероятность случайного распределения, 0,5–0,6 – неудовлетворительную, 0,6–0,7 – плохую, 0,7–0,8 – приемлемую, 0,8–0,9 – хорошую и 0,9–1,0 – отличную производительность [51].

Jackknife test позволяет определить ценность каждой переменной при моделировании без нее (Without variable), где наиболее значимые параметры имеют сильное отклонение от случая использования всех параметров (With all variables), и только с ней (With only variable), где наибольшие значения соответствуют высокой предсказательной способности параметра в определении мест произрастания вида.

Составление карт основывалось на 4-ступенчатой градации пригодности территории к произрастанию инвазивных древесных видов растений, где значения от 0 до 0,2 отражают непригодность, 0,2–0,4 – умеренную, 0,4–0,6 – хорошую, 0,6–0,8 – наивысшую пригодность [52]. Категоризация полученных результатов позволяет в итоге провести анализ динамики площадей вероятного произрастания *A. negundo* и *R. pseudoacacia* в ПГРЭЗ.

Результаты и их обсуждение. Результаты корреляционного анализа значений параметров среды показали, что T_{year} , $T_{day-range}$, $T_{max-warm}$, $T_{warm-quarter}$, $T_{cold-quarter}$, $P_{r_{year}}$, $P_{r_{dry}}$ и $P_{r_{season}}$ (см. табл. 1) наряду с рельефом, видами земель и почвенным покровом являются параметрами среды, которые надо использовать на следующем этапе исследования (табл. 6).

Таблица 6. Корреляционная матрица параметров условий среды

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	V3 ²	P ³	П ⁴
1	–																					
2	-0.08	–																				
3	0.18	0.90	–																			
4	-0.16	0.25	-0.12	–																		
5	0.08	0.66	0.39	0.84	–																	
6	0.83	-0.28	0.10	-0.45	-0.27	–																
7	-0.51	0.58	0.16	0.79	0.77	-0.82	–															
8	0.64	0.09	0.01	0.65	0.69	0.33	0.19	–														
9	0.85	-0.16	0.24	-0.62	-0.35	0.93	-0.82	0.18	–													
10	0.64	0.09	0.01	0.65	0.69	0.33	0.19	0.99	0.18	–												
11	0.77	-0.17	0.24	-0.73	-0.46	0.86	-0.84	0.04	0.98	0.04	–											
12	0.34	0.30	0.60	-0.71	-0.32	0.39	-0.45	-0.30	0.62	-0.30	0.73	–										
13	0.35	0.29	0.59	-0.69	-0.30	0.40	-0.45	-0.28	0.62	-0.28	0.72	0.99	–									
14	0.63	0.16	0.49	-0.53	-0.18	0.69	-0.57	0.07	0.79	0.07	0.80	0.73	0.70	–								
15	-0.02	0.11	0.23	-0.40	-0.24	0.03	-0.16	-0.32	0.16	-0.32	0.28	0.58	0.66	0.11	–							
16	0.29	0.31	0.59	-0.68	-0.30	0.35	-0.41	-0.31	0.56	-0.31	0.68	0.99	0.99	0.67	0.68	–						
17	0.50	0.29	0.62	-0.64	-0.23	0.54	-0.50	-0.13	0.73	-0.13	0.79	0.93	0.90	0.87	0.30	0.89	–					
18	0.29	0.31	0.59	-0.68	-0.30	0.35	-0.41	-0.31	0.56	-0.31	0.68	0.99	0.99	0.67	0.68	0.99	0.89	–				
19	0.69	0.11	0.49	-0.63	-0.26	0.79	-0.68	0.05	0.89	0.05	0.91	0.82	0.81	0.92	0.27	0.78	0.91	0.78	–			
V3 ²	0.24	-0.05	-0.02	-0.04	-0.01	0.11	-0.08	0.14	0.17	0.14	0.19	0.17	0.15	0.13	0.00	0.15	0.20	0.15	0.15	–		
P ³	-0.43	-0.13	-0.06	-0.42	-0.49	-0.15	-0.19	-0.63	-0.13	-0.63	0.03	0.36	0.38	0.05	0.50	0.41	0.18	0.41	0.10	-0.13	–	
П ⁴	-0.22	-0.28	-0.31	0.07	-0.13	-0.06	-0.04	-0.09	-0.18	-0.09	-0.20	-0.34	-0.31	-0.27	-0.03	-0.31	-0.37	-0.31	-0.25	-0.23	0.13	–

Примечание. 1 – 1...19 – № биоклиматических показателей (см. табл. 1); ² – виды земель; ³ – рельеф; ⁴ – почвенный покров.

Модель показала хорошую предсказательную способность, где значения AUC на обучающей и тестовой выборках варьируются от 0,847 до 0,884 (рис. 5).

Исследуемые виды обладают различиями в пространственной приуроченности к параметрам среды. Наибольший вклад в современное распространение *A. negundo* внесли значения $T_{cold-quarter}$, T_{year} , $P_{r_{year}}$ и параметры почв (рис. 6, см. табл. 1). На распространение сообществ с *R. pseudoacacia* в заповеднике больше всего влияют структура почвенного покрова и видов земель, а среди биоклиматических показателей – T_{year} , $T_{cold-quarter}$ (см. рис. 6, табл. 1).

Текущий потенциал распространения видов. Общая площадь участков с наиболее благоприятными условиями для произрастания *A. negundo* составляет 31,53 тыс. га, или 14,7 % территории (рис. 7 и 8, табл. 5), с наибольшим распространением на северо- и юго-востоке.

В свою очередь, *R. pseudoacacia* имеет оптимальные условия произрастания на 33,60 тыс. га, или 15,7 % общей площади (см. рис. 7 и 8, табл. 7), с множеством очагов, основная масса которых расположена на северо-востоке, юге и западе ПГРЭЗ.

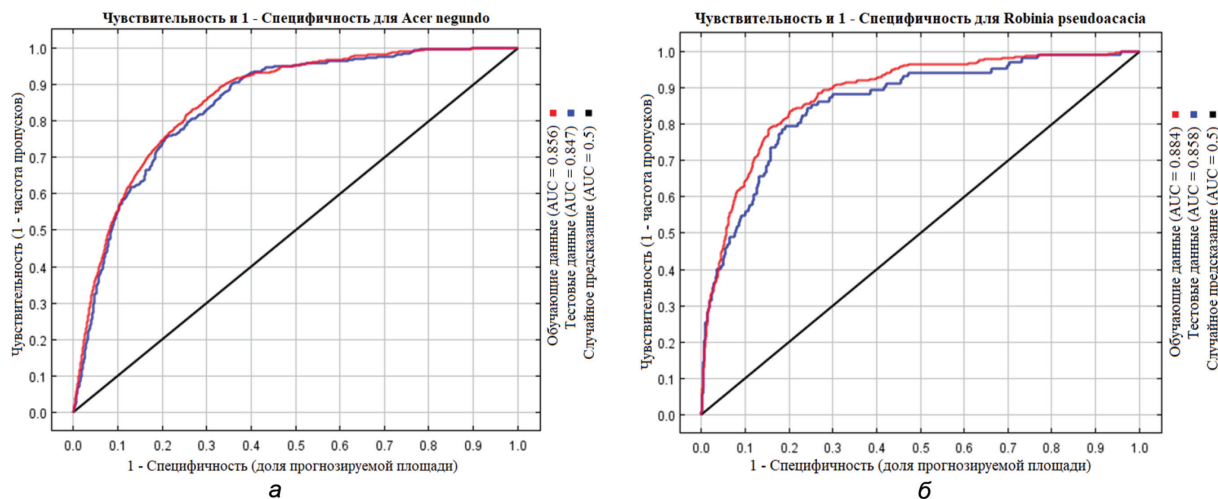


Рис. 5. Проверка надежности модели распределения для *A. negundo* (а) и *R. pseudoacacia* (б)

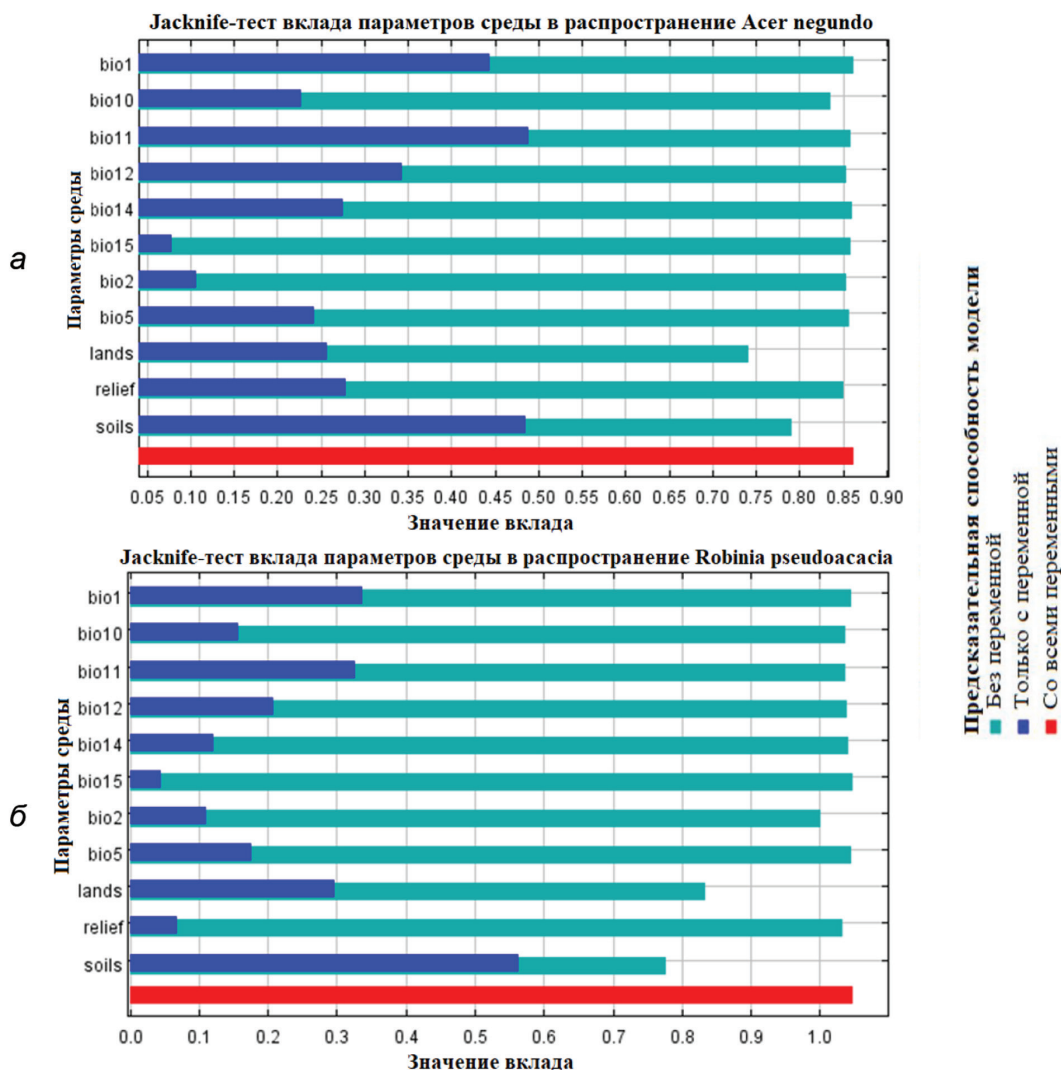


Рис. 6. Результаты Jackknife test для используемых параметров в моделировании распространения *A. negundo* (а) и *R. pseudoacacia* (б)

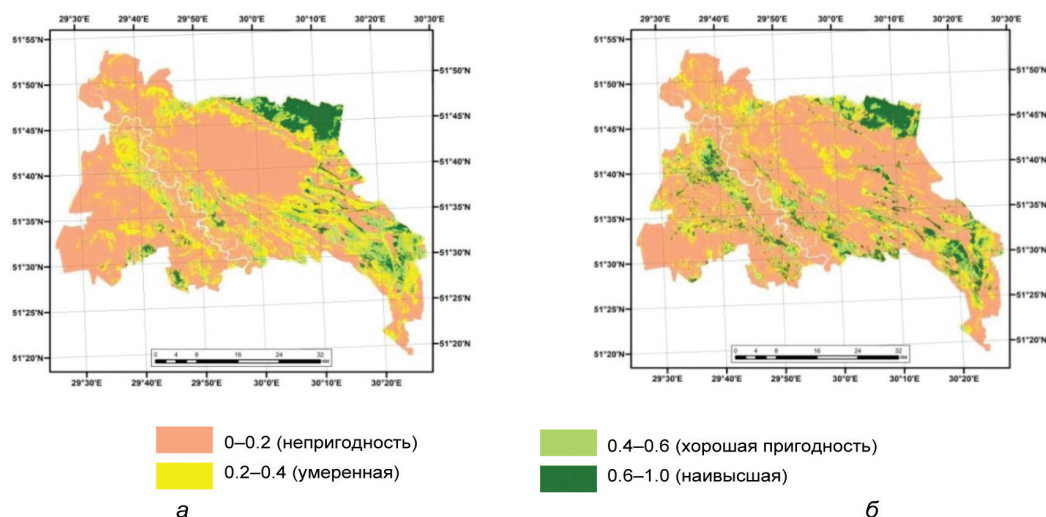


Рис. 7. Текущая пригодность территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника для произрастания *A. negundo* (а) и *R. pseudoacacia* (б)

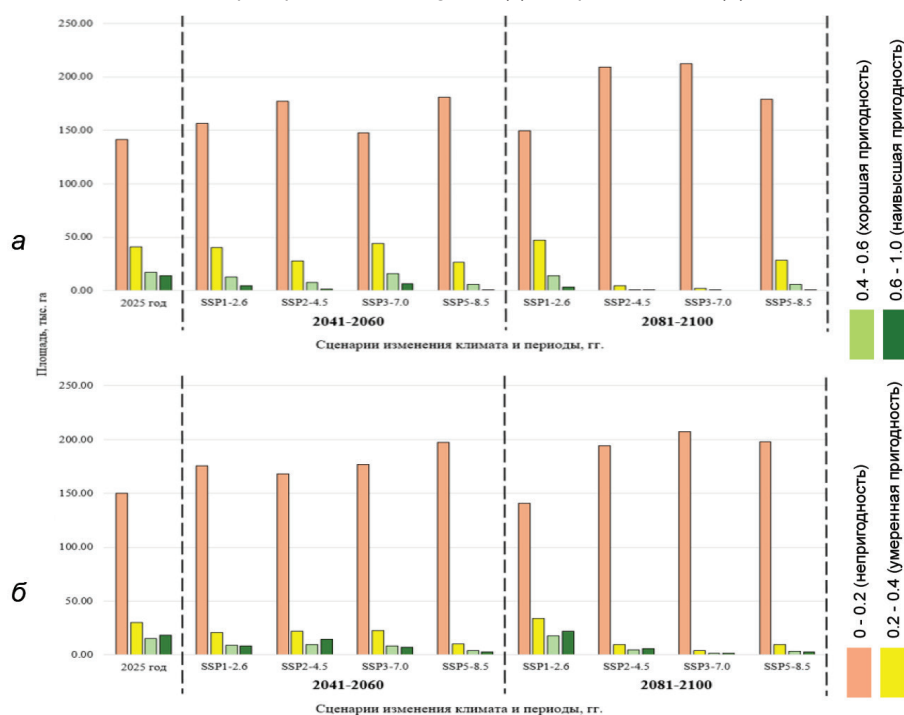


Рис. 8. Текущая и прогнозная сценарная структура территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника по степени пригодности для произрастания *A. negundo* (а) и *R. pseudoacacia* (б)

Таблица 7. Структура площадей территорий по категориям пригодности к произрастанию инвазивных древесных видов растений в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике

Инвазивный древесный вид	Категория пригодности	Площадь по сценариям изменения климата и временным периодам, гг.									
		2025		SSP1-2.6				SSP2-4.5			
		тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%
<i>Acer negundo</i>	1	141,36	66,0	156,42	73,0	149,58	69,8	177,22	82,8	209,24	97,7
	2	41,29	19,3	40,25	18,8	47,46	22,2	27,83	13,0	4,79	2,2
	3	17,30	8,1	12,78	6,0	13,94	6,5	7,96	3,7	0,14	0,1
	4	14,23	6,6	4,72	2,2	3,21	1,5	1,16	0,5	< 0,1	< 0,1
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1	150,21	70,1	175,77	82,1	140,84	65,8	168,28	78,6	194,34	90,7
	2	30,36	14,2	21,04	9,8	33,79	15,8	21,86	10,2	9,38	4,4
	3	15,39	7,2	9,22	4,3	17,77	8,3	9,59	4,5	4,34	2,0
	4	18,21	8,5	8,14	3,8	21,78	10,2	14,45	6,8	6,11	2,9

Инвазивный древесный вид	Категория пригодности	Площадь по сценариям изменения климата и временным периодам, гг.									
		2025		SSP5-7.0				SSP5-8.5			
		тыс. га	%	2041–2060		2081–2100		2041–2060		2081–2100	
<i>Acer negundo</i>	1	141,36	66,0	147,71	69,0	212,27	99,1	180,72	84,4	179,12	83,6
	2	41,29	19,3	44,27	20,7	1,87	0,9	26,67	12,5	28,55	13,3
	3	17,30	8,1	15,78	7,4	0,04	< 0,1	5,91	2,8	5,92	2,8
	4	14,23	6,6	6,42	3,0	–	–	0,87	0,4	0,59	0,3
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1	150,21	70,1	176,64	82,5	207,33	96,8	197,36	92,2	197,94	92,4
	2	30,36	14,2	22,34	10,4	4,06	1,9	10,33	4,8	9,84	4,6
	3	15,39	7,2	8,46	4,0	1,39	0,7	3,69	1,7	3,52	1,6
	4	18,21	8,5	6,74	3,2	1,40	0,7	2,80	1,3	2,87	1,3

Примечание. Категории пригодности: 1 – 0–0,2 (непригодность), 2 – 0,2–0,4 (умеренная пригодность), 3 – 0,4–0,6 (хорошая пригодность), 4 – 0,6–0,8 (наивысшая пригодность) [52].

По итогам расчета соотношения значений текущих и потенциальных площадей произрастания видов выявлено, что сообщества с *A. negundo* и *R. Pseudoacacia* на данный момент занимают соответственно 7,4 и 2,1 % территорий с благоприятными условиями для их произрастания.

Для *A. negundo* наблюдается разная степень динамики площадей с благоприятными условиями для произрастания в соответствии с рядом сценариев (рис. 9).

SSP1-2.6. Несмотря на более «мягкую» степень изменений климата в будущем, площадь пригодных территорий (категории пригодности 3 и 4) для произрастания вида уменьшится до 8,2 % (–44,4 % от текущей доли) к концу XXI в. Данный случай является наиболее оптимистичным для формирования насаждений с *A. negundo*.

SSP2-4.5. В соответствии со сценарием прогнозируется отрицательная динамика пригодных площадей для *A. negundo* до 4,3 % (–71,1 %) к 2040–2060 гг. и до почти полной элиминации (0,1 %; –99,5 %) к 2080–2100 гг.

SSP-3.70. К 2050 г. ориентировочные площади для произрастания вида к середине века будут составлять 10,4 % (–29,6 %) территории ПГРЭЗ, когда к периоду 2080–2100 гг. такие площади будут почти полностью отсутствовать.

SSP5-8.5. Наиболее негативному варианту изменения климата будет соответствовать снижение площадей с оптимальными условиями для потенциального распространения *A. negundo* до 3,2 % (–78,5 %) к 2040–2060 гг. и 3,0 % (–79,4 %) к 2080–2100 гг.

Общей чертой для всех сценариев является то, что основные участки ПГРЭЗ с благоприятными условиями среды для *A. negundo* будут размещены на северо- и юго-востоке, в центре и на западе (см. рис. 9).

Вне первичного ареала распространения *A. negundo* широко встречается в Восточной Германии, где на протяжении XX в. вид использовался для озеленения городских парков и ветрозащитных полос автодорог [53, 54]. Климат региона характеризуется среднегодовой температурой +9,9 °С и годовой суммой осадков 536 мм [55].

Наиболее близкие значения климатических показателей среди прогнозных сценариев отмечаются к середине XXI в. по SSP3-7.0. Именно в соответствии с ним у *A. negundo* наибольшие значения площадей пригодных местообитаний. Однако, несмотря на сходство температурного режима, во всех представленных сценариях не отмечается изменения режима увлажнения ПГРЭЗ в сторону сильного уменьшения количества осадков, поэтому в любом случае условия среды станут менее благоприятными для произрастания *A. negundo*. Про постепенную элиминацию клена ясенелистного из состава растительных сообществ указывается в одной из работ, посвященной лесообразовательным процессам в ПГРЭЗ [56].

У *R. pseudoacacia* динамика потенциальных площадей для произрастания отличается от *A. negundo*, несмотря на сходство в текущем размещении основных очагов экспансии (рис. 10).

SSP1-2.6. Прогнозная динамика пригодных территорий для *R. pseudoacacia* характеризуется сокращением площадей почти в 2 раза до 8,1 % (–48,3%) уже к 2040–2060 гг., однако уже к концу XXI в. будет наблюдаться увеличение доли таких участков до 18,5 % (+17,7 %), что делает данный сценарий единственным, где отмечается положительная тенденция.

SSP2-4.5. По сценарию прогнозируется отрицательная динамика площадей с благоприятной средой для произрастания вида – к середине века их доля упадет до 11,2 % (–28,4 %), к концу – до 4,9 % (–68,9 %).

SSP3-7.0. В данном случае наблюдается наиболее негативный исход событий для вида, где к 2040–2060 гг. прогнозируется уменьшение площади потенциального присутствия до 3,0 % (–80,9 %), а к 2080–2100 гг. – почти полное отсутствие новых мест для заселения *R. pseudoacacia*.

SSP5-8.5. В соответствии со сценарием прогноз динамики характеризуется сильным падением доли пригодных территорий для *R. pseudoacacia* уже к середине XXI в. и дальнейшим небольшим снижением к концу.

Очаги потенциального распространения вида будут постепенно смещаться в западную часть заповедника во всех рассматриваемых вариантах (см. рис. 10). Проведенный анализ показывает большую

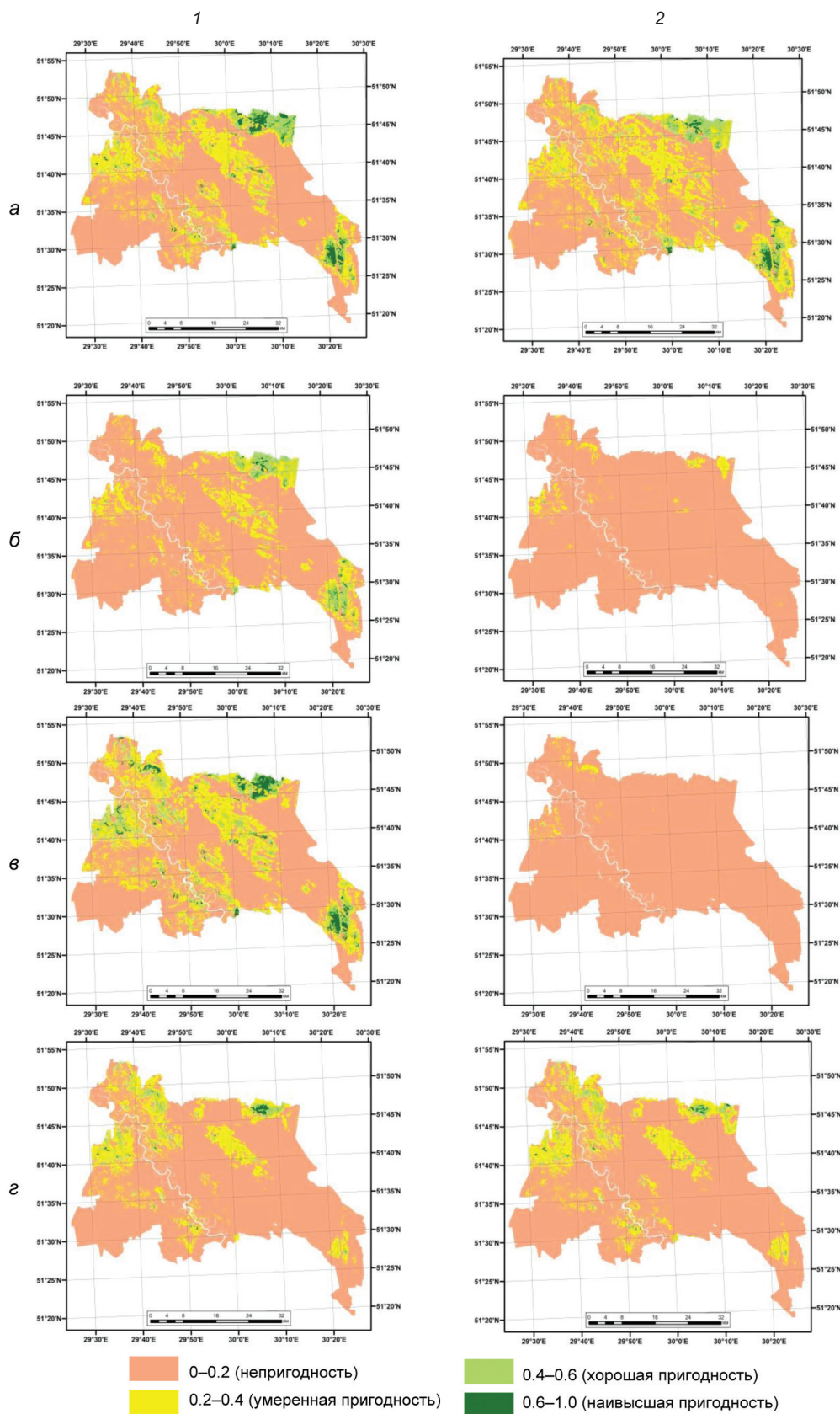


Рис. 9. Потенциальное распространение *A. legundo* в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике к 2040–2060 гг. (1) и 2080–2100 гг. (2) по сценариям изменения климата SSP: 1-2.6 (а), 2-4.5 (б), 3-7.0 (в), 5-8.5 (г)

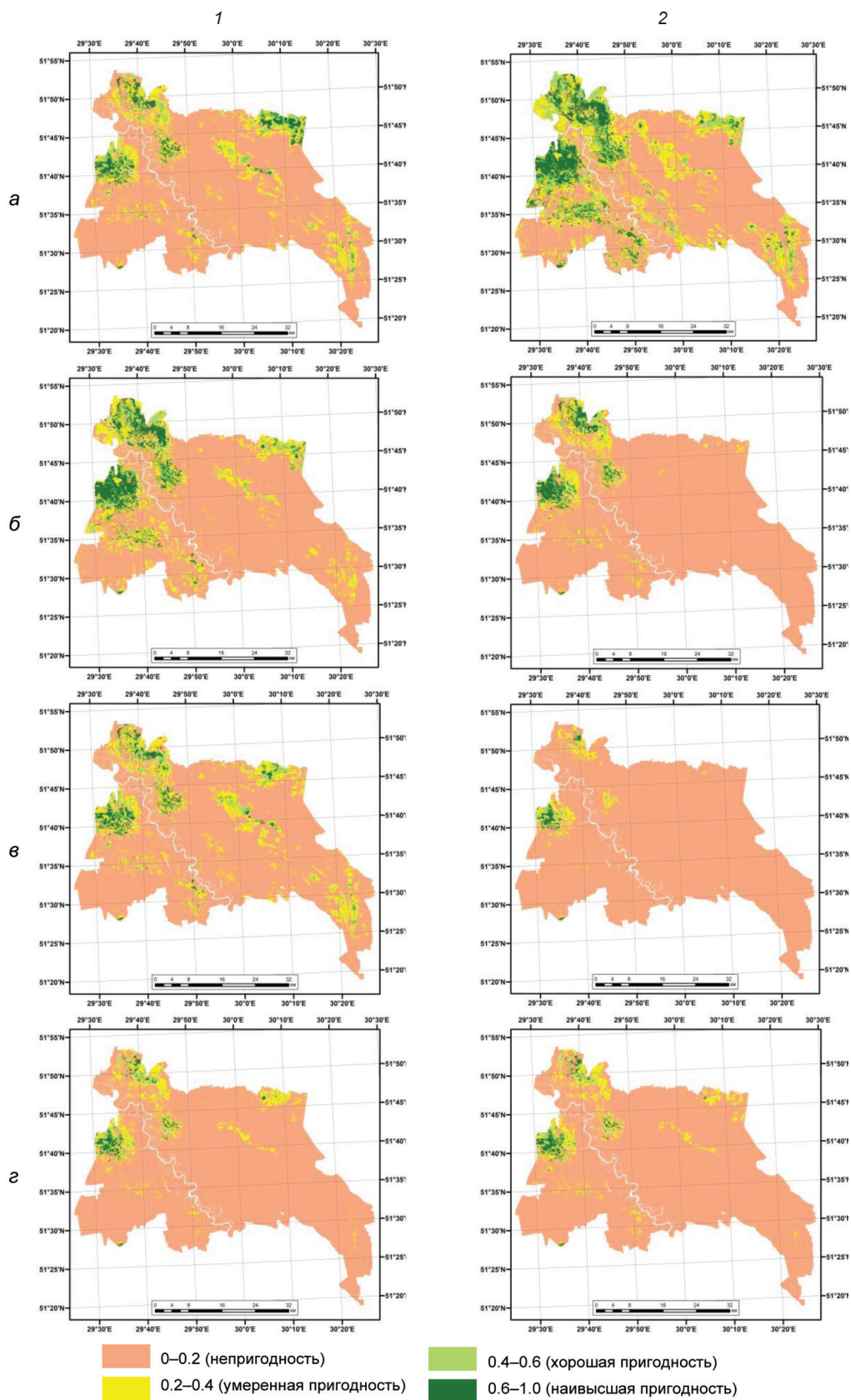


Рис. 10. Потенциальное распространение *R. pseudoacacia* в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике к 2040–2060 гг. (1) и 2080–2100 гг. (2) по сценариям изменения климата SSP: 1-2.6 (а), 2-4.5 (б), 3-7.0 (е), 5-8.5 (з)

степень благоприятности условий среды для *R. pseudoacacia*, чем для *A. negundo*. Это же указывается в результатах наземных обследований в ПГРЭЗ, где для *R. pseudoacacia* отмечается наилучшая способность к возобновлению [56].

Согласно исследованию 2014 г. [57] глобальная зона с благоприятными условиями для произрастания *R. pseudoacacia* охватывает и территорию Беларуси с категорией умеренной пригодности (0,2–0,4). Наиболее пригодные территории для распространения вида наблюдаются в Приатлантической Европе, где современный климат довольно сходен с тем, который прогнозируется в ПГРЭЗ по SSP1-2.6 к 2080–2100 гг. – в соответствии с ним прогнозируется положительная динамика площадей с благоприятными условиями для формирования сообществ с *R. pseudoacacia*.

Против позитивной динамики площадей с оптимальными условиями для вида выступает низкая прогностическая способность сценария SSP1-2.6, где для его реализации необходимо принятие действенных мер по сильному сокращению эмиссии парниковых газов.

Важно отметить ряд моментов касаясь результатов используемого подхода. На их основе нельзя сделать вывод о том, что площади произрастания видов в будущем сократятся вплоть до полной элиминации к концу века, как в случаях с *A. negundo* по сценариям SSP2-4.5 и SSP3-7.0. В MaxEnt формируется прогнозная вероятность степени пригодности участка территории для произрастания видов растений, однако в ней невозможно учесть характеристики видов и процессов в насаждениях с ними. Нахождение основных локалитетов видов на территориях с малоприспособленными условиями для их существования в будущем не означает их полного исчезновения там. Использование метода максимальной энтропии позволяет определить степень благоприятности участков территории к появлению инвазивного вида, что довольно значимо для разработки стратегий по борьбе с ними в качестве превентивного элемента.

Результаты исследования могут быть полезными в формировании блоков входных данных в процесс-ориентированных моделях в качестве вероятности произрастания вида в определенных условиях, что заведомо на основе экспертной оценки предсказать невозможно. Методические указания можно использовать не только для исследования пригодности территории ПГРЭЗ для распространения инвазивных видов, но и для поиска вероятных мест произрастания ценных ресурсных видов растений либо включенных в Красную книгу Республики Беларусь. Полученные результаты не предполагают окончательной оценки существующей ситуации, поскольку из-за особой сложности многие вопросы не затрагивались. Именно поэтому авторы отчетливо сознают необходимость продолжения и углубления исследования в избранном направлении и рассматривают собранный и проанализированный материал как основу для дальнейших, более детальных, обобщающих выводов.

Заключение. Оценка текущего и прогнозного потенциала распространения инвазивных древесных видов растений в ПГРЭЗ основывалась на результатах обработки наземных и дистанционных данных с применением метода максимальной энтропии, которые можно интерпретировать как состояние вида на фоне всей растительности региона в будущем, где его присутствие возможно с различными значениями обилия.

На данный момент сообщества с *A. negundo* и *R. pseudoacacia* соответственно занимают 2,32 и 0,72 тыс. га в ПГРЭЗ. В то же время определено, что 31,53 и 33,60 тыс. га территории обладают благоприятными условиями для произрастания видов. Этот факт указывает на то, что реализованная ниша у *A. negundo* и *R. pseudoacacia* довольно мала, но, учитывая их высокий инвазивный потенциал, при сохранении текущих климатических условий можно было предположить, что распространение сообществ с ними будет становиться более широким.

Однако по всем сценариям изменения климата на территории ПГРЭЗ к концу XXI в. прогнозируется положительный тренд значений среднегодовых температур и увеличения годовых сумм осадков (кроме сценария SSP5-8.5). В соответствии с этим предполагается отрицательная динамика площадей с благоприятными условиями среды для произрастания исследуемых инвазивных видов растений, кроме случая с *R. pseudoacacia*, где при наименьшем росте среднегодовых температур ($\uparrow 2,4$ °C) к концу XXI в. прогнозируется увеличение площадей с высоким потенциалом для произрастания вида. Наиболее негативным сценарием для динамики распространения сообществ с инвазивными древесными видами является SSP3-7.0, где при довольно большом росте среднегодовых температур ($\uparrow 5,4$ °C) и годовой суммы осадков ($\uparrow 17$ мм) к концу XXI в. доли пригодных территорий для заселения *R. pseudoacacia* и *A. negundo* будут составлять 2,74 и 0,04 тыс. га соответственно. В целом отмечается, что по всем сценариям изменения климата потенциал формирования сообществ с *R. pseudoacacia* в ПГРЭЗ выше, чем у *A. negundo*.

Полученные результаты представляют основу для дальнейших исследований по тематике с акцентом на применение процесс-ориентированных моделей, учитывающих конкурентные взаимоотношения видов и другие аспекты.

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему отделом экологии растительных комплексов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника Д. К. Гарбаруку и ведущему научному сотруднику отдела экологии растительных комплексов кандидату сельскохозяйственных наук, доценту А. В. Углянцу за предоставленные материалы о местах произрастания инвазивных древесных видов растений на территории ПГРЭЗ, а также помощь, оказанную в ходе исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экспансия наиболее опасных инвазивных видов растений в Беларуси: инвентаризация, динамика, прогноз развития и оценка эффективности мероприятий / О. М. Масловский, Л. С. Чумаков, И. П. Сысой [и др.] // Фиторазнообразии Восточной Европы. – 2025. – № 19 (2). – С. 167–178.
2. Черная книга флоры Беларуси: чужеродные вредоносные растения / Д. В. Дубовик, С. А. Дмитриева, Н. А. Ламан, [и др.]; под общ. ред. В. И. Парфенова, А. В. Пугачевского; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Мн.: Бел. наука, 2020. – 407 с.
3. Джус, М. А. История интродукции и распространение клена ясенелистного (*Acer negundo* L., Sapindaceae) в Беларуси / М. А. Джус, А. Л. Романюк // Состояние и перспективы развития зеленого строительства в Республике Беларусь: тез. Респ. науч.-практ. сем., Минск, 26–27 апр. 2018 г. / Нац. акад. наук Беларуси; Центр. ботан. сад НАН Беларуси; редкол.: В. В. Титок [и др.]. – Мн.: Медисонт, 2018. – С. 54–57.
4. Сироткин, Ю. Д. О целесообразности культивирования акации белой в лесах БССР / Ю. Д. Сироткин, А. В. Углынец // Труды БТИ. – 1989. – Вып. 24. Лесоведение и лесное хозяйство. – С. 68–72.
5. Турчин, Л. М. Находки аборигенных и адвентивных видов растений в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике / Л. М. Турчин // Флора и растительность в меняющемся мире: проблемы изучения, сохранения и рационального использования: материалы Междунар. науч. конф., Минск – Домжерицы, 24–27 сент. 2019 г. / НАН Беларуси [и др.]; науч. ред. С. А. Дмитриева. – Мн., 2019. – С. 155–157.
6. Биологическое разнообразие Полесского радиационно-экологического заповедника: сосудистые растения / Д. В. Дубовик, М. В. Кудин [и др.]; под ред. акад. В. И. Парфенова. – Мн.: Бел. наука, 2021. – 234 с.
7. Послеаварийная динамика флоры и растительности в районе белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции / Д. Г. Груммо, Н. А. Зеленкевич, Е. В. Мойсейчик, А. Н. Скуратович // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Т. 68, вып. 3. – С. 505–528.
8. Гарбарук, Д. К. Особенности лесообразования на бывших сельскохозяйственных землях в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / Д. К. Гарбарук, А. В. Углынец, С. В. Шумак // Ботаника. – 2020. – Вып. 49. – С. 50–61.
9. Углынец, А. В. Заращение древесной растительностью отселенных «полевых» деревень, расположенных на богатых почвах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / А. В. Углынец, Д. К. Гарбарук, С. В. Шумак // Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Ин-та леса НАН Беларуси, Гомель, 13–15 нояб. 2020 г. / НАН Беларуси, Ин-т леса; редкол.: А. И. Ковалевич (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 451–455.
10. Углынец, А. В. Естественное возобновление леса в отселенных деревнях, расположенных на песчаных почвах в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции / А. В. Углынец, Д. К. Гарбарук // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 1 (240). – С. 26–41.
11. Гарбарук, Д. К. Лесообразование в бывших населенных пунктах, расположенных на плодородных почвах в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции / Д. К. Гарбарук, А. В. Углынец, А. Н. Воронцовская // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 2 (246). – С. 36–50.
12. Гарбарук, Д. К. Распространение инвазивных видов растений на территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в границах Хойникского района / Д. К. Гарбарук, А. В. Углынец, И. В. Шаркевич // Флора и растительность в меняющемся мире: проблемы изучения, сохранения и рационального использования: материалы II Междунар. науч. конф., Минск, 24–27 сент. 2024 г. / Ин-т эксперимент. ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси; С. С. Савчук (отв. за выпуск). – Мн., 2024. – С. 171–177.
13. Гарбарук, Д. К. Распространение наиболее опасных инвазивных видов растений на территории Полесского заповедника в границах Наровлянского района / Д. К. Гарбарук, А. В. Углынец, А. Н. Воронцовская // Ботанические чтения: электрон. сб. материалов Респ. науч. конф., посвящ. 85-летию со дня рожд. проф. М. П. Жигар, Брест, 27 февр. 2025 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; редкол.: Н. М. Матусевич, Н. В. Шкуратова, М. В. Левковская. – Брест: БрГУ, 2025. – 153–158.
14. MaxEnt software for modeling species niches and distribution. – URL: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (date of access: 10.11.2025).
15. Phillips, S. J. A brief tutorial on Maxent / S. J. Phillips // Lessons in Conversation. – 2006. – № 3. – P. 108–135.
16. Phillips, S. J. Maximum entropy modeling of species geographic distributions / S. J. Phillips, R. P. Anderson, R. E. Shapire // Ecological Modelling. – 2006. – Vol. 190, iss. 3–4. – P. 231–259.
17. Çoban, H. O. MaxEnt Modeling for Predicting the Current and Future Potential Geographical Distribution of *Quercus libani* Olivier / H. O. Çoban, Ö. K. Örüçü, E. S. Arslan // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, iss. 7. – 17 p.
18. Current and future predicting potential areas of *Oxytenanthera abyssinica* (A. Richard) using MaxEnt model under climate change in Northern Ethiopia / Y. Gebrewahid, S. Abrehe, E. Meresa [et al.] // Ecological Processes. – 2020. – Vol. 9. – 15 p.
19. Remya, K. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. Using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India / L. Remya, A. Ramachandran, S. Jayakumar // Ecological Engineering. – 2015. – Vol. 82. – P. 184–188.
20. Wei, B. Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China / B. Wei, R. Wang, K. Hou [et al.] // Global Ecology and Conservation. – 2018. – Vol. 16. – 12 p.
21. Xiaodeng, S. Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model / S. Xiaodeng // Ecological Indicators. – 2023. – Vol. 148. – 13 p.
22. Егошин, А. В. Прогнозирование влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга черноморского побережья Краснодарского края / А. В. Егошин // Экосистемы. – 2021. – № 26. – С. 23–32.
23. Егошин, А. В. Моделирование пространственного распределения чужеродных видов растений с использованием данных дистанционного зондирования на примере *Paulownia tomentosa* / А. В. Егошин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2020. – № 1. – С. 39–47.
24. Оценка рисков биологических инвазий дендропатогенных организмов на территории Беларуси, пути их прогнозирования и контроля / В. Б. Звягинцев, Д. Б. Беломесяцева, А. Г. Прохорова [и др.] // Ботаника (исследования). – 2024. – Вып. 54. – С. 30–56.

25. Исаев, А. П. Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии / А. П. Исаев, Б. З. Борисов, Е. Н. Никифорова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 121–133.
26. Моделирование потенциального ареала ветреницы байкальской (*Anemone baicalensis*, Ranunculaceae) в Байкальском регионе / С. В. Солодянкина, Е. А. Истомина, А. А. Сороковой [и др.] // География и природные ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 92–99.
27. Гарбарук, Д. К. Естественное возобновление леса на прогалинах в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / Д. К. Гарбарук, А. В. Углянец, А. Н. Воронецкая // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2019. – № 2 (222). – С. 33–42.
28. Global climate and weather data. – URL: <https://worldclim.org/data/index.html> (date of access: 10.11.2025).
29. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. – URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (date of access: 10.09.2025).
30. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Basis. – URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (date of access: 10.09.2025).
31. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century / O. Fricko, P. Havlik, J. Rogelj [et al.] // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 251–267.
32. Hausfather, Z. An assessment of current policy scenarios over the 21st century and the reduced plausibility of high-emissions pathways / Z. Hausfather // Dialogues on Climate Change. – 2025. – Vol. 2, iss. 1. – P. 26–32.
33. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview / R. Keywan, D. P. van Vuuren, E. Kriegler [et al.] // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 153–168.
34. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century / E. Kriegler, N. Bauer, A. Popp [et al.] // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 297–315.
35. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm / D. P. van Vuuren, E. Stehfest, D. E. H. J. Gernaat [et al.] // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 237–250.
36. Данилович, И. С. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы / И. С. Данилович, В. И. Мельник, Б. Гейер // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2020. – № 1. – С. 3–13.
37. Invasive *Acer negundo* outperforms native species in non-limiting resource environments due to its higher phenotypic plasticity / A. J. Porté, L. J. Lamarque, C. J. Lortie [et al.] // BMC Ecology. – 2011. – Vol. 11. – 12 p.
38. Saccone, P. Challenging growth-survival trade-off: a key for *Acer negundo* invasion in European floodplains? / P. Saccone, J.-J. Brun, R. Michalet // Canadian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 1879–1886.
39. Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: A story of an invasive tree in Central Europe / M. Vítková, J. Müllerová, J. Sádlo [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2017. – Vol. 384. – P. 287–302.
40. GLC_FCS3D Global 30-meter Land Cover Change Dataset (1985–2022). – URL: https://gee-community-catalog.org/projects/glc_fcs/#dataset-postprocessing (date of access: 10.11.2025).
41. Lamarque, L. J. Ecology and Evolution of Invasive Maple Tree Species / L. J. Lamarque. – Toronto, 2013. – 270 p.
42. Почвенная карта [Карты] : Брагинский район : сост. и подгот. к печати Респ. унитар. предприятием «Проект. ин-т Белгипрозем» в 2005 г. – 1 : 50 000, 500 м в 1 см. – Мн. : Белгипрозем, 2005. – 1 л.
43. Почвенная карта [Карты] : Наровлянский район : сост. и подгот. к печати Гомел. фил. ин-та «Белгипрозем» в 1988 г. – 1 : 50 000, 500 м в 1 см. – Гомель: Белгипрозем, 1988. – 2 л.
44. Почвенная карта [Карты] : Хойникский район : сост. и подгот. к печати Гомел. фил. ин-та «Белгипрозем» в 1986 г. – 1 : 50 000, 500 м в 1 см. – Гомель: Белгипрозем, 1986. – 2 л.
45. Брагин, Вильча, Дерновичи, Колыбань, Хойники [Карты] : топографические карты : сост. и подгот. к печати Ген. штабом Вооруж. сил СССР в 1987 г. – 1 : 100 000, 1 км в 1 см. – М. : Ген. штаб Вооруж. сил СССР.
46. Вильча [Карты] : топографическая карта : сост. и подгот. к печати Ген. штабом Вооруж. сил СССР в 1981 г. – 1 : 100 000, 1 км в 1 см. – М. : Ген. штаб Вооруж. сил СССР.
47. Дерновичи, Колыбань [Карты] : топографические карты : сост. и подгот. к печати Ген. штабом Вооруж. сил СССР в 1986 г. – 1 : 100 000, 1 км в 1 см. – М. : Ген. штаб Вооруж. сил СССР.
48. Хойники [Карты] : топографические карты : сост. и подгот. к печати Ген. штабом Вооруж. сил СССР в 1989 г. – 1 : 100 000, 1 км в 1 см. – М. : Ген. штаб Вооруж. сил СССР.
49. Elith, J. The art of modelling range-shifting species / J. Elith, M. Kearney, S. Phillips // Methods in Ecology and Evolution. – 2010. – № 1. – P. 330–342.
50. Fielding, A. H. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models / A. H. Fielding, J. F. Bell // Cambridge University Press. – 1997. – Vol. 24, iss. 1 – P. 38–39.
51. Swets, J. A. Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems / J. A. Swets // Science. – 1988. – Vol. 230, iss. 4857. – P. 1285–1293.
52. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills / X.-Q. Yang, S. P. S. Kushwaha, S. Saran [et al.] // Ecological Engineering. – 2013. – Vol. 51. – P. 83–87.
53. IPS Monitor. – URL: <https://ipsmonitor.de/en/steckbriefe/acer-negundo/> (date of access: 09.01.2026).
54. Albert, B. Untersuchungen zur Situation von Eschen-Ahorn (*Acer negundo*, L.) im Leipziger Stadtwald : Diplomarb. ... Grades Diplom-Forstwirt / Albert Benjamin; Technische Universität Dresden. – Dresden, 2011. – 106 S.
55. Climate Charts. – URL: <https://climatecharts.net> (date of access: 09.01.2026).
56. Багинский, В. Ф. Лесообразовательные процессы в местах поселений, перемещенных после аварии на Чернобыльской АЭС / В. Ф. Багинский, М. В. Кудин // Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – № 1 (41). – С. 12–17.
57. Guoqing, L. Mapping the Global Potential Geographical Distribution of Black Locust (*Robinia Pseudoacacia* L.) Using Herbarium Data and a Maximum Entropy Model / Guoqing Li, Guanghua Xu, Ke Guo [et al.] // Forests. – 2014. – Vol. 5, iss. 11. – P. 2773–2792.

Поступила 13.02.2026