

На правах рукописи



КУТУЕВА АЛИЯ ГАЛЕЕВНА

**АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИДОВ-РЕЛИКТОВ ПЛЕЙСТОЦЕНОВОГО
КОМПЛЕКСА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ И ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ НА
ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

1.5.15 – Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

УФА – 2022

Работа выполнена в Уфимском Институте биологии – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Научный руководитель: доктор биологических наук, доцент
Федоров Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Розенберг Геннадий Самуилович**
доктор биологических наук, профессор, чл.-корр. РАН, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории моделирования и управления экосистемами

Кашин Александр Степанович

доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», профессор кафедры генетики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «___» _____ 2022г. в ___ ч. на заседании диссертационного совета 24.2.281.02 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, корп.1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, можно присылать по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, кафедра биологии и экологии.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Кулагина Екатерина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С середины прошлого века отмечаются сильные климатические изменения, выражающиеся в увеличении температуры и перераспределении летних и зимних осадков (Барталев и др., 2008; Второй оценочный доклад ..., 2014; IPCC, 2021 и др.). Эти изменения оказывают сильное влияние на биоразнообразие и состояние растительного покрова (Bellard et al., 2012; Garcia et al., 2014 и др.). На Южном Урале к потенциально уязвимым видам относятся реликтовые виды, которые были распространены в плейстоцене и сохранились в наиболее благоприятных для них местообитаниях. Среди них есть виды с достаточно широким распространением (*Lathyrus gmelinii* Fritsch, *Allium rubens* Schrad. ex Willd., *Thalictrum foetidum* L. и др.) и 45 видов, сохранившихся в ограниченном числе локалитетов, в связи с чем они занесены в Красную книгу Республики Башкортостан (2021). Охрана редких видов растений плейстоценового комплекса в условиях антропогенного влияния и климатических изменений может потребовать существенной коррекции системы природоохранных мер, которые должны базироваться на основе прогноза сохранения условий произрастания видов в различных естественных местообитаниях (Thomas et al., 2012; Larsen et al., 2015; Fedorov et al., 2021 и др.). Прогноз позволит определить приоритетные популяции для сохранения этих видов и разработать рекомендации по реинтродукции наиболее ценных неустойчивых к климатическим изменениям популяций (Мулдашев и др., 2011; Мартыненко и др., 2013; Dufлот et al., 2018). Кроме того, эти виды могут быть использованы в качестве индикаторов происходящих изменений климата (Lin, Chiu, 2019; Chen et al., 2020 и др.).

Для прогноза изменения условий местообитания редких видов растений широко используются методы математического моделирования (Elith, Leathwick, 2009; Barlow et al., 2021; Смирнов и др., 2021 и др.), среди которых наиболее часто используется метод максимальной энтропии (Phillips et al., 2017). Несмотря на значительный интерес к моделированию распространения редких видов в России (Санданов, Найданов, 2015; Санданов и др., 2020; Ibrahimova, 2020; Kashin et al., 2020 и др.), работы, посвященные редким реликтовым видам плейстоценового комплекса, единичны (Чурюлина, Бочарников, 2019; Vaikov et al., 2021).

Цель работы – анализ закономерностей современного распространения редких видов растений плейстоценового комплекса на Южном Урале и прогноз влияния климатических изменений на условия их местообитания.

Задачи:

1. Создание базы данных по распространению редких видов растений, являющихся на Южном Урале реликтами плейстоценового комплекса, с использованием гербарных сборов, литературных данных, агрегатора данных GBIF (Global Biodiversity Information Facility).

2. Анализ особенностей современного распространения редких видов растений плейстоценового комплекса на Южном Урале.

3. Анализ потенциальных ареалов модельных видов растений плейстоценового комплекса на Южном Урале и сопредельных территориях и факторов, определяющих распространение этих реликтовых видов плейстоценового комплекса на Южном Урале.

4. Прогноз изменения условий местообитания реликтовых видов на Южном Урале в зависимости от различных сценариев изменения климата по ансамблю климатических моделей.

5. Оценка необходимости изменения мер охраны редких видов растений плейстоценового комплекса в зависимости от охвата их локалитетов существующими особо охраняемыми природными территориями (ООПТ) и прогноза их устойчивости к изменениям климата.

Научная новизна. Впервые с использованием ГИС-технологий проанализированы закономерности современного распространения всех редких видов растений плейстоценового комплекса на Южном Урале. Впервые в России проанализировано влияние климатических изменений на пригодность условий местообитания семи редких видов растений плейстоценового комплекса. Разработан новый подход для прогнозирования сохранения условий местообитания редких реликтовых видов, который заключается в анализе охвата локалитетов редких реликтовых видов современной системой ООПТ и прогнозе сохранения условий местообитания в конкретных локалитетах. Изменение пригодности условий местообитания видов плейстоценового комплекса при климатических изменениях может характеризоваться двумя трендами в зависимости от их принадлежности к эколого-ценотическим группам: 1) снижение пригодности местообитания; 2) возрастание пригодности местообитания с последующим снижением при длительном влиянии климатических изменений. Уточнены экологические особенности отдельных реликтовых видов плейстоценового комплекса. Показано, что *Zigadenus sibiricus* (L.) A. Gray является факультативным кальцефилом, а вид *Patrinia sibirica* Juss. следует относить не к горно-лесостепным, а к высокогорным скальным видам, имеющим реликтовые местообитания на выходах горных пород в петрофитных степях.

Научно-практическая значимость работы. На примере Южного Урала разработан алгоритм анализа закономерностей распространения редких видов в регионе, а также выявления территорий с высоким разнообразием этих видов и оценки их охвата системой существующих ООПТ. Предлагаемый подход позволяет существенно снизить временные и финансовые затраты на проведение работ по проектированию новых ООПТ для оптимизации охраны редких и исчезающих видов растений. Разработана методика подбора мест для реинтродукции наиболее неустойчивых в условиях климатических изменений видов плейстоценового комплекса. Популяции реликтовых видов плейстоценового комплекса могут быть использованы для мониторинга климатических изменений. Разработанные подходы вносят вклад в сохранение биоразнообразия Южного Урала и могут быть использованы в качестве научной основы для совершенствования системы сохранения редких видов в других регионах РФ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. У реликтовых видов плейстоценового комплекса потенциальные ареалы на Южном Урале шире области их современного распространения, что связано с историей формирования растительности региона, в том числе с антропогенными факторами: вырубкой хвойных лесов в Предуралье и на западном макросклоне Южного Урала, осушением болот, интенсивным выпасом скота и сбором растений населением.

2. Изменение пригодности условий местообитания редких плейстоценовых видов при климатических изменениях зависит от широты экологических амплитуд этих видов и изменения распространения растительных сообществ, являющихся их основными местообитаниями.

3. Выделение региональных эколого-ценотических групп редких реликтовых видов плейстоценового комплекса позволяет прогнозировать реакцию на изменение климата наиболее редких видов, для которых нет возможности проведения моделирования из-за малого количества находок этих видов.

4. Анализ изменения пригодности условий местообитания в известных локалитетах у неустойчивых к изменению климата редких видов позволяет выявить приоритеты сохранения их отдельных популяций и откорректировать существующие меры охраны с учетом изменения климата. Виды растений плейстоценового комплекса могут быть использованы при мониторинге текущих климатических изменений.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на VI Всероссийской конференции с международным участием «Экобиотех-2019» (г. Уфа, 2019), на III Национальной научной конференции с международным участием «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия», посвященной 100-летию со дня рождения академика РАН П.Л. Горчаковского (г. Екатеринбург, 2020), на II Международной научной конференции «Растительность Восточной Европы и Северной Азии» (г. Брянск, 2020), на IX международном симпозиуме «Степи Северной Евразии» (г. Оренбург, 2021), а также на VII Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию УИБ УФИЦ РАН и 70-летию Уфимского научного центра РАН «Экобиотех-2021» (г. Уфа, 2021).

Поддержка исследования. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-34-90028–Аспиранты «Прогноз влияния климатических изменений на распространение редких видов-реликтов плейстоценового комплекса на Южном Урале», часть исследований проведено в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (шифр конкурса НОЦ-РМГ-2021), а также гранта РНФ № 22-14-00003 «Оценка и прогноз состояния уязвимых экосистем Южно-Уральского региона в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в базе данных WoS и две – в журналах, входящих в список ВАК.

Личное участие автора. Автор непосредственно участвовал в постановке цели и задач исследования, сборе материалов, анализе и обработке полученных результатов, а также – совместно с научным руководителем – в подготовке статей и материалов к публикации по теме диссертации. Текст диссертации написан автором лично.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 157 страницах, состоит из введения, 6 глав, выводов и списка литературы, содержит 46 рисунков. Список цитируемой литературы включает 328 источников, из них 141 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает большую признательность за помощь в сборе данных к.б.н. А.А. Мулдашеву, д.б.н. Н.Н. Лашинскому и к.б.н. А.В. Верховиной, а

также д.б.н. Э.З. Баишевой, д.б.н., проф. В.Б. Мартыненко и Ю.А. Федоровой за консультации и критические замечания. Автор особенно благодарна своему научному руководителю – д.б.н. Федорову Николаю Ивановичу.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В главе представлен обзор истории изучения редких видов растений плейстоценового комплекса, произрастающих на территории Южного Урала (Крашенинников, 1939; Горчаковский, 1969; Куликов, 2005; Мулдашев и др., 2016 и др.). Рассмотрены их классификации по происхождению, основному распространению и ботанико-географическим особенностям (Горчаковский, Шурова, 1982; Куликов, 2005). Рассмотрены изменения климата и растительного покрова в периоды плейстоцена и голоцена (Горчаковский, 1968; Хотинский и др., 1982; Дерягин и др., 2010 и др.) и тенденция изменения климата на Южном Урале в настоящее время (Шиятов, 1983; Фомин, 2009; Второй оценочный доклад ..., 2014 и др.). Охарактеризованы основные подходы к моделированию влияния климатических изменений на распространение редких видов (Thomas et al., 2004; Elith, Leathwick, 2009; Lannuzel et al., 2021 и др.). Более подробно рассмотрены методы моделирования распространения видов (SDM) (Kearney et al., 2010; Yates et al., 2018; Hijmans, Elith, 2019 и др.) и их использование при прогнозировании влияния климатических изменений на редкие виды (Hernandez et al., 2006; Moss et al., 2008; Смирнов и др., 2021 и др.).

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика района исследования. В главе приведена краткая характеристика географического положения, особенностей рельефа, природно-климатических условий, ботанико-географического районирования и растительности Южного Урала, большая часть которого расположена на территории Республики Башкортостан (Горчаковский, 1988; Абдрахманов и др., 2005; Позднякова, Богдан, 2020 и др.). На исследуемой территории выделяются широколиственно-лесная, бореально-лесная, лесостепная и степная зоны растительности, а в горной части Южного Урала – гольцовые, подгольцовые, горно-лесные, горно-лесостепные и горно-степные пояса растительности (Горчаковский, 1988). Для Южного Урала характерен континентальный климат с резко выраженной разницей среднемесячных температур (Агроклиматические ..., 1976). В главе также охарактеризованы общие закономерности разнообразия и распространения почв в Республике Башкортостан (Почвы Башкортостана, 1995; Позднякова, Богдан, 2020).

Объекты исследования. В последнем издании Красной книги Республики Башкортостан (2021) к реликтам плейстоценового комплекса отнесено 45 видов, из которых 2 вида (*Paeonia hybrida* Pall. и *Ophrys insectifera* L.) входят в Красную книгу РФ (Красноборов, 2008; Аверьянов, 2008). Моделирование влияния климатических изменений проводилось для семи различающихся по экологии модельных реликтовых видов (*Patrinia sibirica*, *Allium obliquum* L., *Delphinium uralense* Nevski, *Zigadenus sibiricus*, *Linaria uralensis* Kotov (= *Linaria altaica* auct non. Fisch. ex Kuprian.), *Schoenus ferrugineus* L., *Gentianopsis barbata* (Froel.) Ma), у каждого из которых выявлено не

менее 20 местонахождений на территории Республики Башкортостан и сопредельных территориях.

Методы исследования. Для моделирования пригодности условий местообитания использованы географически привязанные точки местонахождений модельных видов на территории Южного Урала и в пределах их основных ареалов по гербарным сборам (гербарии UFA, IRK и др.), а также взятые из агрегатора данных по биоразнообразию GBIF (GBIF.org, 2021). Моделирование проводилось с использованием метода максимальной энтропии в программе MaxEnt v3.4.1k (Phillips et al., 2021). В качестве переменных (предикторов) использован набор 19 параметров среды BIOCLIM CHELSA с разрешением 30" (Booth et al., 2014; Karger et al., 2017), характеристики цифровой модели рельефа GMTED2010 (Danielson, Gesch, 2011) и почв (Poggio et al., 2021). При наличии значений корреляции между переменными среды больше или равных 0,8 (0,7 у *Schoenus ferrugineus*) одна из переменных исключалась (Dormann et al., 2013). Для прогнозирования изменения пригодности условий местообитания реликтовых видов при климатических изменениях использовались сценарии RCP4.5 и RCP8.5, соответствующие умеренной и сильной концентрации парниковых газов в атмосфере для двух временных периодов – 2041-2060 гг. (2050 г.) и 2061-2080 гг. (2070 г.) (Moss et al., 2010). Расчеты проводились по ансамблю из четырех климатических моделей: CCSM4, INMCM4, NorESM1-M и MIROC-ESM (Volodin et al., 2010; Gent et al., 2011; Watanabe et al., 2011; Bentsen et al., 2013). Для оценки нижней границы пригодности местообитания вида использован критерий «Maximum test sensitivity plus specificity» или самое низкое значение пригодности условий местообитания в известных локалитетах вида (Liu et al., 2016). Моделирование проводилось с пятикратной кросс-валидацией (Peterson et al., 2011; Merow et al., 2013). Для расчета площадей территорий с различной пригодностью условий местообитания использованы стандартные инструменты анализа растров в QGIS v.3.14.1.

Для анализа распределения редких видов плейстоценового комплекса на территории Республики Башкортостан и их охвата системой ООПТ использовалось сеточное картирование с ячейками сетки 6' по широте на 10' по долготу (10,8×10,2 км) и полигональный слой границ ООПТ (Fedorov et al., 2020).

ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЛИКТОВЫХ ВИДОВ ПЛЕЙСТОЦЕНОвого КОМПЛЕКСА

Реакция редких видов на климатические изменения зависит от изменения границ распространения растительных сообществ, к которым они приурочены. В связи с этим по эколого-ценотической приуроченности редкие виды плейстоценового комплекса Южного Урала были разделены на 8 групп. Распространение видов четырех наиболее многочисленных групп: высокогорных (19 видов: *Patrinia sibirica*, *Betula nana* L., *Carex aterrima* Норре и др.), горно-лесостепных (11 видов: *Delphinium uralense*, *Linaria uralensis*, *Phlox sibirica* L. и др.), лесных (4 вида: *Zigadenus sibiricus*, *Cardamine trifida* (Poir.) В.М. G. Jones, *Allium microdictyon* Prokh., *Schizachne callosa* (Turcz. ex Griseb.) Ohwi.), а также группы болотных и лугово-болотных видов (5 видов: *Schoenus ferrugineus*, *Gentianopsis barbata*, *Pinguicula vulgaris* L., *Carex serotina* Mérat, *Ophrys insectifera*) показано на рисунках 1 и 2. В остальные четыре группы входят по 1-2 вида: горно-лесные (*Melilotoides platycarpus* (L.) Soják, *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O.

Schwarz), степные (*Paeonia hybrida*), пойменные луговые на солонцеватых почвах (*Allium hymenorhizum* Ledeb., *Gentiana decumbens* L. fil.) и лугово-опушечные (*Allium obliquum*).

Большинство высокогорных видов произрастают преимущественно выше границы распространения леса (рис. 1А) и относятся к перигляциальным реликтам (Горчаковский, Шурова, 1982; Куликов, 2005). Виды группы горно-лесостепных реликтов произрастают преимущественно в петрофитных степях на восточном макросклоне Южного Урала, в Зауралье, на Зилаирском плато и на Бугульминско-Белебеевской возвышенности (рис. 1Б). Петрофитные степи имели широкое распространение в лесостепных ландшафтах плейстоцена (Горчаковский, 1968), и их достаточно широкое современное распространение связано с сохранением семиаридного климата на этих территориях, а также с формированием обнажений материнских пород вследствие водно-ветровой эрозии и интенсивного выпаса скота.

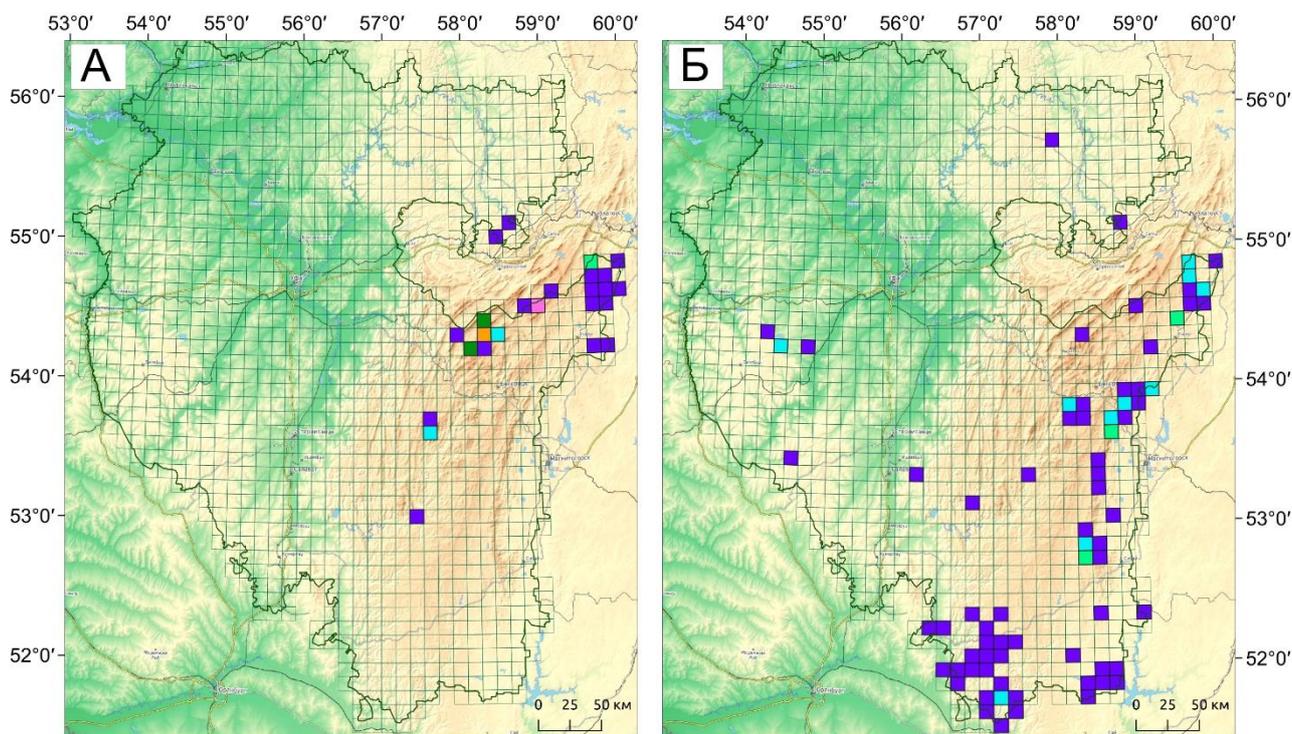


Рисунок 1 – Распространение видов высокогорной (А) и горно-лесостепной (Б) эколого-ценотических групп на территории Республики Башкортостан

Виды группы лесных реликтовых видов приурочены преимущественно к хвойным и смешанным хвойно-широколиственным лесам Южного Урала и Уфимского плато (рис. 2А). Большинство болотных лугово-болотных реликтов (рис. 2Б) произрастают на карбонатных болотах, распространение которых резко снизилось в XX веке вследствие осушения для добычи торфа и использования в качестве сельскохозяйственных угодий (Гуленок и др., 1989).

Таким образом, основными рефугиумами, в которых сохранились редкие виды плейстоценового комплекса, являются растительные сообщества выше границы распространения леса, петрофитные степи и болота. Кроме того, эти виды встречаются на скальных обнажениях и в редких зеленомошных типах хвойных лесов. Реликты плейстоценового комплекса практически отсутствуют в равнинной части Предуралья и на западном макросклоне Южного Урала, что связано с расширением

распространения широколиственных лесов в середине голоцена и антропогенным воздействием (Горчаковский, 1968; Смирнов и др., 1990; Fedorov et al., 2021). Наибольшее видовое разнообразие отмечается в группе высокогорных реликтов в связи с большим разнообразием условий местообитаний выше границы распространения леса, а наибольшее количество местообитаний – у видов горно-лесостепной группы вследствие широкого распространения петрофитных степей.

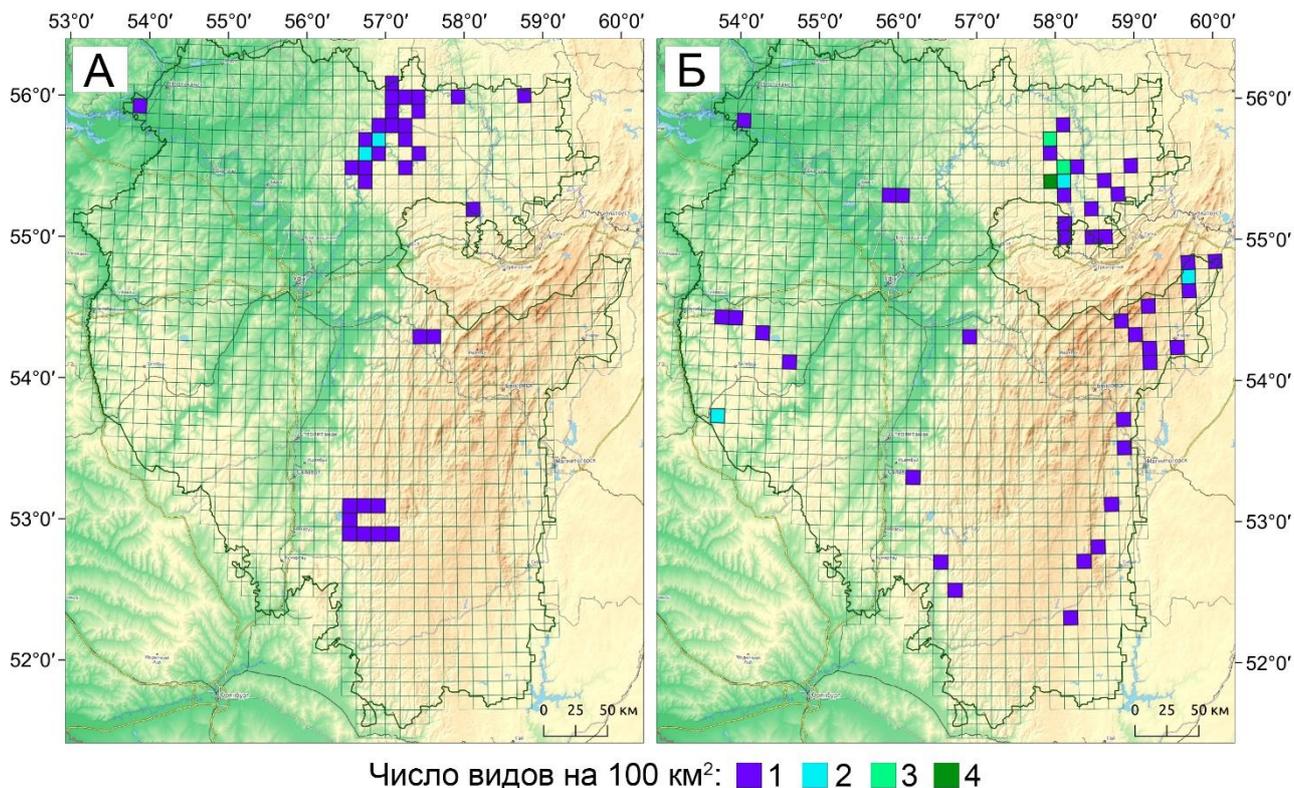


Рисунок 2 – Распространение видов лесной (А) и болотной и лугово-болотной (Б) эколого-ценотических групп на территории Республики Башкортостан

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ АРЕАЛОВ МОДЕЛЬНЫХ РЕЛИКТОВЫХ ВИДОВ ПЛЕЙСТОЦЕНОВОГО КОМПЛЕКСА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

Потенциальные ареалы модельных видов. Проведено моделирование современных потенциальных ареалов представителей пяти основных эколого-ценотических групп видов: высокогорных (*Patrinia sibirica*), горно-лесостепных (*Linaria uralensis*, *Delphinium uralense*), лесных (*Zigadenus sibiricus*), болотных и лугово-болотных (*Gentianopsis barbata*, *Schoenus ferrugineus*), а также лугово-опушечных (*Allium obliquum*). В связи с изменением распространения границ растительных сообществ при изменении климата в голоцене, а также под влиянием антропогенных факторов современное распространение этих видов уже их потенциальных ареалов. Одной из причин изменения границ растительных сообществ, в которых встречаются изучаемые виды, было расширение распространения широколиственных лесов при потеплении климата и увеличение влажности в середине голоцена (Горчаковский, 1968; Смирнов и др., 1990). Этим можно объяснить несоответствие современного распространения и потенциального ареала вида *P. sibirica* (рис. 3), который не встречается на восточном макросклоне Южного Урала, где в середине голоцена в период потепления климата его местообитания могли быть

заняты лесными сообществами (Горчаковский, 1969). На современное распространение рассматриваемых видов большое влияние оказали антропогенные факторы: вырубка хвойных лесов (на *Z. sibiricus*), осушение болот (на *S. ferrugineus* и *G. barbata*), интенсивный выпас скота (на *L. uralensis*) и заготовка в качестве пищевого вида (на *A. obliquum*).

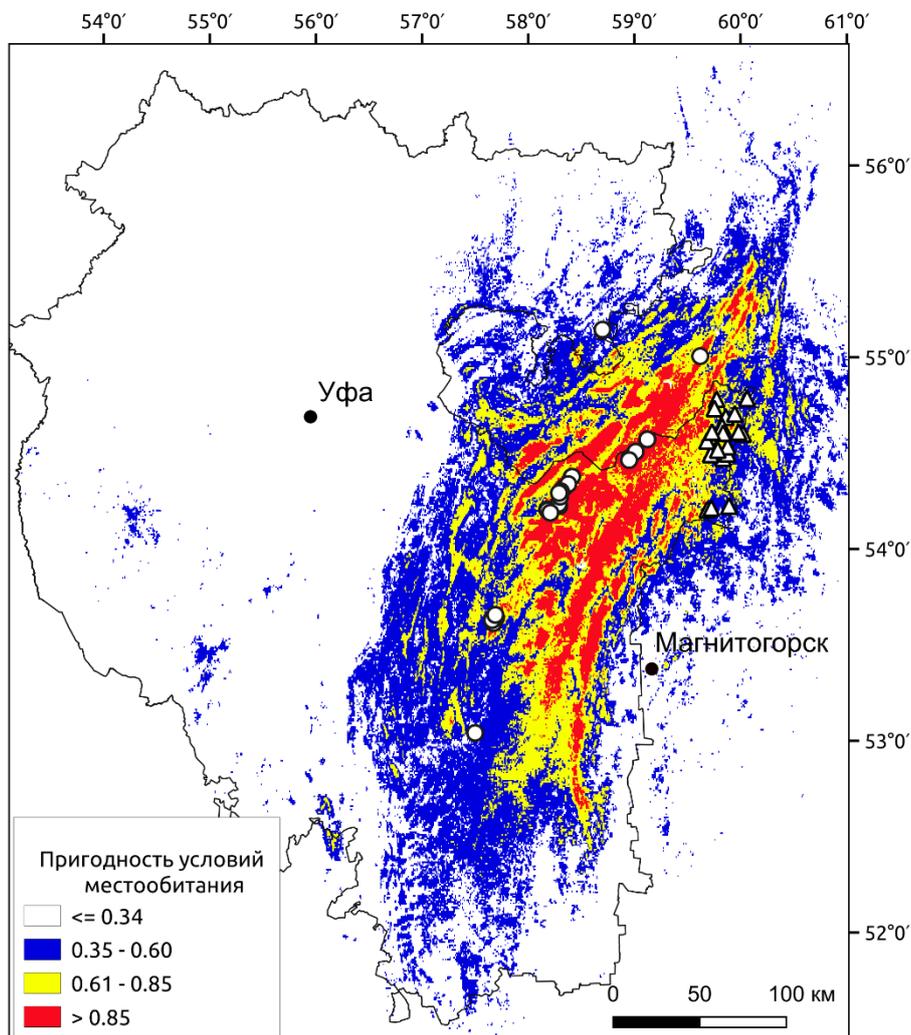


Рисунок 3 – Современный потенциальный ареал и локалитеты *Patrinia sibirica* на Южном Урале. Кружками обозначены горно-лесные, а треугольниками горно-лесостепные локалитеты

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИГОДНОСТИ УСЛОВИЙ МЕСТООБИТАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ РЕЛИКТОВЫХ ВИДОВ ПЛЕЙСТОЦЕНОВОГО КОМПЛЕКСА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ ПРИ РАЗНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

При проведении моделирования влияния климатических изменений на пригодность условий местообитания редких реликтовых видов плейстоценового комплекса на Южном Урале выявлены два основных типа изменения пригодности – снижение пригодности местообитания (1) и возрастание пригодности местообитания с последующим снижением при длительном влиянии климатических изменений (2). Сокращение потенциальных ареалов и уменьшение пригодности условий местообитания в известных локалитетах при сценариях как среднего, так и сильного изменения климата прогнозируется у четырех модельных видов – *Patrinia sibirica* (высокогорная группа), *Zigadenus sibiricus* (группа лесных видов), *Schoenus ferrugineus*

и *Gentianopsis barbata* (группа болотных и лугово-болотных видов).

При текущих изменениях климата у *P. sibirica* 28 локалитетов имеют высокопригодные, 6 – среднепригодные, 8 – низкопригодные и 1 – непригодные условия местообитания (рис. 3). При умеренном изменении климата критическое ухудшение условий местообитания у *P. sibirica* прогнозируется преимущественно в горно-лесостепных локалитетах (рис. 4А, Б). При сценарии сильного изменения климата условия местообитания критически ухудшатся в большинстве горно-лесостепных локалитетах уже к 2050 г., а к 2070 г. благоприятные условия сохранятся только в наиболее возвышенной части Южного Урала (рис. 4В, Г). При этом ухудшение условий местообитания в горно-лесных локалитетах будет связано с увеличением температуры, обуславливающим сдвиг границ распространения лесов

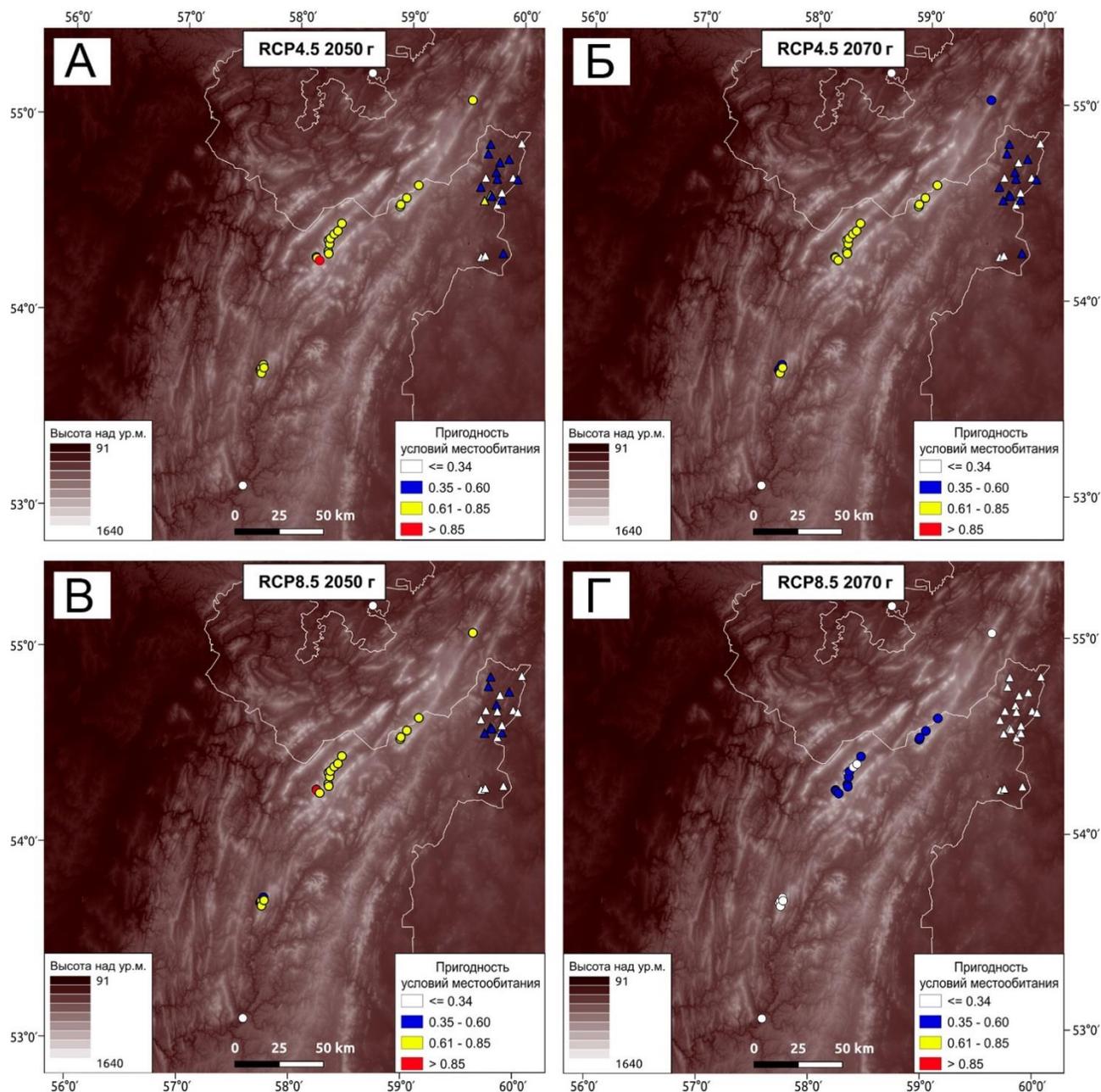


Рисунок 4 – Прогноз пригодности условий местообитания в локалитетах *Patrinia sibirica* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) (А, Б) и сильном (RCP8.5) (В, Г) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века. Кружками обозначены горно-лесные, треугольниками – горно-лесостепные локалитеты

вверх в горах, а в горно-лесостепных – с увеличением количества осадков в зимний период, которое также будет влиять на увеличение распространения древесно-кустарниковой растительности (Fedorov et al., 2021).

При текущих изменениях климата у *S. ferrugineus* один локалитет имеет высокопригодные, 20 – среднепригодные, 7 – низкопригодные и 3 – непригодные условия местообитания. Все локалитеты с пригодными условиями местообитания расположены в лесостепных зонах или на их границах с другими зонами, а непригодные – в зоне распространения широколиственных лесов. При изменении климата ожидается снижение летних осадков при увеличении летних температур и частоты засух на большей территории Южного Урала, что неизбежно приведет

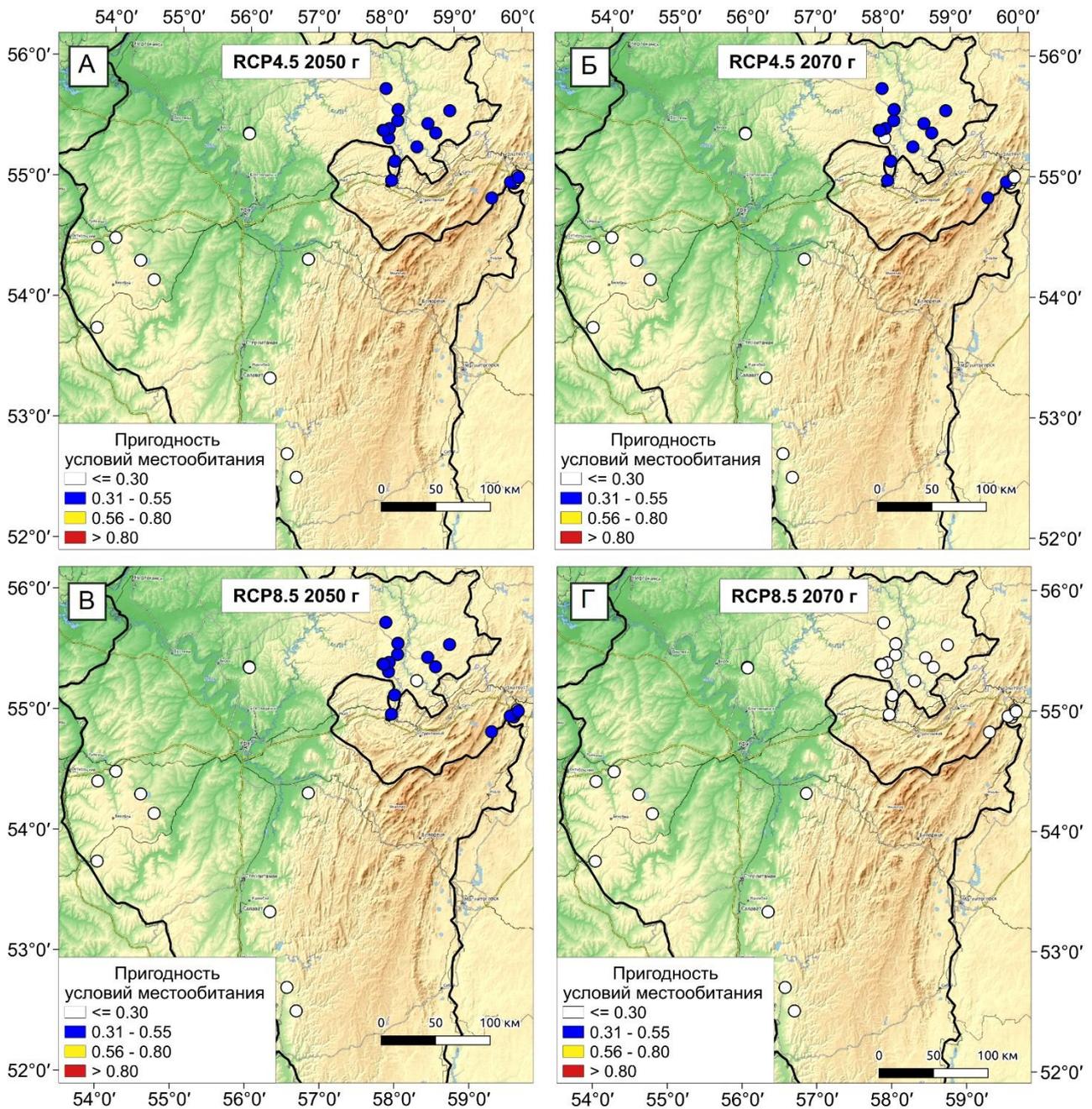


Рисунок 5 – Прогноз пригодности условий местообитания в локалитетах *Schoenus ferrugineus* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) (А, Б) и сильном (RCP8.5) (В, Г) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века. Кружками обозначены известные местонахождения вида

снижению уровня болотных вод (Baisheva et al., 2020; Pakalne et al., 2021 и др.). Это обусловит исчезновение высокопригодных условий местообитания в локалитетах *S. ferrugineus* уже к 2050 г. даже при умеренном изменении климата (рис. 5А). К 2070 г. у этого вида в половине известных локалитетов условия произрастания станут непригодными, а в остальных локалитетах – низкопригодными (рис. 5Б). При этом в разных частях Южного Урала ухудшение условий местообитания *S. ferrugineus* будет проходить неравномерно. При сильных климатических изменениях к 2070 г. пригодные условия местообитания у вида исчезнут во всех локалитетах (рис. 5Г). Такие же изменения условий местообитания будут наблюдаться и у *G. barbata* (рис. 6А, Б, В, Г).

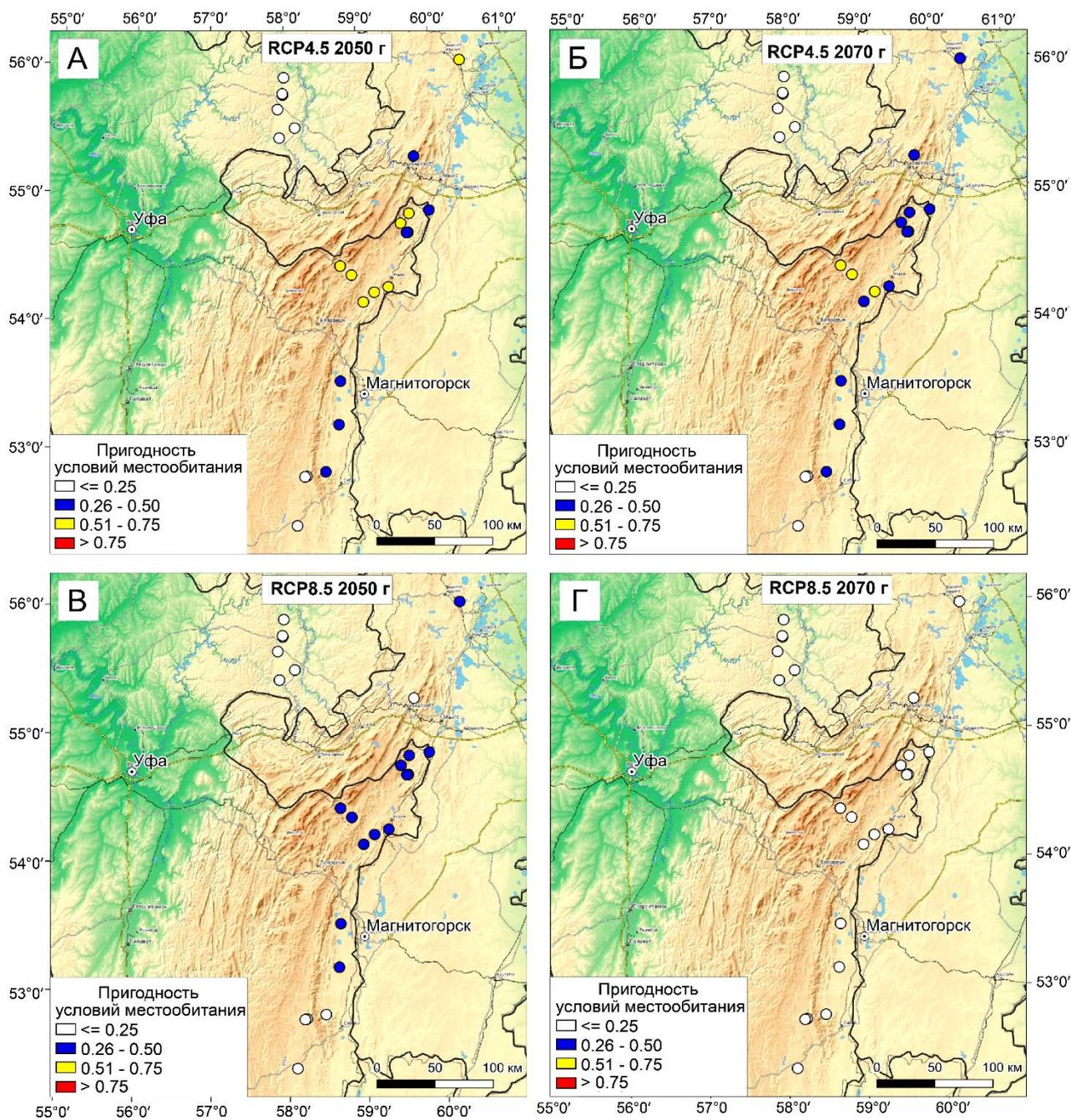


Рисунок 6 – Прогноз пригодности условий местообитания в локалитетах *Gentianopsis barbata* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) (А, Б) и сильном (RCP8.5) (В, Г) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века. Кружками обозначены известные местонахождения вида

При текущих изменениях климата у *Z. sibiricus* из 61 известного локалитета в 38 имеются высокопригодные, 21 – среднепригодные и в 2 – низкопригодные условия местообитания. При умеренном изменении климата к 2050 г. доля локалитетов с высокопригодными условиями местообитаний снизится с 38 до 8 локалитетов, а к 2070 г. – до 4 локалитетов (рис. 7А, Б). При сильном изменении климата к 2050 году высокопригодные условия местообитания исчезнут, среднепригодные условия местообитания сохранятся только в 13 локалитетах и в трети локалитетов условия местообитания станут непригодными. К 2070 г. пригодные условия местообитания сохранятся только в 12 локалитетах (рис. 7Г). Основной причиной снижения пригодности условий местообитания вида *Z. sibiricus* будет расширение

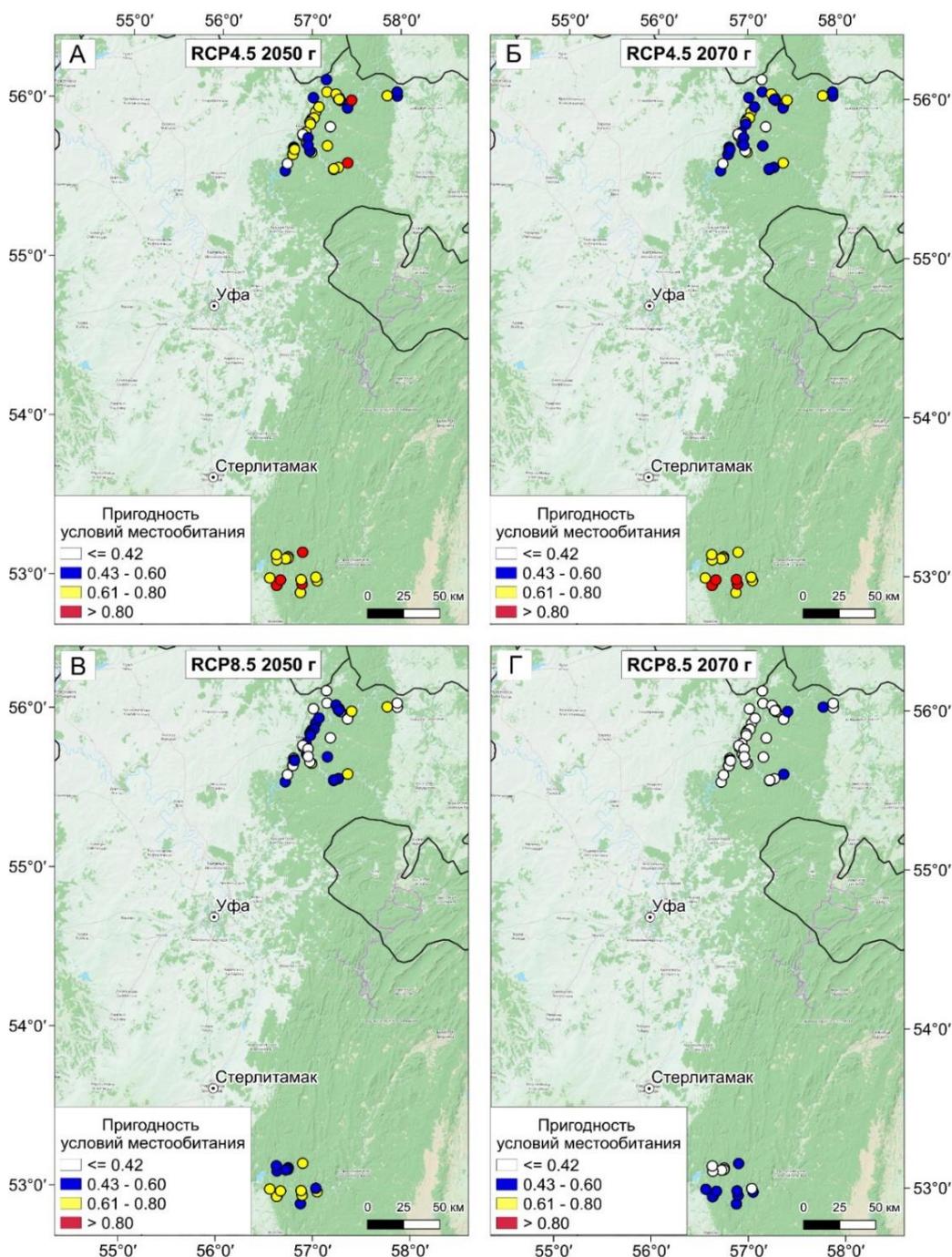


Рисунок 7 – Прогноз пригодности условий местообитания в локалитетах *Zigadenus sibiricus* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) (А, Б) и сильном (RCP8.5) (В, Г) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века.

Кружками обозначены известные местонахождения вида

распространения широколиственных древесных видов и комбинированное влияние климатических изменений и лесохозяйственной деятельности. Эти процессы, в ряде случаев, будут обуславливать постепенное замещение зеленомошных сосновых и елово-пихтово-лиственничных лесов, в которых произрастает этот вид на Южном Урале, на другие типы леса (Оценочный доклад ..., 2008; Широких и др., 2013). При сильном изменении климата к 2070 г. пригодные условия местообитания для *Z. sibiricus* сохранятся преимущественно на небольших по площади скальных останцах, по скалистым берегам рек и каменистым осыпям, что характерно для этого вида на границах его распространения, например, на Дальнем Востоке (Дудов, 2011; Беркутенко, 2012; Мочалова, 2014 и др.).

Второй тип изменения пригодности условий местообитания характерен для представителей горно-лесостепной и лугово-опушечной групп. У *Linaria uralensis* при умеренном и сильном изменении климата ожидается увеличение площадей территорий с высокой и средней пригодностью условий местообитания к 2050 г. и некоторое снижение к 2070 г. (рис. 8А). В настоящее время у этого вида непригодные условия местообитания выявлены только в одном локалитете за пределами северной границы основного распространения вида, где вид был занесен при строительстве газопровода на каменистые обнажения. При сильном изменении климата прогнозируется резкое увеличение высокопригодных условий местообитания в локалитетах (рис. 8Б). У второго вида этой группы – *Delphinium uralense* – в настоящее время непригодные условия местообитания отмечаются в четырех локалитетах, находящихся за пределами основного ареала (в двух локалитетах в Предуралье и в двух – в Зауралье). У этого вида, также как у *L. uralensis*, прогнозируется увеличение площадей со средне- и высокопригодными условиями местообитания с их последующим снижением к 2070 г. (рис. 9А). При этом при обоих сценариях изменения климата прогнозируется уменьшение количества известных локалитетов с высокопригодными условиями

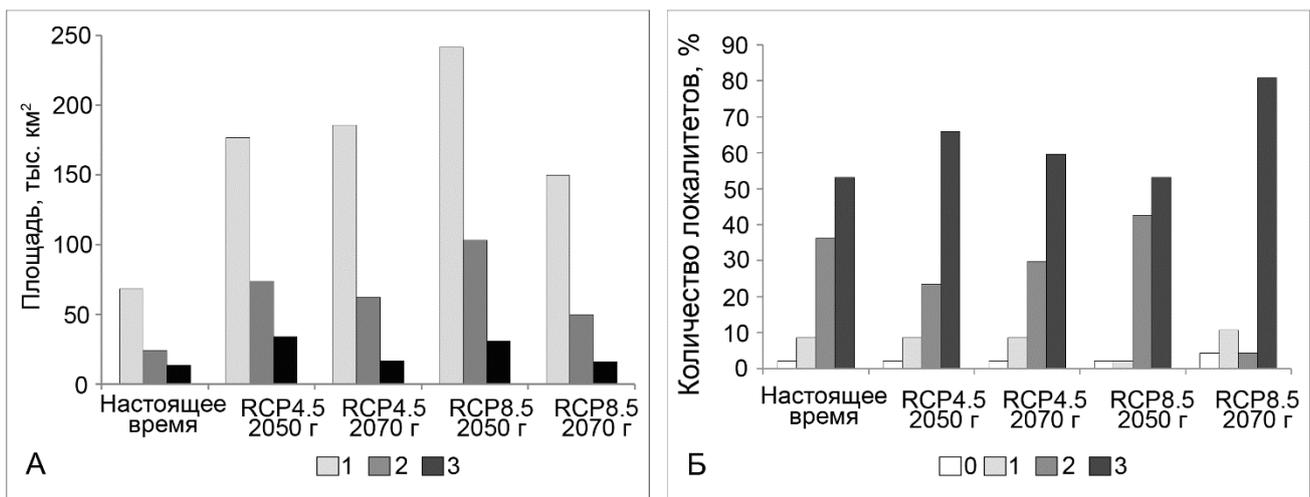


Рисунок 8 – Изменение пригодности условий местообитания *Linaria uralensis* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) и сильном (RCP8.5) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века

А – изменение площадей с пригодными условиями местообитания; Б – количество локалитетов с различной пригодностью условий местообитания;

0 – непригодные условия местообитания, 1 – низкопригодные, 2 – среднепригодные, 3 – высокопригодные.

местообитания во второй половине XXI века (рис. 9Б). У *D. uralense* ниже устойчивость к длительным климатическим изменениям, по сравнению с *L. uralensis*, что связано с более длительным жизненным циклом и меньшей засухоустойчивостью этого вида, поскольку и в настоящее время он предпочитает умеренно ксерофитные местообитания (Федоров, 2003). Основная причина расширения площадей с пригодными условиями местообитания для этих двух видов – увеличение засушливости климата и формирование новых местообитаний с благоприятными условиями произрастания. Скорость распространения этих видов в пригодных условиях местообитания будет лимитироваться семенной продуктивностью и скоростью распространения семян. Летние засухи будут обуславливать снижение продуктивности пастбищ и, соответственно, увеличение пастбищных нагрузок. Это будет приводить к увеличению эрозии почв на крутых и покатых склонах и стимулировать семенное возобновление этих двух видов.

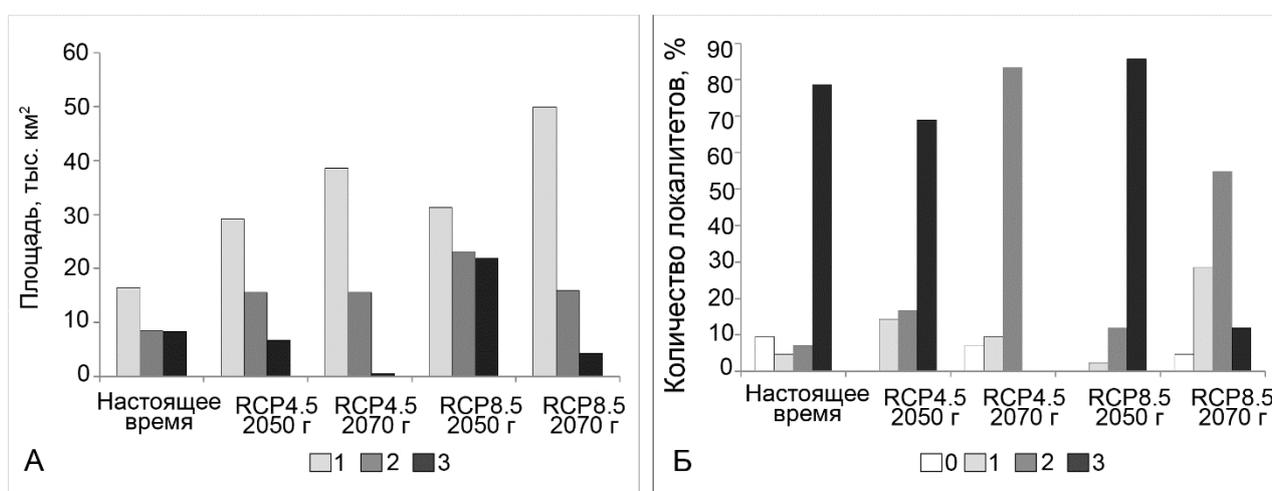


Рисунок 9 – Изменение пригодности условий местообитания *Delphinium uralense* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) и сильном (RCP8.5) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века

А – изменение площадей с пригодными условиями местообитания; Б – количество локалитетов с различной пригодностью условий местообитания;

0 – непригодные условия местообитания, 1 – низкопригодные, 2 – среднепригодные, 3 – высокопригодные.

У более мезофитного лугово-опушечного вида *Allium obliquum* в настоящее время непригодные условия местообитания имеются только в одном локалитете, приуроченному к небольшому участку остепненного луга среди полей на месте сведенных липово-дубовых лесов. У этого вида к 2050 г. при умеренном изменении климата прогнозируется увеличение площадей пригодных условий местообитания, а при сильном изменении климата – снижение (рис. 10А). К 2070 г. площади с пригодными условиями местообитания при обоих сценариях будут занимать меньшие территории, чем в настоящее время. У *A. obliquum* количество известных локалитетов с высокопригодными условиями местообитания к 2070 г. будет снижаться за счет изменения условий местообитания на среднепригодные (рис. 10Б). При сильном изменении климата средне- и высокопригодные условия сохранятся в локалитетах в средней и южной частях Южного Урала, на Зилаирском плато и на хребте Ирэндык. Снижение пригодности условий местообитания *A. obliquum* при сильном изменении

климата на Южном Урале и Уфимском плато может быть связано с расширением распространения древесной растительности вследствие снижения летних и увеличения зимних осадков, а в равнинной части Предуралья – с уменьшением летних осадков и замещением лугово-степных сообществ, являющихся одним из типов местообитаний этого вида, на степные сообщества. Моделирование не учитывает сбор вида населением и объедание животными при увеличении интенсивности выпаса скота вследствие снижения продуктивности пастбищ при возрастающей аридизации климата.

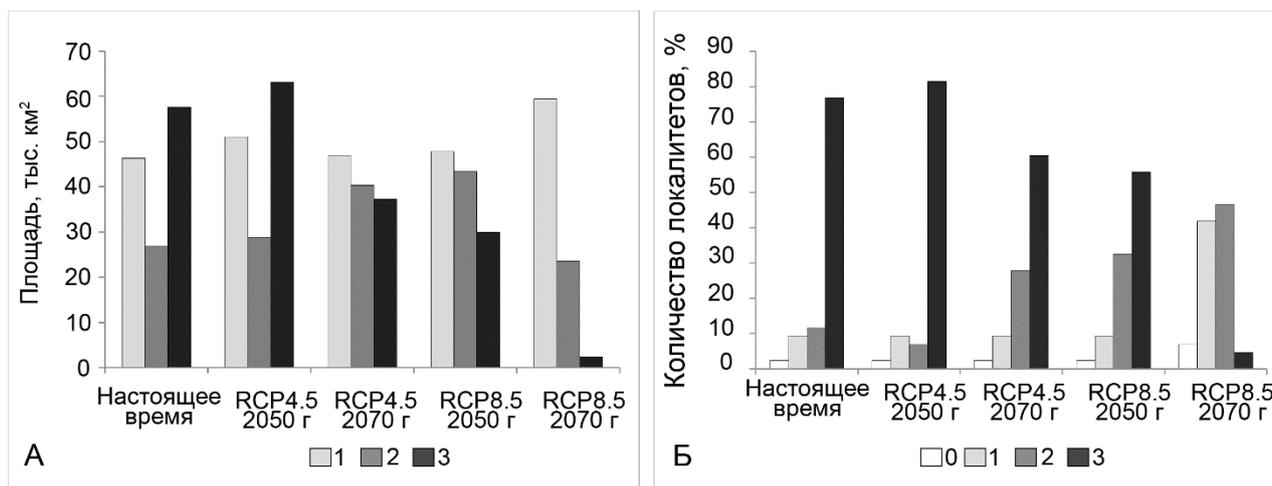


Рисунок 10 – Изменение пригодности условий местообитания *Allium obliquum* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) и сильном (RCP8.5) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века

А – изменение площадей с пригодными условиями местообитания; Б – количество локалитетов с различной пригодностью условий местообитания;

0 – непригодные условия местообитания, 1 – низкопригодные, 2 – среднепригодные, 3 – высокопригодные.

Общий прогноз устойчивости реликтовых видов плейстоценового комплекса к климатическим изменениям. Проведенный комплекс исследований позволяет сделать вывод о том, что потенциальная устойчивость видов рассмотренных эколого-ценотических групп зависит от широты экологической амплитуды и устойчивости растительных сообществ, являющихся их местообитаниями. Ожидается, что при изменении климата наиболее устойчивыми будут виды горно-лесостепной группы, как наиболее адаптированные к аридизации климата. Устойчивость группы высокогорных видов будет зависеть от скорости сдвига верхней границы распространения леса, который уже наблюдается в настоящее время (Шиятов, 1983; Фомин, 2009; Моисеев и др., 2016). Уязвимость реликтовых видов лесной группы будет зависеть от темпов смещения границ распространения широколиственных древесных видов в горах и смены доминирования хвойных пород на широколиственные в хвойно-широколиственных лесах в Предуралье. В связи с длительностью жизненного цикла древесных видов эти процессы могут несколько отставать от скорости изменения климата, но их ускорению может способствовать лесохозяйственная деятельность (Fedorov et al., 2021). Увеличение засушливости климата и частоты засух неизбежно повлияет на группу болотных и лугово-болотных видов вследствие снижения уровня болотных вод. Климатические изменения могут быть благоприятными для не

использовавшегося при моделировании вида *Paeonia hybrida* (степная группа). Эти изменения также могут быть благоприятными для *Gentiana decumbens* и *Allium humenorrhizum* (группа пойменных видов на солонцеватых почвах), так как засоление почв при увеличении аридности климата в Зауралье будет возрастать. Два вида горно-лесной группы – *Melilotoides platycarpus* и *Pentaphylloides fruticosa* – будут потенциально устойчивы к прогнозируемым климатическим изменениям, так как *M. platycarpus* произрастает на Южном Урале в хвойно-широколиственных и березовых лесах, распространение которых будет увеличиваться за счет внедрения широколиственных видов в сосново-березовые леса, а *P. fruticosa* имеет очень широкую экологическую амплитуду и на Южном Урале произрастает не только в лесах, но и в каменистых степях. Таким образом, климатические изменения могут оказать существенное и разнонаправленное влияние на пригодность условий местообитания редких видов плейстоценового комплекса, относящихся к разным эколого-ценотическим группам.

ГЛАВА 6. ИЗМЕНЕНИЕ МЕР ОХРАНЫ РЕДКИХ ВИДОВ

Анализ распространения редких реликтовых видов плейстоценового комплекса на территориях ООПТ в Республике Башкортостан показал недостаточную представленность на охраняемых территориях видов *Cardamine trifida*, *Gentiana decumbens*, *Ophrys insectifera*, *Paeonia hybrida*, *Betula nana*, *Allium microdictyon* и *Dianthus repens* Willd. и необходимость дополнительных мер по их охране. В дальнейшем изменение климата потребует коррекции существующих мер охраны редких видов. Для сохранения болотных и лугово-болотных видов *Schoenus ferrugineus* и *Gentianopsis barbata* может возникнуть необходимость поддержания гидрологического режима наиболее ценных по разнообразию редких болот-памятников природы в Месягутовской лесостепи (Аркауловского, Озерского, Черношарского). Вместе с *S. ferrugineus* на этих болотах произрастает ряд видов плейстоценового комплекса: *Carex serotina*, *Ophrys insectifera* и *Pinguicula vulgaris*. Для лесного вида *Zigadenus sibiricus* при сильном изменении климата может понадобиться его реинтродукция некоторых его популяций в более пригодные местообитания в центральной части и на восточном макросклоне Южного Урала.

При умеренном изменении климата для *Patrinia sibirica* не потребуются какие-либо дополнительные мероприятия для сохранения этого вида на Южном Урале, в то время как в случае реализации сильного изменения климата будет необходима реинтродукция растений из некоторых горно-лесостепных популяций в более пригодные для этого вида местообитания, которые сохранятся в возвышенных частях Южного Урала. Сохранность других высокогорных видов будет зависеть от скорости изменения верхней границы распространения леса в горах. Климатические изменения не потребуют дополнительных мер охраны для лугово-опушечного вида *A. obliquum*, а также проанализированных горно-лесостепных видов (*L. uralensis* и *D. uralense*).

Локалитеты редких видов плейстоценового комплекса с предполагаемым быстрым изменением их условий произрастания могут быть использованы для мониторинга климатических изменений. Исчезновение в этих местообитаниях редких видов будет означать, что изменение климата вышло за пределы его флюктуации в голоцене.

ВЫВОДЫ

1. В Республике Башкортостан произрастают 45 редких реликтовых видов плейстоценового комплекса, которые по региональной эколого-ценотической приуроченности на территории Южного Урала в настоящее время объединены в 8 групп (высокогорные, горно-лесные, лесные, горно-лесостепные, степные, пойменные луговые на солонцеватых почвах, лугово-опушечные, а также группа болотных и лугово-болотных), что позволяет аппроксимировать результаты моделирования на экологически близкие виды. Наибольшее видовое разнообразие отмечается в группе высокогорных реликтов в связи с большим разнообразием условий местообитаний выше границы распространения леса, а наибольшее количество известных локалитетов – у видов горно-лесостепной группы вследствие большего распространения петрофитных степей.

2. Потенциальные ареалы у всех модельных реликтовых видов на Южном Урале шире их реального распространения, что связано с историей формирования растительности региона, в том числе антропогенными факторами, влияющими на растительные сообщества – местообитания этих видов: вырубкой хвойных лесов в Предуралье и на западном макросклоне Южного Урала, осушением болот, интенсивным выпасом скота и сбором растений населением.

3. При проведении моделирования влияния умеренных (RCP4.5) и сильных (RCP8.5) климатических изменений на пригодность условий местообитания редких реликтовых видов плейстоценового комплекса на Южном Урале установлено, что устойчивость видов рассмотренных эколого-ценотических групп зависит от широты их экологических амплитуд и изменения распространения растительных сообществ, являющихся их основными местообитаниями. Выявлены два типа изменения пригодности условий местообитания при изменении климата: снижение (*Patrinia sibirica*, *Schoenus ferrugineus*, *Gentianopsis barbata* и *Zigadenus sibiricus*) и возрастание с последующим снижением при длительном влиянии климатических изменений до уровня ниже или выше современного распространения (*Linaria uralensis*, *Delphinium uralense* и *Allium obliquum*).

4. Низкая устойчивость к климатическим изменениям видов *S. ferrugineus* и *G. barbata* связана с ожидаемым увеличением летних температур при снижении количества летних осадков на большей территории Южного Урала, снижением уровня болотных вод, а у *Z. sibiricus* и *P. sibirica* – с расширением границ распространения лесных сообществ, в которых эти виды не произрастают. Основная причина улучшения условий произрастания в краткосрочной перспективе при умеренном изменении климата у видов *L. uralensis*, *D. uralense* и *A. obliquum* связана с увеличением засушливости климата и формированием новых местообитаний с благоприятными условиями произрастания.

5. Анализ изменения пригодности условий местообитания в известных локалитетах неустойчивых к изменению климата редких видов позволяет выявить приоритеты охраны отдельных местообитаний и откорректировать меры охраны этих видов. Изученные модельные виды могут быть использованы при мониторинге текущих климатических изменений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список работ, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. Кутуева, А.Г. О потенциальном ареале и распространении вида-реликта плейстоценового комплекса *Allium obliquum* L. / А.Г. Кутуева, А.А. Мулдашев, А.Х. Галеева, Н.И. Федоров //Естественные и технические науки. – 2019. – № 10. – С. 149-154. – DOI: 10.25633/ETN.2019.10.20
2. Федоров, Н.И. Выявление очагов высокого разнообразия редких видов растений как основа оценки репрезентативности и совершенствования системы особо охраняемых природных территорий / Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, В.Б. Мартыненко, Э.З. Баишева, П.С. Широких, О.А. Елизарьева, А.Г. Кутуева //Сибирский экологический журнал. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 525-537. – DOI: 10.15372/SEJ20200410 (переводная версия журнала входит в Web of Science).

Статьи в журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science

1. Kutueva, A.G. Forecast of climate change impact on habitat suitability of *Linaria uralensis* Kotov (Scrophulariaceae) in the Southern Urals / A.G. Kutueva, N.I. Fedorov, A.A. Muldashev, Y.A. Fedorova, L.G. Naumova //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 817, № 1. – P. 012053. – DOI: 10.1088/1755-1315/817/1/012053
2. Fedorova, Y.A. Predicting the potential distribution of an endemic steppe species *Artemisia salsoloides* Willd. under the climate change / Y.A. Fedorova, A.A. Muldashev, N.I. Fedorov, V.B. Martynenko, A.G. Kutueva //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 817, № 1. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1755-1315/817/1/012032
3. Fedorov, N.I. Prediction of habitat suitability for *Patrinia sibirica* Juss.in the Southern Urals / N.I. Fedorov, A.G. Kutueva, A.A. Muldashev, O.I. Mikhaylenko, V.B. Martynenko, Y.A. Fedorova //Scientific Reports. – 2021 – V. 11, № 1. – P. 1-8. – DOI: 10.1038/s41598-021-99018-0

Публикации в прочих изданиях

1. Кутуева, А.Г. Анализ потенциального ареала *Allium obliquum* L. на Южном Урале и сопредельных территориях / А.Г. Кутуева, Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, А.Х. Галеева //Растительность Восточной Европы и Северной Азии: материалы II Международной научной конференции (Брянск, 12-16 октября 2020 г.) – 2020. – С. 32.
2. Кутуева, А.Г. Анализ потенциального ареала *Patrinia sibirica* (L.) Juss. на Южном Урале / А.Г. Кутуева, Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, А.Х. Галеева //Материалы III Национальной конференции с международным участием «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия» – Екатеринбург: Гуманитарный университет – 2020. – С. 338-341.
3. Федоров, Н.И. Об особенностях моделирования потенциальных ареалов редких видов растений / Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, А.Г. Кутуева, О.И. Михайленко //Материалы III Национальной конференции с международным участием «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия» – Екатеринбург:

Гуманитарный университет – 2020. – С. 500-503.

4. Кутуева, А.Г. Прогноз влияния климатических изменений на пригодность условий местообитания *Linaria uralensis* Kotov (Scrophulariaceae) на Южном Урале / А.Г. Кутуева, Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, Ю.А. Федорова, Л.Г. Наумова //Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума [Электронный ресурс] / под научной редакцией академика РАН А.А. Чибилёва. – Оренбург: ОГУ. – 2021. Режим доступа: <http://steppeforum.ru/sites/default/files/sbornik.pdf>

5. Фёдорова, Ю.А. Прогноз изменения распространения степного вида *Artemisia salsoloides* Willd. в условиях изменения климата / Ю.А. Федорова, Н.И. Федоров, А.А. Мулдашев, В.Б. Мартыненко, А.Г. Кутуева //Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума [Электронный ресурс] / под научной редакцией академика РАН А.А. Чибилёва. – Оренбург: ОГУ. – 2021. Режим доступа: <http://steppeforum.ru/sites/default/files/sbornik.pdf>

6. Федорова, Ю.А. Анализ закономерностей распространения эндемичного вида *Hedysarum argyrophyllum* Ledeb. на Южном Урале и сопредельных территориях / Ю.А. Федорова, А.А. Мулдашев, А.Г. Кутуева //Экобиотех. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 171-177.

7. Кутуева, А.Г. Современное распространение и потенциальный ареал вида *Gentianopsis barbata* (Froel.) Ma на Южном Урале и сопредельных территориях / А.Г. Кутуева, А.А. Мулдашев, Ю.А. Федорова //Экобиотех. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 150-155. – DOI: 10.31163/2618-964X-2021-4-2-150-155.

8. Kutueva, A.G. About potential area of *Patrinia sibirica* (L.) Juss. in the Southern Urals / A.G. Kutueva, N.I. Fedorov, A.A. Muldashev, A.H. Galeeva, L.G. Naumova //ARPHA Proceedings 2. – 2020. – P. 1-7. – DOI: 10.3897/ap.2.e57082.