

## КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

УДК 574.9: 595.727 + 502.74 (1-925.117 + 1-925.15)

DOI: 10.15372/GIPR20230516

М.Г. СЕРГЕЕВ\*, \*\*, М.Н. КИМ-КАШМЕНСКАЯ\*, В.В. МОЛОДЦОВ\*, О.В. ЕФРЕМОВА\*,  
К.В. ПОПОВА\*, Н.С. СОКОЛОВА\*

\*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,  
mgs@fen.nsu.ru, mashust@gmail.com, vv@fen.nsu.ru, oxana@fen.nsu.ru, kristin\_belle@mail.ru,  
natalya.s.baturina@gmail.com

\*\*Институт систематики и экологии животных СО РАН,  
630091, Новосибирск, ул. Фрунзе, 11, Россия, mgs@fen.nsu.ru

### КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ЭКОМОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕДКИХ ВИДОВ НАСЕКОМЫХ НА ЮГЕ СИБИРИ И В СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ (НА ПРИМЕРЕ НАДСЕМЕЙСТВА САРАНЧОВЫХ)

*Обсуждаются проблемы оценки статуса редких видов саранчовых и их популяций на юге азиатской России и на сопредельных территориях. На примере степей и лесостепей юго-востока Западно-Сибирской равнины показана возможность сравнительного анализа карт точек нахождения видов в разные периоды исследований для выявления изменений в распространении популяций. Для двух модельных видов, а именно обитателя равнинных степей пестрой копеечки (*Aeropedellus baliolus*) и эндемика западной части Алтае-Саянской горной системы травянки Невского (*Stenobothrus newskii*), в целом характеризующихся весьма стабильным распределением, продемонстрированы возможности и ограничения эколого-географического моделирования распространения. Оценены возможные результаты использования различных наборов переменных. Показано, что использование расширенных наборов переменных (в том числе данных по абсолютным высотам, типу растительности) оказывается оправданным для эндемиков горных систем. Подчеркивается, что картирование ареалов, в первую очередь в разные временные периоды, в сочетании с одним или несколькими подходами к эколого-географическому моделированию дает возможность выявления участков вероятного существования популяций редких видов, что крайне актуально для территорий, плотность покрытия которых точками сбора мала. Использование же наборов биоклиматических переменных, рассчитанных в соответствии с разными долговременными прогнозами климатических трансформаций, позволяет оценить с тем или иным приближением вероятные тенденции изменений распространения видов.*

**Ключевые слова:** степи, лесостепи, Алтае-Саянская горная система, биоразнообразие, прямокрылые насекомые, популяция.

M.G. SERGEEV\*, \*\*, M.N. KIM-KASHMENSKAYA\*, V.V. MOLODTSOV\*, O.V. YEFREMOVA\*,  
K.V. POPOVA\*, N.S. SOKOLOVA\*

\*Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, ul. Pirogova, 2, Russia,  
mgs@fen.nsu.ru, mashust@gmail.com, vv@fen.nsu.ru, oxana@fen.nsu.ru, kristin\_belle@mail.ru,  
natalya.s.baturina@gmail.com

\*\*Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
630091, Novosibirsk, ul. Frunze, 11, Russia, mgs@fen.nsu.ru

### MAPPING AND ECOMODELING OF THE DISTRIBUTION OF RARE INSECT SPECIES IN THE SOUTH OF SIBERIA AND IN NEIGHBORING REGIONS (A CASE STUDY OF THE SUPERFAMILY ACRIDOIDEA)

© 2023 Сергеев М.Г., Ким-Кашменская М.Н., Молодцов В.В., Ефремова О.В.,  
Попова К.В., Соколова Н.С.

*The problems of assessing the status of rare species of Acridoidea and their populations in the south of Asian Russia and neighboring territories are discussed. Using an example of steppes and forest-steppes of the southeast of the West Siberian Plain, the possibility of a comparative analysis of maps of species locations in different periods of research to identify changes in the distribution of populations is shown. The possibilities and limitations of ecological-geographical modeling of distribution were demonstrated for two model species, namely, *Aeropedellus baliolus*, an inhabitant of flat steppes, and *Stenobothrus newskii*, an endemic of the western part of the Altai-Sayan mountain system, generally characterized by a very stable distribution. The possible results from using different sets of variables are evaluated. It is shown that the use of extended sets of variables (including data on absolute altitudes, and vegetation type) is justified for endemics of mountain systems. It is emphasized that habitat mapping, primarily in different time periods, in combination with one or more approaches to ecological-geographical modeling, makes it possible to identify areas of probable existence of populations of rare species, which is extremely important for areas with low density of collection points. The use of sets of bioclimatic variables calculated in accordance with different long-term projections of climatic transformations makes it possible to estimate, to a certain approximation, the probable trends in changes in the distribution of species.*

**Keywords:** *steppes, forest-steppes, Altai-Sayan mountain system, biodiversity, Orthoptera, population.*

## ВВЕДЕНИЕ

Саранчовые (Acridoidea) — одно из самых широко распространенных и массовых надсемейств насекомых в травянистых ландшафтах [1]. Наряду с массовыми видами, в том числе потенциальными вредителями, среди этих насекомых обычны и виды с небольшими ареалами, требующие охраны на региональном, а иногда и на глобальном, уровнях. При этом данные ареалы могут пересекаться с районами массовых размножений потенциальных вредителей [2]. Следовательно, поддержание уровня биоразнообразия может потребовать полного запрета либо существенных ограничений мероприятий по снижению численности массовых видов. Актуальна и проблема расселения части представителей данной группы на север и северо-восток [3, 4].

Современные подходы к оценке состояния популяций редких видов во многом основаны на картографировании их популяций и оценке состояния последних, в том числе в будущем [5]. Один из традиционных подходов — создание тех или иных карт, характеризующих возможное распространение отдельных видов, в том числе потенциально вредных, их популяций и сообществ. Начиная с 1920-х гг. подобные карты создавались и для анализа популяции саранчовых, но в основном для потенциальных вредителей [6]. Однако время карт на бумажных носителях почти прошло, поскольку возможности исследователей существенно изменились благодаря активному развитию IT-технологий, систем глобальной навигации и новых подходов к моделированию.

Один из самых эффективных и доступных подходов к моделированию распространения видов — алгоритм максимальной энтропии (MaxEnt) [7, 8]. Его широкое распространение определяется значительным уровнем стандартизации и возможностями пользовательских настроек. Очевидны и ограничения, во многом связанные с использованием данных только о точках находок и с привлечением разных наборов параметров среды [8]. Особенно заметны они при генерации моделей для редких видов, точки нахождения которых обычно немногочисленны. Задача статьи — показать в этом контексте основные возможности, сложности и перспективы картографирования и эколого-географического моделирования распределения редких саранчовых на юге Сибири.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — саранчовые — одна из самых разнообразных групп насекомых, представленная на всех континентах, кроме Антарктиды. Многие виды этого надсемейства заселяют степи, луга, пустыни. Их численность может быть огромной, и тогда они становятся серьезнейшими вредителями. Вместе с тем среди них есть и очень редкие виды, местообитания которых находятся всего в нескольких точках [2–4].

Юг Сибири и сопредельные части Казахстана, Монголии и Китая — это в первую очередь степные, полупустынные и пустынные районы. Значительная часть территории занята Алтае-Саянской горной системой со сложной системой разнонаправленных хребтов и часто аридизированными межгорными котловинами. В результате, условия для обитания саранчовых здесь очень разнообразны — от пустынь до высокогорных лугов и тундр.

Все точки сбора оригинальных данных привязаны к системе географических координат, абсолютным высотам и ландшафтным характеристикам. Также проанализированы доступные коллекционные материалы. Географические координаты точек находок насекомых до 2000 г. определены с помощью

Google Earth Pro 7.3.3. В качестве базовой использована цифровая основа в равнопромежуточной конической проекции [9]. Картографические модели географического распространения редких видов построены с помощью пакета MaxEnt 3.4.4 [7, 8]. Используются биоклиматические параметры, данные о солнечной радиации и абсолютные высоты с привязкой к географическим координатам с разрешением 30 угловых секунд [10]. Этот набор дополнен параметрами, характеризующими почвы [11] и растительный покров [12]. Статистическая поддержка оценивалась с помощью площади под кривой (AUC). Подбор атрибутов моделей и параметров среды выполнен с применением пакета Maxent-VariableSelection в среде R [13]. Наилучшая модель отбиралась на основании наименьшего значения критерия Акаике и — при прочих равных условиях — с наименьшей разницей между AUC для тестовой и тренировочной выборок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Распространение редких видов саранчовых на юге Сибири.** На юге Сибири, особенно в горах, обитает ряд редких (в том числе эндемичных) видов саранчовых [2–4, 14, 15]. Популяции многих таких форм малочисленны и локальны. Некоторые прямокрылые включены в региональные Красные книги. Еще заметнее присутствие редких видов в фаунах сопредельного Казахстана, Монголии и северо-запада Китая, особенно в местных горных системах. Однако данных об актуальном распространении и состоянии популяций на этих территориях практически нет, или же они очень ограничены [2]. Анализ изменений в распространении редких видов саранчовых в Барабинской лесостепи и Кулундинской степи путем сопоставления значковых карт ареалов для первой половины XX в. и периода 1972–2019 гг. [3] показывает, что есть саранчовые, распространение которых существенно не изменилось, два вида найдены на юго-западе Западно-Сибирской равнины, а несколько стали очень редкими. Столь разнородные изменения в их распространении могут быть в первую очередь объяснены трансформацией многих ландшафтов во время кампании освоения целины в середине XX в. и соответствующими изменениями условий обитания для разных видов. В горах юга Сибири и сопредельных регионов ситуация, видимо, стабильнее, так как общий уровень трансформации экосистем здесь существенно ниже, хотя популяции видов, обитающих в высокогорьях, могут исчезнуть в результате подъема границ высотных поясов [4, 14].

**Распределение модельных видов.** Для анализа выбраны два вида саранчовых, не похожие друг на друга по характеру эколого-географического распределения, а именно пестрая копыеноска (*Aeropedellus baliolus*), обитающая в основном в степях юго-востока Западно-Сибирской равнины и Казахского мелкосопочника (суммарно 18 точек находок, для которых определены географические координаты), и травянка Невского (*Stenobothrus newskii*), живущая на высокогорных лугах и в горных тундрах западной части Алтае-Саянской горной системы (11 точек). По нашим данным, в настоящее время состояние популяций обоих видов не вызывает тревоги.

Для пестрой копыеноски значимы средняя суточная амплитуда температур, средняя температура самого влажного квартала, средняя температура самого сухого квартала и сумма осадков самого теплого квартала, а для травянки Невского — те же факторы, а также годовая амплитуда температур, средняя температура самого теплого квартала, сезонность осадков (коэффициент вариации) и сумма осадков самого засушливого квартала. Для каждого вида оценивался вклад сочетаний разных наборов переменных: биоклиматических, солнечной радиации, абсолютных высот, типов почвы, растительного покрова. Генерировались модели с разными атрибутами, и внутри каждого набора отбирались лучшие.

Все модели, созданные для травянки Невского, характеризуются высоким уровнем статистической поддержки ( $AUC > 0,9$ ). Очевидно, это отражает ярко выраженную стенобионтность данного вида, популяции которого локальны и приурочены преимущественно к высокогорным лугам у верхней границы леса. Модели распределения пестрой копыеноски отличаются существенно более низким уровнем статистической поддержки (в большинстве случаев от 0,8 до 0,9). Скорее всего, это определяется большим разнообразием заселяемых видом местообитаний в сочетании со немногими точками его обнаружения. Сходные особенности аналогичной модели уже описаны нами для другого степного вида — морщинистого скачка (*Montana striata*) [15]. Вместе с тем примечательно, что для обоих модельных видов набор переменных с наилучшей статистической поддержкой одинаков. Это биоклиматические переменные, абсолютная высота, растительный покров и солнечная радиация.

По результатам моделирования для каждого вида сгенерированы карты распределения пригодности местообитаний в двух вариантах: только для отобранного набора биоклиматических переменных (рис. 1, а, 2, а) и для наборов — биоклиматические переменные, абсолютная высота, тип растительного покрова и солнечная радиация (см. рис. 1, б, 2, б).

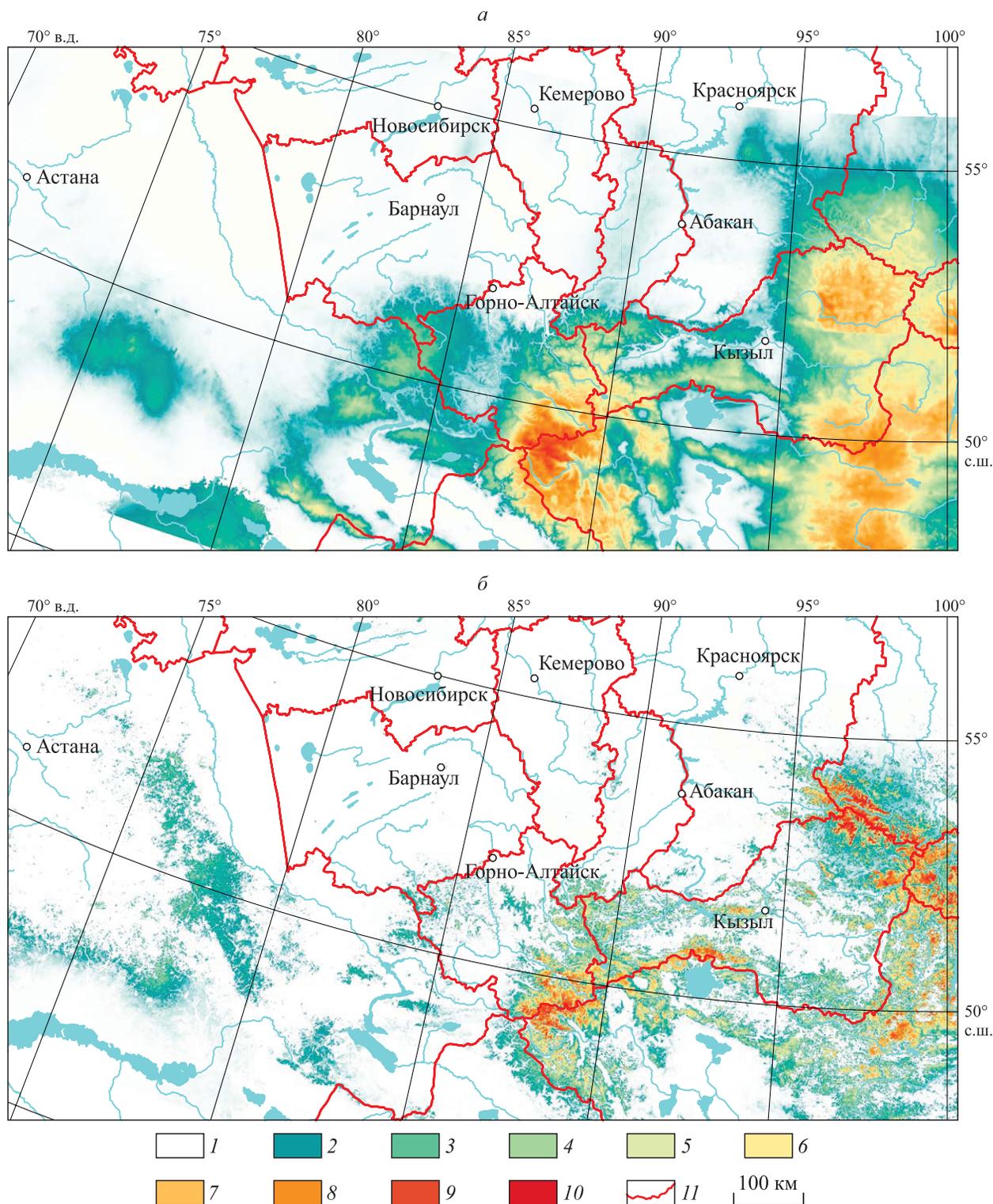


Рис. 1. Оценка пригодности местообитаний травянки Невского по всем точкам находок и набору отобранных биоклиматических переменных для 1970–2000 гг. (а) и по набору биоклиматических переменных, абсолютной высоте, типу растительного покрова и солнечной радиации (б).

Пригодность местообитаний: 1 – 0,0–0,11; 2 – 0,11–0,22; 3 – 0,22–0,33; 4 – 0,33–0,44; 5 – 0,44–0,55; 6 – 0,56–0,66; 7 – 0,67–0,77; 8 – 0,78–0,88; 9 – 0,88–0,99; 10 – 1,0. 11 – граница государств и федеральных субъектов РФ.

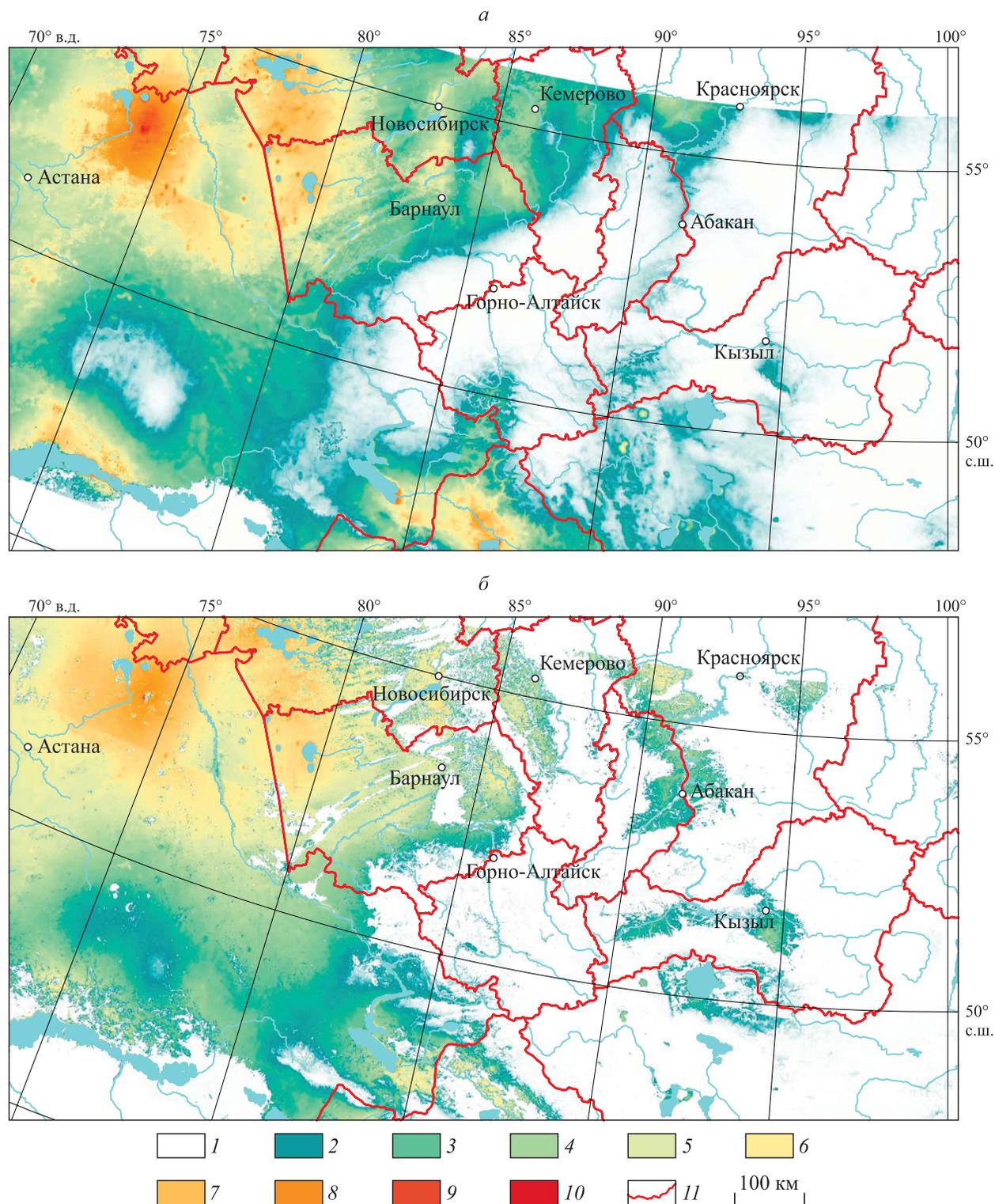


Рис. 2. Оценка пригодности местообитаний пестрой копыенки по всем точкам находок и набору отобранных биоклиматических переменных для 1970–2000 гг. (а) и по набору биоклиматических переменных, абсолютной высоте, типу растительного покрова и солнечной радиации (б).

Условные обозначения — см. рис. 1.

Сопоставление карт распределения пригодности местообитаний горного эндемика травянки Невского показывает, что модель, основанная лишь на биоклиматических переменных, определяет возможность существования ее популяций не только в разных частях Алтае-Саянской горной системы и Хангая, но и в горной стране Саур-Тарбагатай (см. рис. 1, а). Использование же дополнительных наборов факторов позволяет существенно уменьшить площадь территорий, в пределах которых вид может обитать (см. рис. 1, б). При этом явно выявляются горные массивы, подходящие для популяций травянки за пределами известного ареала вида. Эффект добавления дополнительных наборов факторов для равнинной степной пестрой копыеноски не столь заметен (см. рис. 2). Карта, базирующаяся только на биоклиматических переменных, демонстрирует возможность обитания этого вида в лесостепной зоне юго-востока Западно-Сибирской равнины, а также в северных пустынях Прибалхашья, востока Зайсанской впадины и самого севера Джунгарии. Карта же, построенная на расширенном наборе факторов, с одной стороны, похожа на предыдущую, с другой — районы с высокими оценками пригодности местообитаний на ней почти исчезают в зоне пустынь, но за пределами известного ареала появляются в степях и лесостепях юга Красноярского края и Хакасии, где обитает не менее двух близких видов того же рода.

Таким образом, сопоставление результатов эколого-географического моделирования на базе алгоритма MaxEnt и сгенерированных карт для двух редких видов саранчовых показывает, что использование расширенных наборов переменных (в том числе данных по абсолютным высотам, типу растительности) оказывается оправданным для эндемиков горных систем, тогда как распределение равнинных видов, скорее всего, в большинстве случаев хорошо описывается биоклиматическими параметрами. Эти возможные различия понятны, так как общий характер распространения саранчовых и других прямокрылых насекомых на равнинах определяется в первую очередь макроклиматическими особенностями [4], тогда как в горных системах с ярко выраженной высотной поясностью и экспозиционными эффектами заметную роль могут играть другие факторы, проявляющиеся на локальном уровне, такие как абсолютные высоты, типы растительного и почвенного покровов. Вместе с тем значимость биоклиматических факторов, наиболее ярко отражающих тренд глобального потепления, в первую очередь среднегодовых температур, оказывается низкой для обоих видов. Это позволяет предполагать, что для видов с относительно небольшими ареалами существенным может быть изменение условий (как микроклимата, так и перестройки местных экосистем) на локальном уровне, хотя, возможно, опосредовано отражающих глобальные тренды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карты распределения оптимальности местообитаний, созданные к настоящему времени с помощью разных подходов к моделированию распространения насекомых, показывают, что как для редких, так и для массовых видов прослеживается очень хорошее соответствие реального расселения прогнозируемой картине [15, 16]. Картирование точек нахождения видов в разные периоды времени позволяет оценить вероятные тенденции сдвига границ ареалов [3]. Показано, что часто ведущую роль играют локальные и региональные перестройки ландшафтов, в частности, это недавно выяснено для европейских популяций широко распространенной в Евразии ширококрылой трещотки (*Bryodemella tuberculata*), популяции которой на западе ареала в последние десятилетия стали очень редкими [17]. Картирование ареалов, в первую очередь в разные временные периоды, в сочетании с одним или несколькими подходами к эколого-географическому моделированию дает возможность выявления участков вероятного существования популяций редких видов, что крайне актуально для территорий, плотность покрытия которых точками сбора мала. Использование же наборов биоклиматических переменных, рассчитанных в соответствии с разными долговременными прогнозами климатических трансформаций, позволяет оценить с тем или иным приближением вероятные тенденции изменений распространения видов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (22-66-00031), Российского фонда фундаментальных исследований (16-04-00706) и РФФИ и Правительства Новосибирской области (18-416-540001, 20-416-540004).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stebaev I.V., Naplekova N.N., Volkovincer V.V.** Epigäische Zoo-Mikrobioten-Komplexe mit Orthopteren und Tenebrioniden im Südöstlichen Altaj-Gebirge und ihre Beziehungen zu bodenbildenden Prozessen // *Pedobiologia*. — 1968. — Bd. 8. — S. 345–386.
2. **Sergeev M.G.** Conservation of orthopteran biological diversity relative to landscape change in temperate Eurasia // *Journ. of Insect Conservation*. — 1998. — Vol. 2, N 3/4. — P. 247–252. DOI: 10.1023/A:1009620519058
3. **Popova K.V., Molodtsov V.V., Sergeev M.G.** Rare grasshoppers (Orthoptera, Acridoidea) of the Baraba and Kulunda steppes (South Siberia) // *Acta Biologica Sibirica*. — 2020. — Vol. 6. — P. 595–609. DOI: 10.3897/abs.6.e59519
4. **Sergeev M.G.** Distribution patterns of grasshoppers and their kin over the Eurasian Steppes // *Insects*. — 2021. — Vol. 12. — P. 77. DOI: 10.3390/insects12010077
5. **IUCN.** IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Second edition [Электронный ресурс]. — <https://iucn.org/resources/publication/iucn-red-list-categories-and-criteria-version-31-second-edition> (дата обращения 17.05.2023).
6. **Сергеев М.Г., Чильдебаев М.К., Ванькова И.А., Гаппаров Ф.А., Камбулин В.Е., Коканова Э.О., Лачининский А.В., Пшеницына Л.Б., Темрешев И.И., Черняховский М.Е., Соболев Н.Н., Молодцов В.В.** Итальянская саранча *Calliptamus italicus* (Linnaeus, 1758). Морфология, экология, распространение, управление популяциями. — Рим: ФАО, 2022. — 333 с. DOI: 10.4060/cb7921ru
7. **Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E.** Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecological Modelling*. — 2006. — Vol. 190. — P. 231–259. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
8. **Morales N.S., Fernández I.C., Vaca-González V.** MaxEnts's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review // *PeerJ*. — 2017. — Vol. 5. — P. e3093. DOI: 10.7717/peerj.3093
9. **Всероссийский** научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского. Цифровые географические основы [Электронный ресурс]. — <https://vsegei.ru/ru/info/topo> (дата обращения 17.05.2023).
10. **Fick S.E., Hijmans R.J.** WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. — 2017. — Vol. 37, N 12. — P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086
11. **International Soil Reference and Information Centre.** SoilGrids — global gridded soil information [Электронный ресурс]. — <https://www.isric.org/explore/-soilgrids> (дата обращения 03.03.2023).
12. **Buchhorn M., Smets B., Bertels L., De Roo B., Lesiv M., Tsendbazar N.-E., Herold M., Fritz S.** Copernicus global land service: land cover 100 m: collection 3: epoch 2019: Globe (V3.0.1) // *Zenodo*. — 2020 [Электронный ресурс]. — <https://DOI.org/10.5281/zenodo.3939050> (дата обращения 03.03.2023).
13. **Jueterbock A., Smolina I., Coyer J.A., Hoarau G.** The fate of the Arctic seaweed *Fucus distichus* under climate change: an ecological niche modeling approach // *Ecology and Evolution*. — 2016. — Vol. 6, N 6. — P. 1712–1724. DOI: 10.1002/ece3.2001
14. **Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A.** An annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adjacent regions. Part 3. Suborder Caelifera (Acrididae: Gomphocerinae: Gomphocerini; Locustinae) // *Far Eastern Entomologist*. — 2020. — N 402. — P. 1–36. DOI: <https://DOI.org/10.25221/fee.402.1>
15. **Sergeev M.G., Molodtsov V.V.** New data on distribution of *Montana striata* (Kittary, 1849) (Orthoptera: Tettigoniidae: Platycleidini) in the eastern part of the range // *Far Eastern Entomologist*. — 2022. — N 465. — P. 6–11. DOI: 10.25221/fee.465.2
16. **Popova K.V., Baturina N.S., Molodtsov V.V., Yefremova O.V., Zharkov V.D., Sergeev M.G.** The handsome cross grasshopper *Oedaleus decorus* (Germar, 1825) (Orthoptera: Acrididae) as a neglected pest in the south-eastern part of West Siberian Plain // *Insects*. — 2022. — Vol. 13. — P. 49. DOI: 10.3390/insects13010049
17. **Dey L.S., Simxes M.V.P., Hawlitschek O., Sergeev M.G., Xu S.-Q., Lkhagvasuren D., Husemann M.** Analysis of geographic centrality and genetic diversity in the declining grasshopper species *Bryodemella tuberculata* (Orthoptera: Oedipodinae) // *Biodiversity and Conservation*. — 2021. — Vol. 30. — P. 2773–2796. DOI: 10.1007/s10531-021-02221-8

Поступила в редакцию 31.05.2023

После доработки 18.06.2023

Принята к публикации 11.10.2023