

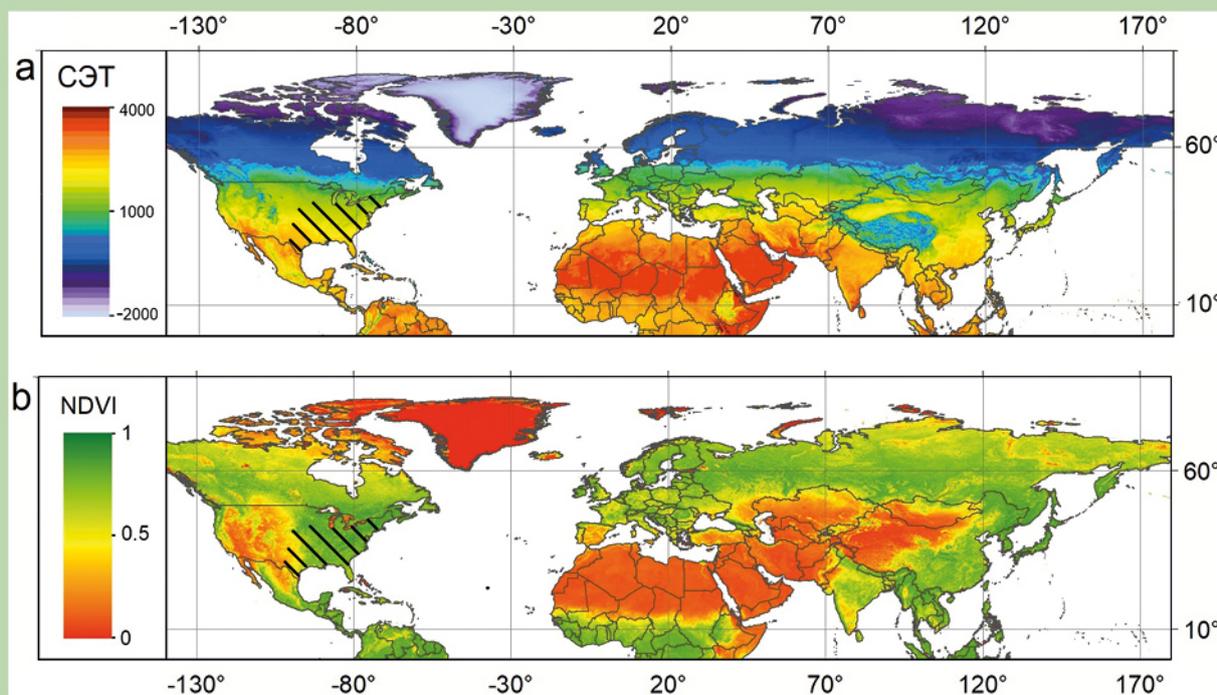


ISSN 1727-1320 (Print),  
ISSN 2308-6459 (Online)

# ВЕСТНИК ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

## PLANT PROTECTION NEWS

2021 TOM VOLUME 104 ВЫПУСК ISSUE 1



Санкт-Петербург  
St. Petersburg, Russia

## ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ФИТОСАНИТАРНОГО РИСКА

А.Н. Афонин<sup>1\*</sup>, Ю.Ю. Кулакова<sup>2</sup>, Ю.А. Федорова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Всероссийский центр карантина растений, Москва

<sup>3</sup>Уфимский Институт Биологии УФИЦ РАН, Уфа

\* ответственный за переписку, e-mail: [afonin-biogis@yandex.ru](mailto:afonin-biogis@yandex.ru)

В статье рассмотрена концепция и технология оценки фитосанитарного риска распространения карантинных видов на основе эколого-географического анализа и моделирования экологических ниш. На примере карантинного вида – ипомеи плющевидной *Ipomoea hederacea* – проанализированы экологические потребности: определены основные экологические факторы, лимитирующие распространение *I. hederacea*, количественно оценены экологические амплитуды вида по отношению к каждому лимитирующему его распространению фактору. С использованием специально созданных экологических карт на основе полученных данных об экологических лимитах вида выявлены экологически пригодные для его обитания территории и создана карта эколого-географической ниши вида. С использованием созданной карты эколого-географической ниши оценен риск распространения *I. hederacea* в регионах Российской Федерации. Подобные карты могут служить основой для количественной и вместе с тем адресной оценки риска проникновения и натурализации вредоносных видов. Полученная при этом информация может быть использована для составления списков карантинных объектов, определения потенциальных ареалов чужеродных видов на территории РФ, при принятии решений по введению эффективных фитосанитарных мер, направленных на недопущение проникновения этих организмов; а в случае их проникновения – основой для организации и проведения мониторинга карантинного фитосанитарного состояния территории Российской Федерации.

**Ключевые слова:** эколого-географическая ниша, ГИС, инвазия, карантинный объект, *Ipomoea hederacea*

Поступила в редакцию: 12.11.2020

Принята к печати: 18.02.2021

### Введение

Анализ фитосанитарного риска (АФР) предусматривает оценку вероятности проникновения, акклиматизации и распространения вредных организмов на территории страны (Приказ «Об утверждении Методики осуществления анализа фитосанитарного риска», 2018). На основании АФР принимается решение о необходимости регулирования распространения карантинного объекта и принятия в отношении его карантинных фитосанитарных мер. Также на основании АФР формируется и пересматривается Перечень карантинных объектов (ФЗ «О карантине растений», 2014).

В 2017 был принят ГОСТ “Карантин растений. Анализ фитосанитарного риска для карантинных вредных организмов. Структура и требования” (ГОСТ 34309–2017, 2017). В части требований к изложению сведений об оценке фитосанитарного риска для анализируемого вредного организма в ГОСТе указывается на необходимость включения в результаты анализа сведений об оценке вероятности интродукции и распространения вредного организма. Оценка вероятности интродукции и акклиматизации анализируемого вредного организма должна включать сравнение эколого-климатических зон распространения

анализируемого вредного организма с теми, которые имеются в открытом грунте в зоне АФР. Это соответствует требованию, изложенному в вышедших в этом же году Международных стандартах по фитосанитарным мерам (МСФМ №11, 2017): «Следует определить ту часть зоны АФР, где экологические факторы благоприятствуют акклиматизации рассматриваемого вредного организма, чтобы установить зону, подверженную опасности».

Конкретные технологии, которые могут быть использованы для оценки экологической пригодности зон АФР для акклиматизации вредных организмов, в Международных стандартах и ГОСТе не прописаны, но они существуют.

Цель статьи: представить специалистам, работающим в области защиты растений и карантина, концепцию и технологию эколого-географического моделирования ниш на примере решения актуальной задачи: анализ фитосанитарного риска распространения на территории РФ карантинных объектов. В качестве модельного объекта выбран карантинный вид *Ipomoea hederacea* (L.) Jacq. Для четкого представления концепции при решении задачи применена модифицированная технология конвертного моделирования ниш.

### Концепция и технология

Информация об эколого-географическом потенциале распространения объекта может быть получена с использованием технологий анализа и моделирования

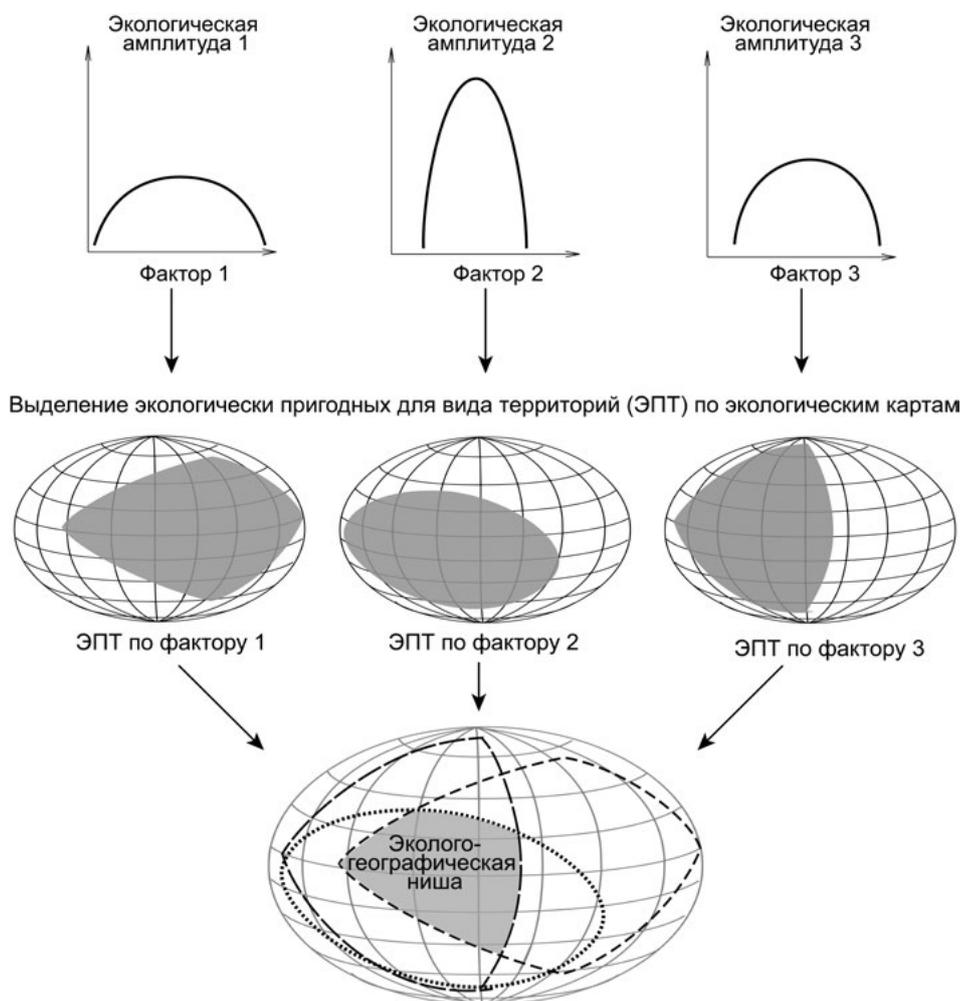
экологических ниш вредоносных биологических объектов. Технологии моделирования экологических ниш (environmental niche modelling) начали развиваться с конца

80-х годов прошлого столетия (Nix, 1986). Их развитие связано с появлением компьютерных геоинформационных систем. Концептуальной основой моделирования является определение экологической ниши в формулировке Хатчинсона (1957): экологическая ниша вида представляет собой часть воображаемого многомерного экологического пространства, по координатным осям которого отложены диапазоны отдельных экологических факторов, соответствующие границам экологических амплитуд вида, совокупность проекций которых в многомерное пространство экологических факторов формирует гиперобъем условий среды, в пределах которого вид способен существовать.

Перенос понятия экологической ниши Хатчинсона из абстрактного гиперобъема условий среды в реальное

геопространство экологических факторов позволяет перейти к понятию **эколого-географической ниши**. В картографическом представлении эколого-географическая ниша вида – это фрагмент земной поверхности, пригодный для существования вида с учетом влияния всех лимитирующих распространение вида факторов среды, а также возможного сопряженного влияния этих факторов.

Практическая реализация этой концепции заключается в возможности наложения известных точек и областей распространения биообъекта на карты экологических факторов среды, выявление при этом факторов среды, лимитирующих распространение биообъекта, и определение экологических амплитуд вида по отношению к каждому из лимитирующих факторов (рис. 1).



**Рисунок 1.** Концепция конвертного моделирования эколого-географической ниши  
**Figure 1.** The concept of climate envelope modeling of the ecological-geographical niche

Последующее моделирование заключается в выявлении на тех же экологических картах территорий, соответствующих экологическим потребностям вида по каждому из лимитирующих его распространение факторам среды. Эти карты экологически пригодных территорий по отдельным факторам объединяются в обобщенную карту экологического потенциала распространения вида, которая, по сути, является картой его эколого-географической ниши. Условие обобщения – включение в площадь эколого-географической ниши только тех участков земной поверхности, которые пригодны для обитания видов одновременно по всем лимитирующим факторам. Подобный подход к моделированию именуется конвертным. Определенная

таким образом для какого-либо североамериканского вида эколого-географическая ниша захватит и покажет территории пригодные для обитания вида не только на территории Америки, но и на других континентах. В случае проникновения вида на новый континент он сможет расселиться именно в пределах территории эколого-географической ниши. Технология моделирования эколого-географических ниш может быть использована для прогноза и оценки риска распространения биологического объекта на новые территории и, в связи с этим, служить инструментом в работе карантинных и фитосанитарных служб.

Последовательность работы по моделированию эколого-географической ниши вредоносного вида при таком

подходе складывается из следующих этапов (по Афонин, Соколова, 2018):

1. Сбор информации о местах нахождения вида;
2. Изучение биоэкологических особенностей вида и выявление экологических факторов, лимитирующих его распространение;
3. Подбор или создание карт факторов среды, лимитирующих распространение вида;
4. Сопоставление карт нахождения вида и экологических факторов среды и количественное определение

#### Анализ фитосанитарного риска с использованием технологии моделирования ниш на примере *I. hederacea*

Рассмотрим, как может работать технология анализа и моделирования экологических ниш при оценке риска возможного проникновения на территорию РФ вредоносного

#### Биоэкология и география *I. hederacea*

*Ipomoea hederacea* – однолетнее травянистое энтомофильное растение короткого дня. Стебли тонкие, обвиваются вокруг других растений. Высота обычно до 1–2 м, стелющиеся стебли могут вырастать до 3–4 метров в длину. Цветки 3–5 см в диаметре, обычно голубые. Происходит из тропиков Южной или Центральной Америки (Erwin, 2013). Встречается в странах Южной и Восточной Азии и спорадически в Европе (Zia-UI-Haq, 2012; EPPO, 2019). Вид предпочитает высокую освещенность, теплый климат и богатые, увлажненные, рыхлые почвы. Не переносит заморозки. Хорошо растет на обрабатываемых почвах, плохо конкурирует с многолетними травами. На северо-востоке США цветет с июля по сентябрь (Erwin, 2013). Фотопериодическим сигналом зацветания служит 14-часовой день (Imamura, Takimoto, 1955). Размножается семенами, одно растение может образовывать от 100 до 11000 семян. Семена начинают прорастать в начале июня, полный цикл развития растения проходят за 60–80 дней (Москаленко, 2001). Семена распространяются ветром и водными потоками, а также переносятся птицами и с семенами культурных растений в результате деятельности человека (Erwin, 2003). Растет в полях, садах, огородах, а также встречается в местах с нарушенным растительным покровом: на пустырях, обочинах дорог, свалках (Erwin, 2013; Zia-UI-Haq et al., 2012). В США *I. hederacea* засоряет в основном посева сои, хлопчатника и кукурузы. Присутствие *I. hederacea* в посевах сои в количестве одного растения на 0.6 м длины рядка, снижает урожай сои на 12% (Wilson, Cole, 1966). Семена *I. hederacea* могут быть завезены в РФ с зерном сои, кукурузы и продуктами их

#### Информация о местах нахождения вида

Информация о распространении *I. hederacea* представлена на ресурсах: GBIF – более 2900 точек (GBIF.org, 2019), USDA (USDA, 2019) и EDDMapS (EDDMapS, 2020). Известные местонахождения *I. hederacea* были введены в

#### Составление карт факторов среды, лимитирующих распространение *I. hederacea*

Для созревания семян *I. hederacea* критичен период от начала цветения до окончания вегетации. На северной границе ареала *I. hederacea* зацветает в конце лета, когда длина дня становится короче порогового значения, обычно это 14 часов. Созревание семян происходит при положительных температурах до первых осенних заморозков. Карта

экологических амплитуд вида по отношению к каждому лимитирующему фактору;

5. Выделение на экологических картах территорий, пригодных для существования вида по каждому из лимитирующих его распространение факторов среды;
6. Создание карты эколого-географической ниши вида, посредством выявления территорий, пригодных для существования вида одновременно по всем лимитирующим его распространение факторам среды (рис. 1);
7. Валидация модели ниши.

объекта *Ipomoea hederacea*, относящегося к списку карантинных организмов, отсутствующих на территории РФ (Решение «Об утверждении единого перечня карантинных объектов», 2016).

переработки из США, Бразилии (Вредители, болезни и сорняки..., 1964; Ситникова, 2013).

В ходе ранее проведенного биоэкологического исследования другого сходного по экологическим требованиям с *I. hederacea* однолетнего вида – амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.) – нами было установлено, что основные экологические факторы, лимитирующие распространение однолетних короткодневных видов – это недостаточная теплообеспеченность периода созревания семян и недостаточная влагообеспеченность вегетационного периода (Афонин и др., 2019). *I. hederacea*, как и *A. artemisiifolia*, – однолетний короткодневный вид, поэтому необходимые для созревания семян суммы температур растение должно успеть получить за период от начала завязывания семян до первых осенних заморозков. Также необходимое условие для произрастания *I. hederacea*, как и других видов растений, – достаточное количество влаги. Опыт проведенного ранее моделирования экологических ниш многочисленных видов показывает, что высокую точность прогноза распространения биообъектов обеспечивает учет небольшого количества основных экологических факторов, тогда как учет второстепенных факторов может сделать модель не универсальной. Поэтому при моделировании экологической ниши *I. hederacea* были использованы два базовых экологических фактора: суммы температур за период от начала цветения до первых осенних заморозков и влагообеспеченность территории. Оценку точности получившейся карты ниши провели на этапе валидации.

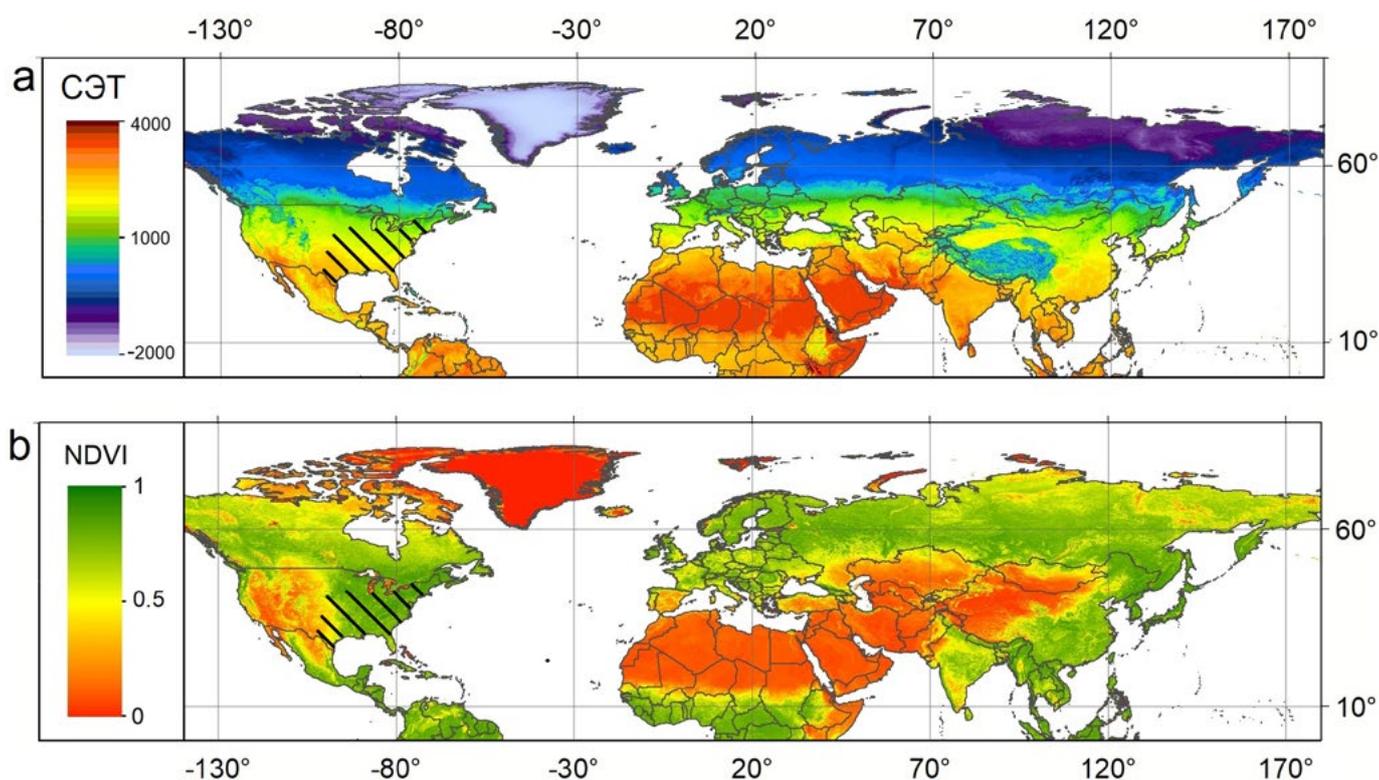
ГИС, сопоставлены с картами экологических факторов среды и использованы при эколого-географическом анализе ниши и валидации модели.

сумм активных температур выше 0 (CAT) за период от перехода длины дня через 14 часов до первых осенних заморозков была составлена нами с использованием среднемесячных слоев температур по модифицированной (Афонин и др., 2019) методике Л.С. Кельчевской (1971). Необходимые для расчета слои среднемесячных температур были

подготовлены по материалам температурного космического зондирования поверхности Земли спектро радиометром MODIS космического аппарата Terra (MODIS/Terra (Wan et al., 2015)). Пространственное разрешение карт – 0.05 градуса земной дуги. При подготовке слоев, карты средних температур на каждый месяц осреднялись за период температурных измерений аппарата Terra с 2000 по 2018 г. При работе применялись стандартные средства программного ГИС обеспечения ArcGIS 10.4 (ESRI, 2011) и Idrisi 17.02 (Clark Labs, 2012). Оценка предикативности экологических карт проводилась в программе Maxent (Phillips et al., 2020).

Для оценки влагообеспеченности был использован стандартный показатель – нормализованный индекс растительности (NDVI). От гумидных территорий к аридным

проективное покрытие растительности, ее биомасса и фотосинтетическая активность закономерно уменьшаются так же, как и отражающие эти показатели значения индексов растительности. Среднемесячные глобальные слои NDVI, как и температурные слои, были составлены по материалам космического зондирования поверхности Земли спектро радиометром MODIS/Terra (слои MOD13C2; Didan, 2015). Поскольку для *I. hederacea* наиболее критичен дефицит влаги в период цветения и завязывания семян, который в условиях первичного ареала приходится на август, в качестве показателя влагообеспеченности мы использовали карту с августовскими значениями NDVI, усредненными за 10-летний период наблюдений с 2006 по 2016 г. (рис. 2).



**Рисунок 2.** Карты экологических факторов среды, лимитирующих распространение *Ipomoea hederacea*. 2a – карта сумм температур за период от перехода длины дня через 14 часов до первых осенних заморозков; 2b – карта влагообеспеченности по показателю NDVI. Штриховкой показан ареал вида в Северной Америке по EDDMapS (2020) и GBIF (2019)

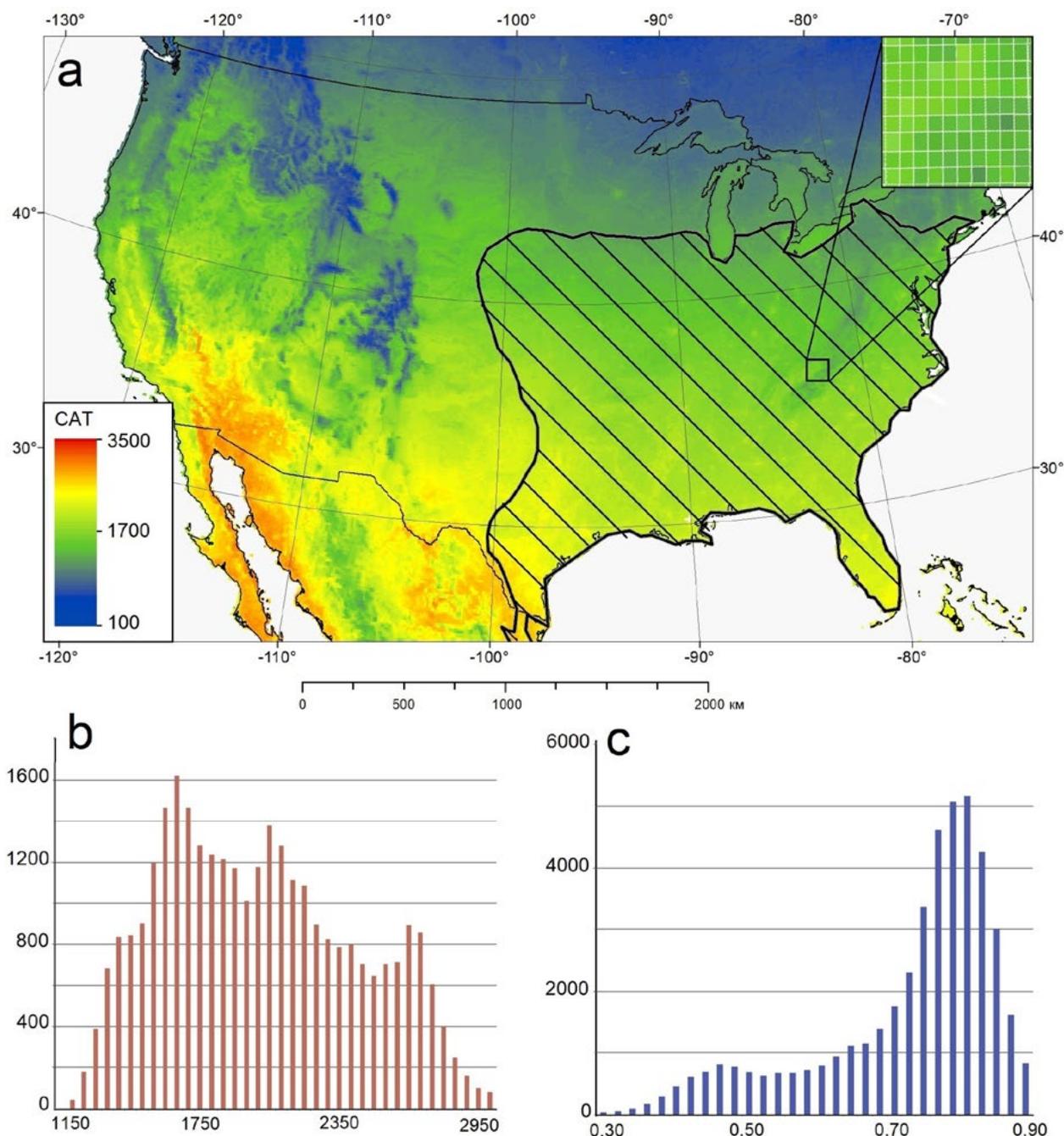
**Figure 2.** Maps of environmental factors limiting the distribution of *Ipomoea hederacea*. 2a – degree-days map for the period from the day length rising above 14 hours to the first autumn frost; 2b – map of moisture availability represented by NDVI. Shading shows the North American range of the species according to EDDMapS (2020) and GBIF (2019)

### Эколого-географический анализ ниши *I. hederacea*

За время, прошедшее с момента первого практического применения эколого-географического анализа и моделирования ниш с использованием геоинформационных технологий (Nix, 1986) до настоящего времени, были разработаны различные подходы и алгоритмы моделирования распространения видов. При этом они имеют некоторый общий базовый экологический концепт, который наиболее нагляден в варианте использования примененного нами модифицированного конвертного метода моделирования (Афонин, Соколова, 2018).

Эколого-географические амплитуды *I. hederacea* по отношению к факторам тепло- и влагообеспеченности были определены при наложении карты ее естественного ареала (EDDMapS, 2020) на составленные нами растровые карты соответствующих факторов среды: тепло- и влагообеспеченности (рис. 3).

Снятые в пределах площади ареала *I. hederacea* массивы значений со всей совокупности клеток растров экологических карт позволили определить ее экологические амплитуды по отношению к каждому лимитирующему



**Рисунок 3.** Эколого-географический анализ потребностей *Ipomoea hederacea* по отношению к фактору теплообеспеченности и влагообеспеченности. Штриховкой показан ареал вида по EDDMapS (2020) и GBIF (2019). На рисунке представлена растровая карта сумм активных температур за период от момента перехода длины дня в конце лета через 14 часов до конца вегетации (а). Значения сумм температур снимаются с каждой из клеток растра в пределах площади наложенного на температурный растр ареала. Полученные массивы данных позволяют количественно оценить экологические амплитуды *I. hederacea* по отношению к факторам теплообеспеченности (б) и влагообеспеченности (снятых с карты NDVI) (с). На осях графиков эколого-географических амплитуд *I. hederacea* показаны диапазоны значений факторов (по оси X) и количество клеток растра в заданных диапазонах значений фактора в пределах площади ареала (по оси Y)

**Figure 3.** Ecological-geographic analysis of *Ipomoea hederacea* requirements in terms of heat and moisture availability. The hatching shows the range of the species according to EDDMapS (2020) and GBIF (2019).

The figure shows a raster map of the degree-days for the period from the day length rising above 14 hours in late summer to the end of the growing season (a). The degree-day values are calculated from each of the cells of the raster within the area of the range which is overlaid onto the temperature raster. The resulting data sets allow us to quantify the ecological amplitudes of *I. hederacea* in terms of the heat (b) and moisture availability (derived from the NDVI map) (c). The ecological amplitudes of *I. hederacea* ranges of factor values are shown on the X axis and the number of raster cells in the given ranges of factor values within the species range are shown on the Y axis

распространение *I. hederacea* фактору среды. Анализ показал, что минимальные суммы температур, необходимые для созревания семян *I. hederacea*, составляют 1250

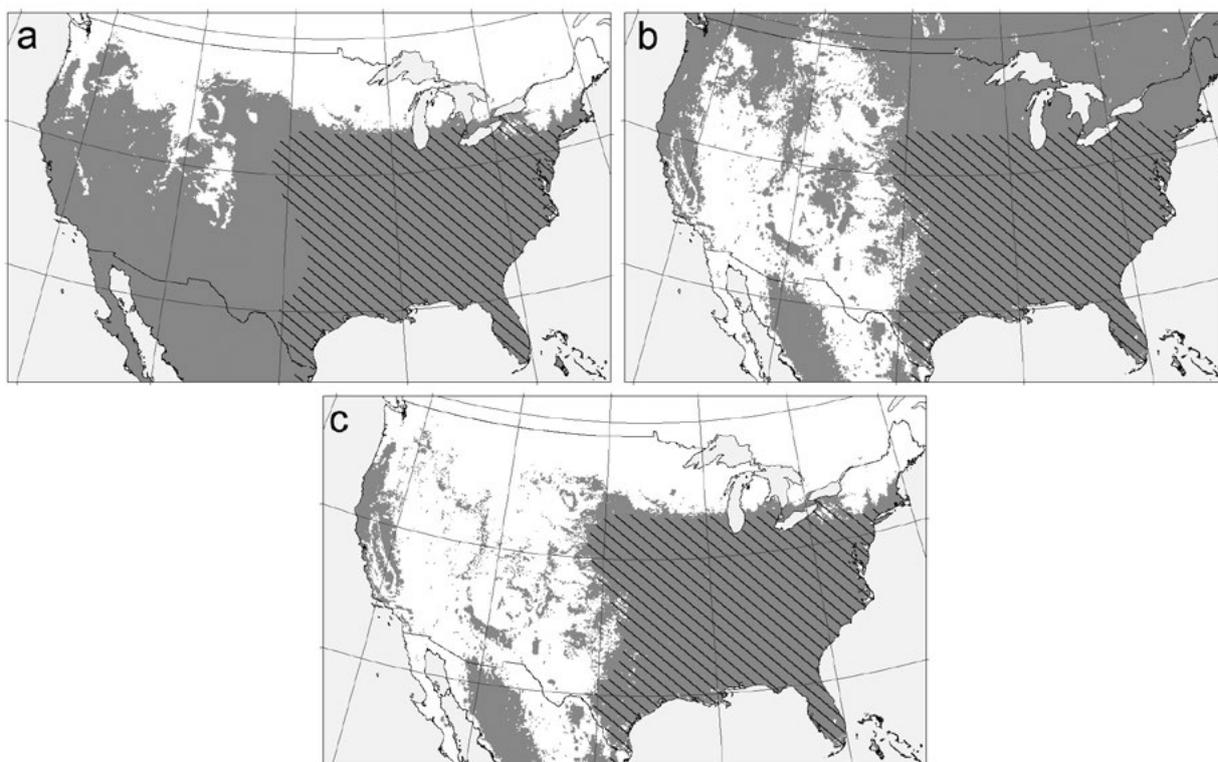
градусов. Влагообеспеченность периода созревания семян, оцененная по показателю NDVI, должна составлять не менее 0.39.

#### Создание карты эколого-географической ниши *I. hederacea*

Оценив количественно экологические амплитуды вида по отношению к лимитирующим его распространение экологическим факторам среды и имея мировые карты соответствующих экологических факторов, специалист получает возможность выявить территорию глобальной эколого-географической ниши вида, которая соответствует зоне его потенциального распространения и натурализации и является зоной фитосанитарного риска.

В приведенном примере задача выявления и картирования зоны фитосанитарного риска решается конвертным способом с использованием стандартных инструментов геоинформационных систем: модулями реклассификации

и растровой алгебры. На первом этапе моделирования на растровых картах экологических факторов среды определяются клетки, значения которых соответствуют диапазону экологической амплитуды вида по соответствующему фактору. Как было определено на этапе анализа, для *I. hederacea* это выше 1250 по фактору теплообеспеченности и выше 0.39 по фактору влагообеспеченности, оцененному в единицах NDVI. Получаются два растра, один из которых показывает территорию, пригодную по фактору теплообеспеченности (рис. 4а), второй – по фактору влагообеспеченности (рис. 4б).



**Рисунок 4.** Картографическое моделирование эколого-географической ниши *Ipomoea hederacea*. Штриховкой показан фактический ареал вида по EDDMapS (2020), серой заливкой – экологически пригодные территории по отдельным факторам (а, б) и территория эколого-географической ниши (с)

**Figure 4.** Cartographic modeling of the ecological and geographical niche of *Ipomoea hederacea*.

The hatching shows the actual range of the species according to EDDMapS (2020), and the gray fill shows the ecologically suitable areas according to individual factors (a, b) and the area of the ecological and geographic niche (c)

Далее оба растра сводятся в один таким образом, чтобы в итоговом растре были представлены только пиксели зоны, пригодной для произрастания *I. hederacea* одновременно по обоим факторам (рис. 4с). Эта выделенная территория может считаться упрощенным представлением **эколого-географической ниши**, потенциально пригодной для распространения и натурализации *I. hederacea*. При использовании в моделировании глобальных карт факторов среды, создаваемая карта эколого-географической ниши описывает не только актуальный (современный) ареал *I. hederacea*, но также и территории, которые потенциально пригодны для распространения вида, и в

будущем могут быть заняты *I. hederacea* в случае ее заноса на другие континенты.

Отметим хорошее совпадение площади фактического ареала и смоделированной эколого-географической ниши (рис. 4с). Показателями точности модели может служить комплетность (К) – процент площади фактического ареала, вошедшей в площадь смоделированной эколого-географической ниши, и показатель избыточности модели (И) – процент площади территории, вошедшей в модельную территорию, но не входящей при этом в площадь фактического ареала (рис. 4). В нашем варианте в площадь смоделированной ниши на территории Северной Америки входит 3142400 км<sup>2</sup> от общей площади

фактического североамериканского ареала *I. hederacea* равной 3170700 км<sup>2</sup>, то есть  $K = 99.1\%$ . Избыточная территория, вошедшая в площадь смоделированной ниши, но не входящая в площадь фактического ареала, составляет 273700 км<sup>2</sup>, то есть  $I = 8.6\%$  от общей площади ареала. Дисбаланс в сторону избыточности модели связан с необходимостью максимальной предикативности оценки риска. Максимальная предикативность риска достигается при этом некоторым увеличением площади прогнозируемой территории. Конвертные модели характеризуются высокой степенью универсальности, поэтому можно предположить, что предложенная глобальная модель будет характеризоваться сходной точностью и для территории РФ. Дальнейшие этапы валидации модели могут осуществляться при возможности привлечения дополнительных данных о распространении вида, не использованных при моделировании. Например, пригодность выявляемых моделью на западе территории США и Мексики анклавов

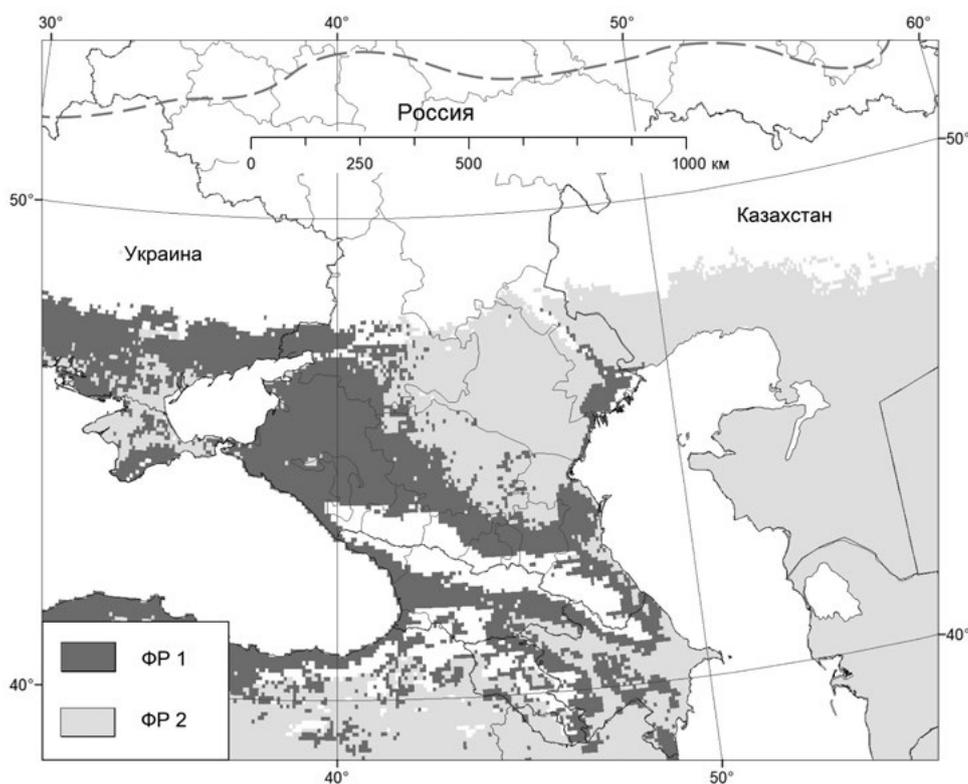
эколого-географической ниши ипомеи подтверждается фактическими местоположениями вида, обнаруживаемыми при наложении на карту ниши не использованных в анализе и моделировании точек местонахождений ипомеи из базы данных GBIF. Дополнительным этапом валидации может стать проведение специальных натурных обследований.

При анализе и моделировании распространения биообъектов могут быть использованы и другие технологии, а также различное как универсальное, так и специализированное программное обеспечение, такое как MaxEnt (Phillips, 2006), Random Forest (Breiman, 2001), CLIMEX (Hearne Software), Maxlike (Chandler et al., 2017) и др. При использовании разных средств анализа и моделирования эколого-географической ниши представленный концепт остается актуальным. Дополнительный анализ позволяет выявить сопряженное воздействие экологических факторов на биообъект и учесть его в моделировании ниши.

### Оценка фитосанитарного риска

Территория, входящая в эколого-географическую нишу вида, является зоной фитосанитарного риска распространения *I. hederacea*. В соответствии с рассмотренной выше глобальной моделью эколого-географической ниши, зона риска распространения ипомеи в России включает территории Южного федерального округа в пределах

Краснодарского и Ставропольского краев, республик Адыгея, Дагестан, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Калмыкия, Карачаево-Черкессия, Крым, Северная Осетия, Чеченская, а также области Астраханскую и Ростовскую (рис. 5; табл. 1).



**Рисунок 5.** Фрагмент карты эколого-географической ниши *Ipomoea hederacea* на территории РФ и сопредельных стран.

Зона фитосанитарного риска (ФР 1) – зона, экологически пригодная для *I. hederacea* по условиям тепло- и влагообеспеченности; зона фитосанитарного риска для условий орошаемого земледелия (ФР 2) – зона, пригодная для *I. hederacea* по условиям только теплообеспеченности. Пунктиром показана потенциальная северная граница эколого-географической ниши для раннеспелых генотипов

**Figure 5.** Fragment of the map of the *Ipomoea hederacea* ecological and geographical niche in the Russian Federation and neighboring countries. The zone of phytosanitary risk (PR 1) is the area suitable for *I. hederacea* in relation to heat and moisture supply; the zone of phytosanitary risk under the irrigated agriculture (PR 2) is an area suitable for *I. hederacea* in terms of heat supply only. The dashed line shows the potential northern boundary of the ecological and geographical niche for early-ripening genotypes

**Таблица 1.** Площади фитосанитарного риска по областям РФ (одновременно по условиям тепло- и влагообеспеченности)

**Table 1.** Areas of phytosanitary risk in the regions of the Russian Federation (simultaneously by heat and moisture conditions)

| Регион                          | S, км <sup>2</sup> | S, % |
|---------------------------------|--------------------|------|
| Краснодарский край              | 69190              | 91.0 |
| Ставропольский край             | 27790              | 42.0 |
| Ростовская область              | 27460              | 27.2 |
| Респ. Дагестан                  | 18020              | 35.8 |
| Респ. Крым                      | 9090               | 33.6 |
| Чеченская Респ.                 | 8890               | 51.4 |
| Респ. Адыгея                    | 5860               | 75.1 |
| Кабардино-Балкарская Республика | 6150               | 49.3 |
| Респ. Северная Осетия - Алания  | 5280               | 66.0 |
| Астраханская область            | 8160               | 18.5 |
| Респ. Ингушетия                 | 2710               | 73.5 |
| Карачаево-Черкесская Республика | 3780               | 26.8 |
| Респ. Калмыкия                  | 1050               | 1.4  |

Следует отметить, что некоторые генотипы *I. hederacea* нейтральны по отношению к фотопериоду. Наиболее характерно это для садовых декоративных форм. Фотопериодически нейтральные генотипы способны рано зацветать даже в условиях длинного дня и давать семена. Опыты,

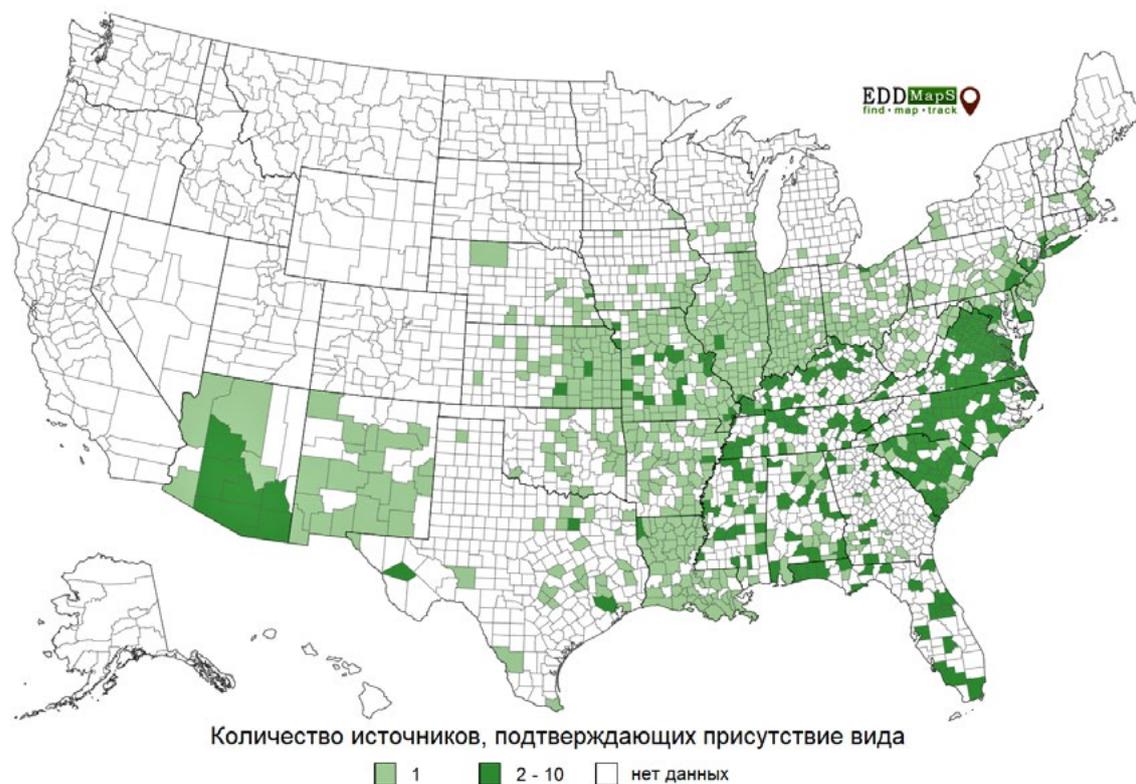
проведенные специалистами ВНИИКР, показали, что раннеспелые генотипы ипомеи плющевидной в условиях опытного чистого посева успевают сформировать зрелые плоды за период вегетации в условиях Воронежской и Курской области, но не успевают вызревать в условиях Московской области (Москаленко, 2001). Учитывая этот факт, мы отмечаем границу экологической пригодности в рамках фундаментальной экологической ниши *I. hederacea* по изолинии сумм активных температур характерных для Курской и Воронежской областей (САТ = 3200, без учета фотопериода). Указанная граница не соответствует современному фактическому распространению вида в смысле образования самоподдерживающихся популяций, но может отражать потенциал распространения раннеспелых фотопериодически нейтральных генотипов ипомеи в условиях пониженного биотического пресса.

С учетом территории орошаемого земледелия зона фитосанитарного риска может быть расширена. В нее может быть включена вся территория с достаточной для *I. hederacea* теплообеспеченностью вне зависимости от природной влагообеспеченности. В случае применения искусственного орошения вся прежде неорошаемая территория, характеризующаяся достаточной теплообеспеченностью, также становится зоной фитосанитарного риска (рис. 5, зона ФР 2).

#### Возможности детализации карт фитосанитарного риска

Более детализированные и точные карты фитосанитарного риска могут быть составлены при наличии информации о частоте встречаемости и натурализации объекта в областях его современного распространения. В частности,

на карте распространения *I. hederacea* в США дана информация о частоте встречаемости *I. hederacea*, представленная в нескольких градациях (рис. 6).



**Рисунок 6.** Карта распространения *Ipomoea hederacea* в США в градациях количества источников, где указано наличие вида (EDDMapS, 2020)

**Figure 6.** Map of *Ipomoea hederacea* distribution in the United States with the number of sources where the species is reported as present (EDDMapS, 2020)

Если считать представленную на карте территорию наиболее частой встречаемости *I. hederacea* по литературным источникам зоной ее экологического оптимума, территорию редкой встречаемости – зоной экологического пессимума, а анклав – зоной интразональной встречаемости, тогда становится возможным по каждому лимитирующему фактору определить экологические границы *I. hederacea* в грациях экологических оптимумов и пессимумов (Афонин и др., 2019). Это позволяет показать фитосанитарный риск на картах дифференцированно – в экологических грациях (рис. 7а).

Как видно из карты (рис. 7с) и таблицы 2, на территории России нет зон экологического оптимума *I. hederacea* одновременно по отношению к факторам тепло- и влагообеспеченности. Зона фитосанитарного риска представлена фрагментами территорий с различным сочетанием пессимальности по обоим лимитирующим факторам. Например, в Краснодарском крае 91 % территории в большей или меньшей степени экологически потенциально пригоден для натурализации *I. hederacea*: из них 46 % территории края составляют зону пессимальной пригодности по фактору теплообеспеченности и при этом интразональной по фактору влагообеспеченности; 21 % территории составляет зону пессимальной пригодности по обоим факторам; 18 % территории оптимальны по влагообеспеченности и пессимальны по теплообеспеченности. Территория,

оптимальная для *I. hederacea* по фактору теплообеспеченности, встречается в РФ только в Дагестане и составляет менее 2 % от общей площади республики, при этом выделяемая площадь в основном неблагоприятна по отношению к фактору влажности. С учетом орошаемых земель территория потенциально возможной натурализации может существенно расширяться для Калмыкии, Крыма, Астраханской области, Ростовской области, Ставропольского края (рис. 7с).

Из сопредельных стран экологически оптимальные районы по отношению к обоим рассмотренным лимитирующим факторам имеются на территории Грузии и Среднеазиатских республик. В случае проникновения *I. hederacea* в Грузию и Среднюю Азию, особое внимание в работе пограничных карантинных служб должно быть уделено возможности проникновения вида в РФ из этих сопредельных республик.

Отметим, что эколого-географический анализ распространения *I. hederacea*, выбранной нами в качестве модельного вида для представления концепции анализа и моделирования, проведен только по литературным данным о распространении вида. Важным этапом эколого-географического моделирования может быть натурная валидация и уточнение модели экологической ниши по результатам экспедиционных обследований в первичном и вторичном ареалах вида.

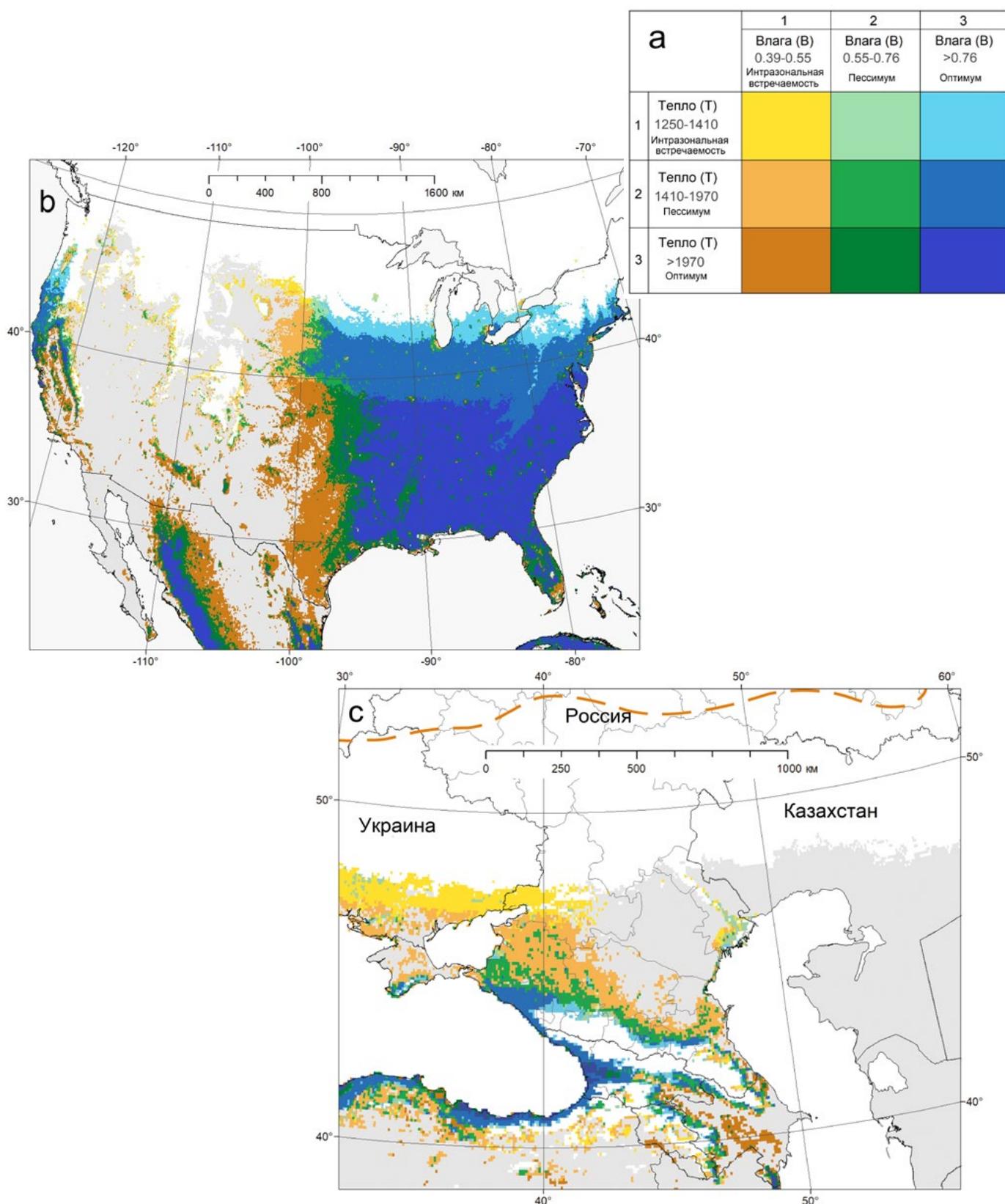
**Таблица 2.** Дифференцированная экологическая оценка риска натурализации *Ipomoea hederacea* на территории России и сопредельных стран

**Table 2.** Differentiated ecological assessment of *Ipomoea hederacea* naturalization risk in Russia and neighboring countries

| Регион                          | S эко ниши км <sup>2</sup> | S эко/ S обл, % | 1Т:1В*, % | 2Т:1В, % | 3Т:1В, % | 1Т:2В, % | 2Т:2В, % | 3Т:2В, % | 1Т:3В, % | 2Т:3В, % | 3Т:3В, % | 1-3Т:0В, % |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Краснодарский край              | 69190                      | 91.1            | 0.6       | 46.3     | 0        | 1        | 20.9     | 0.1      | 4.5      | 17.7     | 0        | 3          |
| Ставропольский край             | 27790                      | 41.9            | 0.4       | 34.2     | 0        | 1.1      | 5.8      | 0        | 0.2      | 0.2      | 0        | 58         |
| Ростовская область              | 27460                      | 27.2            | 17.9      | 8.3      | 0        | 0.7      | 0.2      | 0        | 0.1      | 0        | 0        | 26.1       |
| Респ. Дагестан                  | 18020                      | 35.8            | 2.2       | 17.9     | 1.6      | 2.1      | 7.6      | 0        | 1.8      | 2.6      | 0        | 32.5       |
| Чеченская Респ.                 | 8890                       | 51.4            | 0         | 24.2     | 0        | 0        | 11.5     | 0        | 3.2      | 12.5     | 0        | 25.4       |
| Респ. Адыгея                    | 5860                       | 75.1            | 0         | 8.6      | 0        | 0        | 36.5     | 0        | 11       | 19       | 0        | 7.4        |
| Кабардино-Балкарская Республика | 6150                       | 49.4            | 0         | 11.8     | 0        | 2.9      | 25.9     | 0        | 5.8      | 3        | 0        | 1.7        |
| Респ. Северная Осетия           | 5280                       | 66.1            | 0         | 12.7     | 0        | 2.3      | 18.6     | 0        | 21.5     | 11       | 0        | 1.5        |
| Астраханская область            | 8160                       | 18.6            | 6.5       | 2.4      | 0        | 8.9      | 0.4      | 0        | 0.4      | 0        | 0        | 58         |
| Респ. Ингушетия                 | 2710                       | 73.4            | 0         | 33.6     | 0        | 0        | 23.3     | 0        | 11       | 5.5      | 0        | 0          |
| Карачаево-Черкесская Республика | 3780                       | 26.8            | 1         | 1.9      | 0        | 8.9      | 7.2      | 0        | 7.8      | 0        | 0        | 0.6        |
| Респ. Калмыкия                  | 1050                       | 1.4             | 0.1       | 1.1      | 0        | 0        | 0.2      | 0        | 0        | 0        | 0        | 98         |
| Респ. Крым                      | 9090                       | 33.6            | 0         | 22.2     | 0        | 1        | 3.1      | 0        | 3.3      | 4        | 0        | 65.2       |
| Украина                         | 82200                      | 13.4            | 7.3       | 4.7      | 0        | 1.1      | 0.1      | 0.2      | 0        | 0        | 0        | 4.6        |
| Грузия                          | 23600                      | 33.8            | 0         | 5.1      | 3.1      | 0.9      | 6.3      | 1.9      | 6.6      | 5.1      | 4.8      | 5.4        |
| Азербайджан                     | 33970                      | 39.1            | 0.1       | 3.1      | 18.6     | 0.9      | 7.7      | 2.3      | 0.8      | 4.3      | 1.3      | 0          |
| Казахстан                       | 26600                      | 0.8             | 0.4       | 0.4      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 36.4       |

(\*) Примечание: маркировка названия и цвет заголовков столбцов таблицы соответствует классу территории, в экологических грациях, указанных в ординационной матрице (рис. 7а). Территория экологически непригодная по фактору влагообеспеченности в площадь эколого-географической ниши не включена.

(\*) Note: the name and the color of the column headings of the table correspond to the rank of the area in the ecological gradations shown in the ordination matrix (Fig. 7a). The unsuitable area in relation to the moisture factor is not included in the area of the ecological-geographical niche.



**Рисунок 7.** Карта фитосанитарного риска распространения и натурализации *Ipomoea hederacea* в градациях экологических оптимумов и пессимумов. 7а – ординационная матрица-легенда градаций экологической пригодности территорий по потребностям вида к суммам температур и влаги; 7б, 7с – карты зон фитосанитарного риска в градациях экологических оптимумов и пессимумов для территорий США и России. Серым показана зона фитосанитарного риска для орошаемых земель

**Figure 7.** Map of phytosanitary risk of *Ipomoea hederacea* spread and naturalization in gradations of ecological optimums and pessimisms. 7a - ordination matrix and legend of the ecological suitability gradations of territories according to the species requirements to degree-days and moisture; 7b, 7c - maps of phytosanitary risk zones in gradations of ecological optimums and pessimisms for the USA and Russia. The grey is zone of phytosanitary risk for irrigated lands

### Заключение

Технологии эколого-географического моделирования ниш представляются необходимым элементом для системы анализа, оценки и мониторинга фитосанитарного риска. Для функционирования системы необходимо иметь базы данных о современном распространении, натурализации и вредоносности биологических объектов, представляющих потенциальную угрозу проникновения или дальнейшего их распространения по территории РФ. Поскольку распространение разных вредоносных объектов может лимитироваться различными экологическими факторами среды, следует предусмотреть необходимость работ по созданию уточненных компьютерных ГИС-карт экологических факторов среды, лимитирующих распространение вредных объектов. Сопряженное воздействие экологических факторов на биообъект в рамках использования описанной технологии моделирования также может быть учтено созданием и использованием экологических карт, количественно описывающих пространственное распределение рассчитанных комплексных экологических показателей. Простым примером таких карт могут служить разнообразные карты гидротермических индексов, учитывающих одновременное сопряженное влияние на организмы осадков и температур. Эколого-географический анализ и моделирование может проводиться посредством широко

используемых универсальных ГИС программ: ArcGIS (ESRI, 2011), QGIS (<http://qgis.org>) и других. Вспомогательными инструментами могут служить специализированные программные пакеты и алгоритмы: Maxent (Phillips et al., 2006), Random Forest (Breiman, 2001) и другие. Результатом эколого-географического анализа и моделирования является создание карт экологического потенциала или вероятностей распространения вредоносных объектов. Подобные карты служат основой для количественной и вместе с тем адресной оценки риска проникновения и натурализации вредоносных видов. Полученная при этом информация необходима при составлении списков карантинных видов, выборе направлений профилактических фитосанитарных обследований, а в случае проникновения вредного объекта на территорию РФ, может служить основой для оперативного адресного применения комплекса мер противодействия распространению вредного объекта. Это позволяет значительно повысить эффективность превентивных и защитных мероприятий, поскольку при наличии карт потенциального распространения вредного объекта основные оперативные действия сосредотачиваются именно и точно в районах, для которых существует наибольшая угроза закрепления и распространения вредного объекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00610А.

Выражаем благодарность Москаленко Галине Павловне за ценную консультационную помощь.

### Библиографический список (References)

- Афонин АН, Соколова ЮВ (2018) Эколого-географический анализ и моделирование распространения биологических объектов с использованием ГИС. СПб.: Изд-во ВВМ. 121 с.
- Афонин АН, Федорова ЮА, Ли ЮС (2019) Характеристика частоты встречаемости и обилия амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.) В связи с оценкой потенциала ее распространения на европейской территории России. *Российский Журнал Биологических Инвазий* 12(2):30–38
- Афонин АН, Милютин ЕА, Федорова ЮА (2019) Создание глобальных карт сумм активных температур в связи с составлением долгосрочных прогнозов распространения биологических объектов. Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: Материалы международной научно-практической конференции. 1:32–34
- Вредители, болезни и сорняки, обнаруженные в импортных растительных грузах (Всесоюзная сводка с 1937 по 1959 гг.). – М.: Издательство Колос, 1964. – 614 с.
- ГОСТ 34309-2017 Карантин растений. Анализ фитосанитарного риска для карантинных вредных организмов. Структура и требования (2017) <http://docs.cntd.ru/document/1200158016> (27.11.2020)
- Кельчевская ЛС (1971) Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеиздат. 216 с.
- Москаленко ГП (2001) Карантинные сорные растения России. М: Гос. инспекция по карантину растений Рос. Федерации. 277 с.
- МСФМ №11 (2017) Анализ фитосанитарного риска для карантинных вредных организмов. ФАО. [https://www.ippc.int/static/media/files/publication/ru/2019/06/ISPM\\_11\\_2013\\_Ru\\_2019-06-13\\_PostCPM-14\\_InkAm.pdf](https://www.ippc.int/static/media/files/publication/ru/2019/06/ISPM_11_2013_Ru_2019-06-13_PostCPM-14_InkAm.pdf) (27.11.2020)
- Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 30 ноября 2016 года № 158 «Об утверждении единого перечня карантинных объектов Евразийского экономического союза». <http://docs.cntd.ru/document/456047397/> (07.01.2021)
- Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 05.02.2018 №46 «Об утверждении Методики осуществления анализа фитосанитарного риска». <http://docs.cntd.ru/document/542618212> (27.11.2020)
- Ситникова НВ (2013) Карантинные сорные растения. Учебное пособие. Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный Университет. 141 с.
- Федеральный закон «О карантине растений» №206-ФЗ (2014) <http://docs.cntd.ru/document/420208822> (27.11.2020)
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45(1):5–32
- Chandler R, Royle A, Kindt R (2019) Model Species Distributions by Estimating the Probability of Occurrence

- Using Presence-Only Data. R Package. <https://cran.r-project.org/web/packages/maxlike/maxlike.pdf> (27.11.2020)
- Clark Labs (2012). IDRISI Selva 17.0. Clark University Clark University, Worcester MA
- Didan K (2015) *MOD13C1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG V006*. [Набор данных]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13C1.006>
- EDDMapS (2020). Early Detection & Distribution Mapping System. The University of Georgia – Center for Invasive Species and Ecosystem Health. <http://www.eddmaps.org/> (27.11.2020)
- EPPO (2019) EPPO Global Database. *Ipomoea hederacea* distribution. <https://gd.eppo.int/taxon/IPOHE/distribution> (27.11.2020)
- Erwin A (2013) *Ipomoea hederacea* on Michigan Plant Diversity Website, University of Michigan. Sondag R, Burnham RJ (eds.) <http://climbers.lsa.umich.edu/?p=237> (27.11.2020)
- ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10.4.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute
- GBIF.org (2019) *Ipomoea hederacea* GBIF Occurrence Download, 18 June 2019 [Набор данных]. <https://doi.org/10.15468/dl.wxat3r>
- Hutchinson GE (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harbour Symposia on Quantitative Biology* 22:415–427
- Imamura S., Takimoto A (1955) Photoperiodic Responses in Japanese Morning Glory, *Pharbitis nil* Choisy, a Sensitive Short Day Plant. *Bot Mag (Tokyo)* 68:235–241.
- Nix HA (1986) A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *Atlas of Australian Elapid Snakes* 7:4–15
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Modell* 190:231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- USDA (2019) Natural Resource Conservation Service, The PLANTS Database. <https://plants.sc.egov.usda.gov/core/profile?symbol=IPHE> (27.11.2020)
- Wan Z, Hook S, Hulley G (2015) MOD11C3 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006. [Набор данных]. NASA EOSDIS LP DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11C3.006> (27.11.2020)
- Wilson HP, Cole RH (1966) Morningglory Competition in Soybeans. *Weeds* 14(1):49–51. <https://doi.org/10.2307/4041122>
- Zia-Ul-Haq M, Riaz M, De Feo V (2012) *Ipomoea hederacea* Jacq.: A Medicinal Herb with Promising Health Benefits. *Molecules* 17(11):13132–13145. <https://doi.org/10.3390/molecules171113132>

#### Translation of Russian References

- Afonin AN, Sokolova YV (2018) [Ecological-geographical analysis and biological objects distribution modelling using GIS]. Saint-Petersburg: VVM Publ. 121 p. (In Russian)
- Afonin AN, Fedorova YA, Li YuS (2019) [Characterization of the occurrence and abundance of the common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) with regard to assessment of its expansion potential in European Russia]. *Russian Journal of Biological Invasions* 10(3):220–226 <https://doi.org/10.1134/S2075111719030032> (In Russian)
- Afonin AN, Miliutina EA, Fedorova YA (2019) [Creating global degree day maps in relation to making long-term forecasts of biological objects distribution]. Global climatic changes: regional effects, models, forecasts: Materials of international scientific–practical conference. 1:32–34 (In Russian)
- GOST 34309-2017 Plant quarantine. Pest risk analysis for quarantine pests. The structure and requirements (2017) <http://docs.cntd.ru/document/1200158016> (27.11.2020) (In Russian)
- Kelchevskaya LS (1971) [Methods of processing the observations in agroclimatology]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 216 p. (In Russian)
- Moskalenko GP (2001) [Quarantine weed plants of Russia]. Moscow: Gos.Inspektsiya po karantinu rasteniy Ros. Federatsii. 277 p. (In Russian)
- ISPM №11 (International standards for phytosanitary measures №11) Pest risk analysis for quarantine pests (2017) FAO. <http://www.fao.org/3/a-j1302e.pdf> (27.11.2020)
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation from 15.12.2014 № 501 «On the approval of the List of quarantine objects». <http://docs.cntd.ru/document/420245004> (27.11.2020) (In Russian)
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation from 05.02.2018 №46 «On the Methodology of phytosanitary risk analysis». <http://docs.cntd.ru/document/542618212> (27.11.2020) (In Russian)
- Sitnikova NV (2013) [Quarantine weed plants. Textbook]. Kazan: Kazan Federal University Publ. 141 p. (In Russian)
- [Federal law «On plant quarantine» №206-FL]. (2014) <http://docs.cntd.ru/document/420208822> (27.11.2020) (In Russian)

## ENVIRONMENTAL NICHE MODELLING AS TOOL FOR PEST RISK ASSESSMENT

A.N. Afonin<sup>1\*</sup>, Yu.Yu. Kulakova<sup>2</sup>, Yu.A. Fedorova<sup>3</sup><sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*<sup>2</sup>*All-Russian Plant Quarantine Center, Moscow, Russia*<sup>3</sup>*Institute of Biology, Ufa Research Centre of Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia*\*corresponding author, e-mail: [afonin-biogis@yandex.ru](mailto:afonin-biogis@yandex.ru)

The article reviews the concept and technology of pest risk assessment for the spread of quarantine species based on ecological and geographical analysis and ecological niche modeling. Using a quarantine species *Ipomoea hederacea* (L.) Jacq. as an example, we calculated the ecological requirements of the species. The main ecological factors limiting the spread of *I. hederacea* were determined and the ecological amplitudes of the species in relation to each factor limiting its distribution were quantitatively estimated. We identified ecologically suitable habitats and compiled a map of the ecological-geographical niche of the species using specially created environmental maps based on the obtained data of the ecological limits of the species. Using the map of the ecological-geographical niche, the *I. hederacea* distribution risk in the regions of the Russian Federation was estimated. Similar maps can be used for basis of quantitative as well as targeted risk assessment of penetration and establishment of harmful organisms. Obtained information will be useful to compile lists of quarantine species, estimate the potential areas of geographic distribution of pests into Russian Federation, and make decisions for introduction of effective phytosanitary measures to prevent the penetration of these invasive organisms. It can also be used as the basis for organizing and conducting phytosanitary monitoring in the Russian Federation.

**Keywords:** ecological-geographical niche, GIS, invasion, quarantine species, *Ipomoea hederacea*

Received: 12.11.2020

Accepted: 18.02.2021