

В.Н. Бочарников<sup>1</sup>, А.И. Труфанов<sup>2</sup>, Л.Г. Емельянова<sup>3</sup>

## СЕТЕВОЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОЛОГИИ КРУПНЫХ ХИЩНИКОВ И КОПЫТНЫХ ЮГО-ВОСТОЧНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

### АННОТАЦИЯ

Сетевой анализ зарекомендовал себя как эффективный инструмент для понимания закономерностей и прогнозирования последствий разрушения естественных экологических условий в исследовании сложных природных систем в локальном, региональном и глобальном масштабе. Теоретическое исследование с установлением пространственных схем распределения в зимний период амурского тигра и основных объектов его пищевого интереса — копытных выполнено на модельном участке горнолесной территории Юго-Восточного Сихотэ-Алиня (Приморский край). Здесь обитают уникальные по природоохранному значению виды, к числу которых относится амурский тигр (*Panthera tigris altaica*). Результаты исследования показывают взаимопроникновение мест человеческой деятельности и инфраструктуры в основные места обитания крупных животных в зимний период. Факторы, угрожающие существованию крупных хищников, можно условно разделить на три вида: антропогенные (связанные с присутствием человека и его хозяйственной деятельностью), техногенные (обусловленные внедренными технологическими системами, например — транспортной и топливно-энергетической инфраструктурой) и природные (стихийные бедствия, а также рельефные и ландшафтные условия, препятствующие существованию живых организмов дикой природы). В работе представлены: 1) сетевые модели и геоинформационное отображение зимнего распределения амурского тигра, представляющее собой результат использования порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели; 2) составленные карты распределения копытных путем пересчета общего числа зверей на их плотность населения в охотничьих угодьях; 3) подготовленные сетевые модели освоенного человеком пространства (дороги, населенные пункты) модельной территории и распределения охотничьих хозяйств. Исповедуемая синергия геоинформационного моделирования и сетевого анализа обеспечивается применением эффективного аналитического инструментария в исследованиях пространственной экологии животных.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пространственная экология, крупные хищники, угрозы популяции, геоинформационное моделирование, сетевой анализ

---

<sup>1</sup> Тихоокеанский институт географии, ул. Радио, д. 7, Владивосток, Россия, 690041,  
*e-mail: vbocharnikov@mail.ru*

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, д. 83,  
Иркутск, Россия, 664074,  
*e-mail: troufan@gmail.com*

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет,  
Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991,  
*e-mail: biosever@yandex.ru*

Vladimir N. Bocharnikov<sup>1</sup>, Andrey I. Trufanov<sup>2</sup>, Lyudmila G. Emelyanova<sup>3</sup>

**NETWORK APPROACH TO STUDYING SPATIAL ECOLOGY  
OF APEX PREDATORS AND UNGULATES  
OF SOUTHEASTERN SIKHOTE-ALIN RANGE (PRIMORSKY KRAI)**

**ABSTRACT**

Network analysis has proven to be an effective tool for understanding patterns and predicting consequences in the study of complex systems on a local, regional and global scale. In the south of the Russian Far East exists one of the highest levels of biodiversity in Russia. This paper presents mainly theoretical study, its results includes maps and of spatial structure distribution schemes in the winter of the Amur tiger and the main objects of its food interest — ungulates. The research model area situated within the mountain-forest territory of Southeastern Sikhote-Alin Mountains (Primorsky Krai). This region is home to species of worldwide conservation significance, including the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*). The results of the study show the interpenetration of places of human activity and infrastructure into the main habitats of large animals in winter. The factors threatening the existence of large predators can be divided into three types: anthropogenic (related to the presence of man and his economic activity); technogenic (caused by implemented technological systems, for example, transport and fuel and energy infrastructure); natural (natural disasters, as well as relief and landscape conditions that prevent the existence of living organisms of wildlife). The work presents: 1) network models and geoinformation mapping of the winter distribution of the Amur tiger, which is the result of using the proximity threshold as a key variable parameter of the network model; 2) maps of the distribution of ungulates have been compiled by recalculating the total number of animals by their population density in hunting grounds; 3) network models of the human-occupied space (roads, settlements) of the model territory have been prepared and distribution of hunting enterprises. The applied synergy of geoinformation modeling and network analysis provides effective analytical tools for research in the spatial ecology of animals.

**KEYWORDS:** spatial ecology, apex predators, population threats, geoinformation modeling, network analysis

**ВВЕДЕНИЕ**

Для изучения геосистем и схожих по сложности объектов В.Б. Сочава предложил и разработал подход, в котором «предметом... являются не столько компоненты природы сами по себе, сколько присущие им связи, посредством которых формируются соподчиненные друг другу целостности — геосистемы» [Сочава, 1978]. Изначально изучение систем, участниками которых являются природа, хозяйство и население, представлялось излишне сложной задачей, но в современных условиях развития методов моделирования анализ взаимосвязей между множеством различных компонентов вполне осуществим. Концепция сетевого подхода (в частности, в рамках теории графов) применительно к экологическим исследованиям фокусирует внимание на снижении

---

<sup>1</sup> Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio str., Vladivostok, 690041, Russia,  
e-mail: [vbocharnikov@mail.ru](mailto:vbocharnikov@mail.ru)

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: [troufan@gmail.com](mailto:troufan@gmail.com)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,  
e-mail: [biosever@yandex.ru](mailto:biosever@yandex.ru)

связности отдельных участков, что получило признание в ряде работ [Carter et al., 2014; Besson et al., 2019]. Доказательно утверждалось, что многие экологические реакции можно понять только с сетевой точки зрения [Gawecka, Bascompte, 2021].

Недавними исследованиями было подтверждено, что сопоставление сетевых топологических параметров с реально наблюдаемыми и фиксируемыми процессами и явлениями позволяет использовать объективные меры, метрики и индикаторы для оценки угрозы фрагментации и состояния устойчивости природных систем в целом [Tiang et al., 2021]. Сетевой подход также оказывается в сфере внимания исследователей, увязывающих восстановление среды обитания со сдерживанием сокращения биоразнообразия и восстановлением экосистемных услуг [Fenu, Pau, 2016]. При этом признано, что влияние угроз биоразнообразию в значительной мере обусловлено нарушением связности местообитаний, затрудняющим миграцию их обитателей между ресурсными участками [Taylor et al., 1993; Gray et al., 2014; Maguire et al., 2015; Shi et al., 2020]. Полагаем, что топологические параметры сети и их сопоставление между собой дают возможность выявить структурные особенности сети, в основе которых лежат явления, связывающие отдельные процессы, угрожающие существованию популяций крупных хищников. Следовательно, изучение топологии экологических систем, о чем заявляют эксперты [Bergsten, Zetterberg, 2013], дает представление об основополагающих законах и процессах, регулирующих формирование, поддержание и функционирование экосистем.

Целью данного исследования являлось рассмотрение существования крупных хищников в наблюдаемом социально-экономическом и природном окружении и представленном на исследуемой территории. Для достижения поставленной в работе цели рассматривалась как необходимая задача трансформации социально-экономических и природных сведений в сетевые структуры. Затем для каждого тематического набора полученных сетей проводился топологический анализ, результирующие сетевые метрики которых подвергались сравнению.

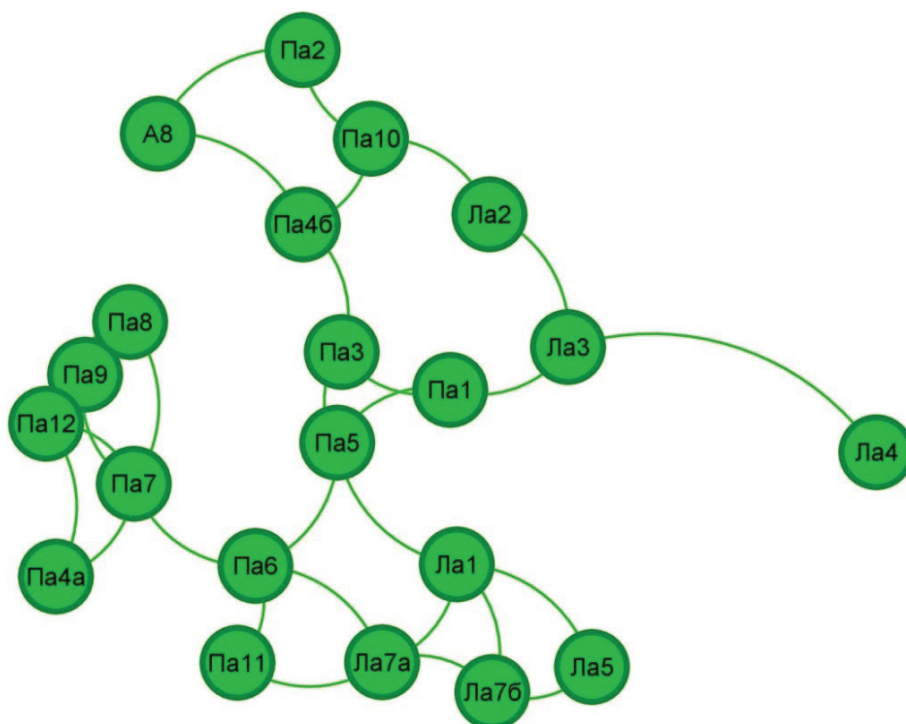


Рис. 1. Связность охотхозяйств ( $R_0=25$  км)  
Fig. 1. Connectivity of hunting farms ( $R_0 = 25$  km)



Таким образом, перед авторами была поставлена и решена задача сравнения и оценки данных совершенно разной природы на заданной территории. Изучались популяции крупных хищников (в настоящей работе рассматривается амурский тигр), в первом приближении устанавливались их зависимости от состояния кормовой базы, которой являлись копытные — кабан, пятнистый олень, изюбрь. Структура модели расположения участков охотхозяйств при пороге связности  $R_0 = 25$  км представлена на рисунке 1. Расположение охотничьих хозяйств и ООПТ в пределах модельного участка показано на рисунке 2.

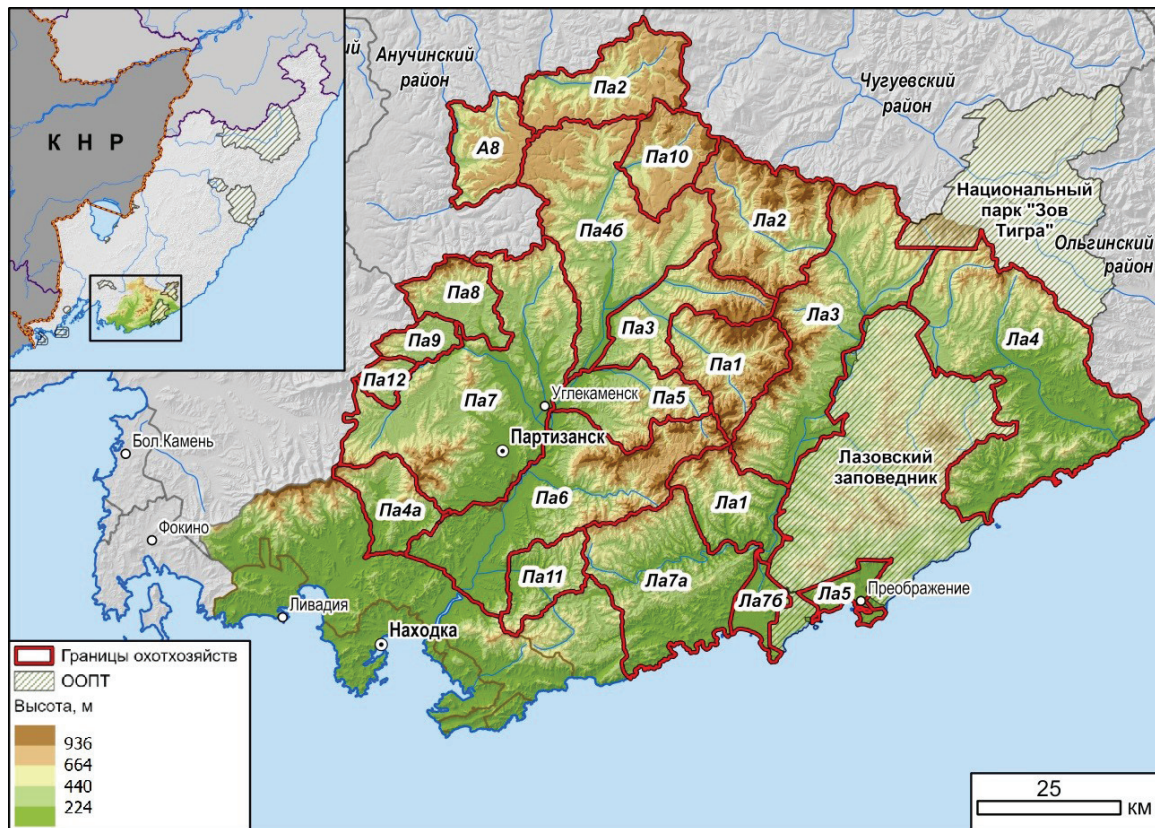


Рис. 2. Расположение охотничьих хозяйств и ООПТ в пределах модельного района на территории Приморского края

Fig. 2. Location the model area with hunting enterprises and federal protected areas within Primorsky Krai

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальной основой разработанных топологических моделей являются сетевые онтологии, которые имеют вид полного сетевого описания и содержат тезаурус, таксономию, семантическую сеть, правила. В представляемой здесь работе устанавливается связность выборки следов амурского тигра (крупного хищника, регулирующего численность копытных животных [изюбрь, косуля, кабан, пятнистый олень]) в охотничьих угодьях. Первичные материалы по численности тигра были получены<sup>1</sup> большим

<sup>1</sup> Общие работы по организации учета амурского тигра 2004–2005 гг. осуществлялся Управлением Росприроднадзора по Приморскому и краю и по Хабаровскому краям, Приморскрайохотуправлением, Хабаровсккрайохотуправление, Тихоокеанским институтом географии и Биолого-почвенным институтом ДВО РАН с финансовой поддержкой и участием Общества сохранения диких животных (WCS) и WWF России. Первичные данные учета были обработаны в лаборатории экологии и охраны животных ТИГ ДВО РАН под руководством д.б.н. Д.Г. Пикунова, оригиналы хранятся в архиве ТИГ ДВО РАН.

коллективом ученых, специалистов-охотоведов и охотников [Пикунов и др., 2010]. Авторами статьи на основе ограниченной выборки<sup>1</sup> для расчетов следов тигра в пределах модельной территории охотничьих хозяйств Партизанского и Лазовского административных районов Приморского края был подготовлен геоинформационный слой. На основании анализа координат зафиксированных следов амурского тигра подготовлены исходные данные для реализации сетевой структуры и разработана оригинальная сопровождающая сетевая онтология. В качестве основного инструмента для создания сетевых моделей использован бесплатный программный пакет с открытым исходным кодом Gephi<sup>2</sup>.

По данным натуральных исследований (несетеподобные исходные данные) на заданной территории формируется сеть, где узлом является отдельная координатная точка (x, y) фиксации следов тигра. Картографическая основа позволяет сформировать таблицы формата .csv с координатами отпечатков следов в качестве узлов. Связь устанавливается по близости узлов в евклидовом пространстве. Для создания сети используется характерный псевдокод генерации связей между узлами u и v с идентификаторами v.Id и u.Id и координатами (v.lx, v.ly) и (u.lx, u.ly) для значения порога близости R<sub>0</sub>:

```
for u in g.nodes:  
  for v in g.nodes:  
    sqrt=((v.lx-u.lx)**2 + (v.ly-u.ly)**2)**(0.5)  
    if(sqrt<R0 and v.Id>u.Id):  
      g.addEdge(u, v)
```

Рабочая версия Gephi 0.10.1<sup>3</sup> со множеством плагинов и консолью для ввода команд на языке программирования Python дает возможность организовать связи между узлами в соответствии со значениями порога пространственной близости узлов. В рамках пакета для анализа доступны сети с числом узлов до 100 000 и числом связей до 1 000 000. Расчеты выполнены с использованием параметра «разделения расстояния» между зафиксированными следами, а также путем определения рубежа или «порога преодоления» для выявления общих размеров участков обитания хищника. В этой модели узлами являлись точки с координатами центральных поселений в охотугодьях. Сетевой отпечаток отчетливо демонстрирует ключевые взаимосвязи и взаимовлияние охотхозяйств на модельной территории. Для сопоставления общего числа следов и численности хищников были взяты сведения, полученные для национального парка «Зов тигра» и Лазовского государственного заповедника [Керли, Борисенко, 2017; Салькина, Поддубная, 2019].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели предполагает, что зафиксированные места присутствия тигра (координаты следов или снимки фотоловушек), представляемые узлами (вершинами), связываются ребрами в том случае, если расстояние между участками не затрудняет (т. е. не превышает пороговое

<sup>1</sup> При подготовке выборки для расчетов с целью большей объективности была исключена тематическая атрибутивная информация, за исключением зафиксированных географических координат месторасположения следов.

<sup>2</sup> The Open Graph Viz Platform. Электронный ресурс: <https://gephi.org/features/> (дата обращения: 01.02.2022).

<sup>3</sup> Gephi 0.10.1. Электронный ресурс: <https://github.com/gephi/gephi/releases/tag/v0.10.1> (дата обращения 01.02.2022).

значение  $R_0$ ) миграцию обитателей этих участков. Подобным же образом была сконструирована сетевая модель расположения охотничьих хозяйств на обследуемой территории. Важной представляется интерпретация зависимостей сетевых метрик от порога связности. Так, детализация влияния значения порога на топологические метрики (диаметр сети и среднюю длину пути) позволяет выявить особые метрические параметры, которые скорее всего определяют как размеры территории обитания тигра, так и коридоры между участками. Отмеченные особые точки соответствуют значениям метрических расстояний 35 и 70 км (рис. 3).

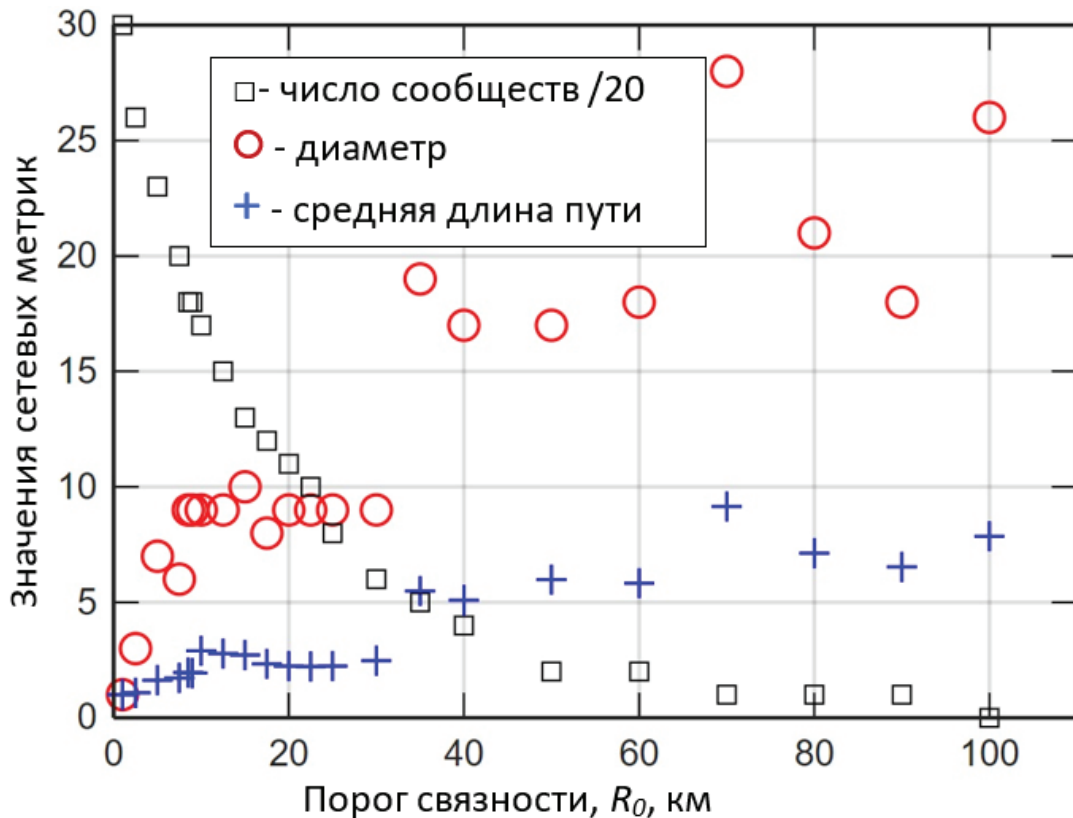


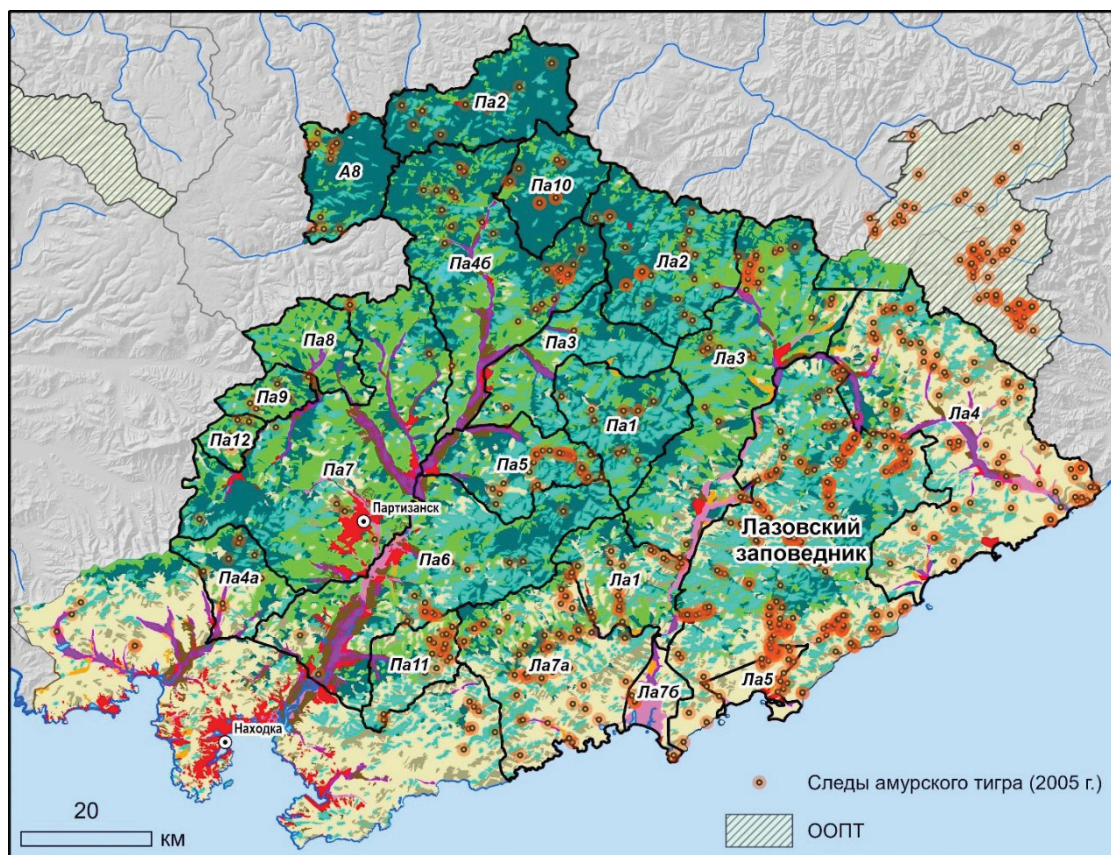
Рис. 3. Зависимость сетевых параметров от порогового значения  $R_0$  для модельной территории

Fig. 3. Dependence of network parameters on the  $R_0$  threshold value for model area

Варьирование (последовательный подбор порога  $R_0$ ) дает возможность оценить пространственное распределение тигра, в т.ч. последующие размеры территории, занимаемые особями, перекрытие этих территорий, а также его численность. При задании порогового значения  $R_0$  формируется уникальный экземпляр сетевой модели. При этом значения метрик соответствующего графа (например — средней длины пути, числа сообществ и др.) характеризуют связность и ландшафт, как места обитания тигра и могут отражать те или иные детали поведения хищника. Для выявления пространственных закономерностей распределения амурского тигра по территории были построены сети при десяти значениях порога близости  $R_0$  рассматриваемой модели. Сюжетно важным элементом в исследованиях пространственной экологии животных является ключевой (keystone) вид, определяющий структурный характер определенной экосистемы; таковым для территории Юга Российского Дальнего Востока следует признать амурского тигра. В данном исследовании для отображения пространственных особенностей были взяты



точки фиксации следов тигров в охотхозяйствах Партизанского и Лазовского районов Приморского края, показанные в контексте основных типов охотничьих угодий (рис. 4).



**Природно-антропогенные комплексы**

	Внутренние водные объекты		Леса широколиственные
	Леса хвойные вечнозеленые		Луга
	Леса мелколиственные		Непригодные для ведения охотничьего хозяйства
	Леса смешанные с преобладанием хвойных пород		Пашни
	Леса смешанные с присутствием широколиственных пород		Пойменные комплексы с преобладанием леса
			Пойменные комплексы смешанные кустарниковые

*Рис. 4. Типы охотничьих угодий модельного района с показом точечной фиксации следов амурского тигра (выборка сделана на основе сведений единовременного учета тигра в 2004–2005 гг.)*

*Fig. 4. Types of hunting grounds of model area accompanied with demonstration of point fixation of Amur tiger traces (the sample is based on one-time recording of the tiger in 2004–2005)*

При обращении к карте местообитаний амурского тигра можно отметить весьма существенное различие в фактически зафиксированных следах тигра в пределах групп типов охотничьих угодий, выделенных охотоведом П.В. Барановым. Из всего потенциального многообразия к настоящему времени проанализированы только пороговые значения отдельно при максимальных значениях отдельного топологического параметра — средней геодезической  $\lambda$ .

Второй локальный максимум  $\lambda$  свидетельствует о достижении порога, при котором происходит основное формирование сообществ (кластеров). В качестве оценки численности тигра принимается число кластеров за минусом отбракованных, тех, у которых число узлов составляет менее двух процентов от общего числа узлов в сети. Нижней границей являлось число связанных компонентов сети при  $R_0 = 100$  км (выше этого значения происходит формирование графа, практически представляющего один гигантский кластер). Сеть, демонстрирующая связность следов амурского тигра при пороговом значении  $R_0 = 10$  км (с координатной привязкой к обследованной территории), представлена на рис. 5.

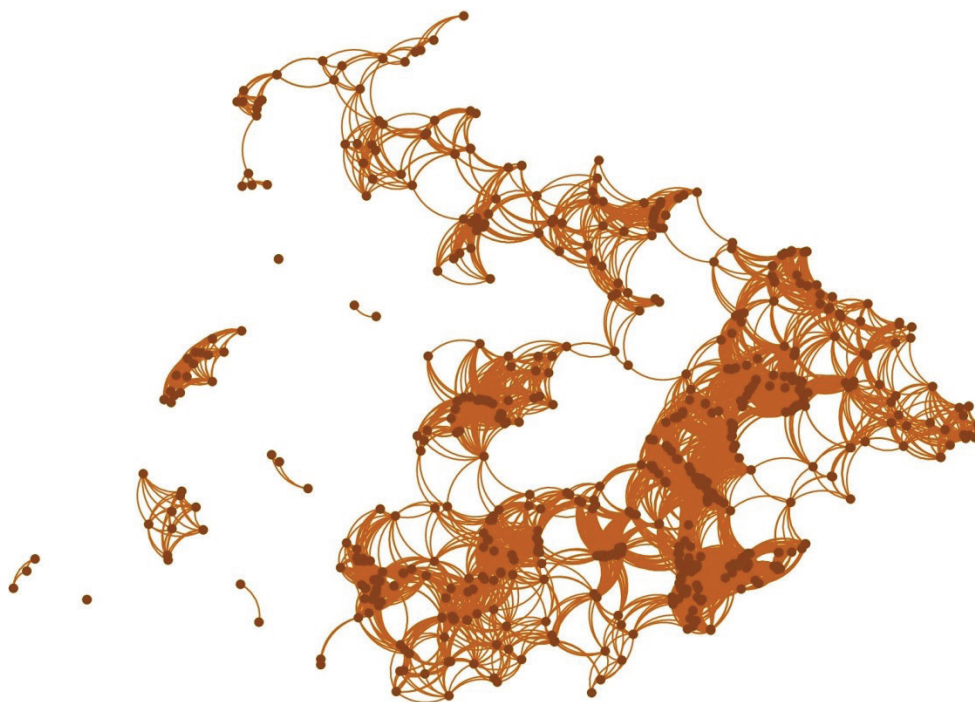


Рис. 5. Связность следов амурского тигра ( $R_0 = 10$  км)  
Fig. 5. Connectivity of Amur tiger traces ( $R_0 = 10$  km)

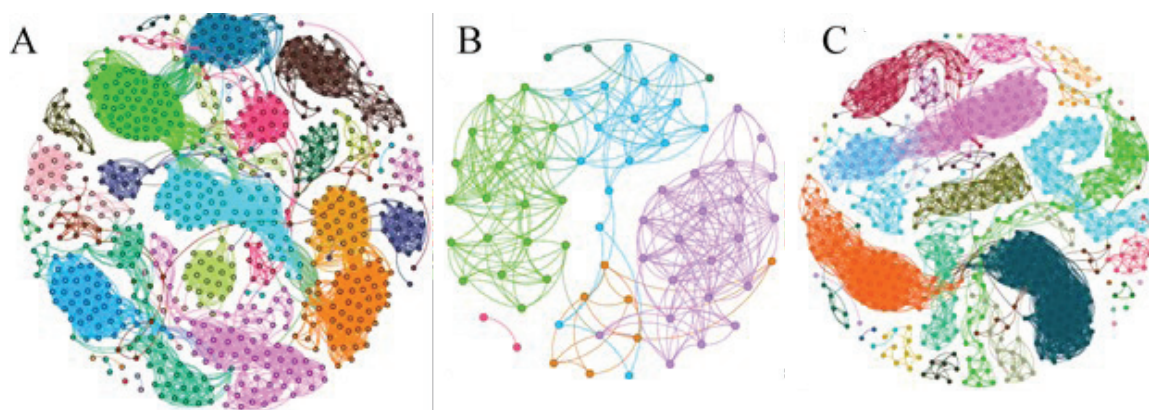
На заповедной территории «Зов Тигра» по данным 2005 г. оцениваемая численность тигра —  $6(-2) = 4$ , и не ниже 3. В Лазовском заповеднике по данным 2005 г. оцениваемая численность тигра —  $37(-26) = 11$ , и не ниже 8. Исследования тигриных местообитаний [Керли, Борисенко, 2017; Салькина, Поддубная, 2019] были выполнены с использованием фотоловушек (в Лазовском заповеднике с 2008 по 2017 гг. и в НП «Зов тигра» с 2011 по 2017 гг.). Минимальная численность хищников во время зимних учетов разных лет составляла от 2 до 8 особей в НП «Зов тигра» и от 6 до 13 особей в Лазовском госзаповеднике. Предполагая, что за пятилетний срок не произошло резких изменений в популяции тигра, результаты наших расчетов для 2005 г. находятся в хорошем согласии с вышеприведенными данными.

Итак, на модельной территории по данным 2005 г. оцениваемая нами численность тигра —  $32(-12) = 20$ , но не ниже 18. Значения соответствующих порогов сетевизации дают оценки значения расстояний от центра участка обитания одного тигра до границ участка обитания его соседа — 10 км (Лазовский госзаповедник), 12.5 км (национальный парк «Зов тигра») и 35 км (модельная территория). Наши расчеты территории обитания в  $314$  км<sup>2</sup> и  $491$  км<sup>2</sup> также не противоречат заявляемым [Керли, Борисенко, 2017; Салькина, Поддубная, 2019] размерам потенциальных участков взрослой тигрицы в 200–400 км<sup>2</sup>.



Важно, что это расстояние включает не только радиус кругового участка обитания хищника, но и ширину незаселенной зоны. В нашем примере вполне очевидно, что расстояние в 35 км, являются характерным масштабом для радиусов условных круговых участков мест обитания тигров (с включением зоны, где хищник не бывает), что не противоречит наблюдениям зоологов.

Для всеобъемлющего и междисциплинарного анализа угроз существованию крупных хищников (на примере амурского тигра) через фрагментацию мест его обитания предполагается перспективным сетевое описание стихийных бедствий и изменений ландшафта, заселенности территорий, хозяйственной деятельности и транспортного освоения и других факторов. Безусловно, необходимо дальнейшее сопоставление заявленных метрик связности, в т. ч. и дополнительных, с наблюдаемыми явлениями в мире тигров для установления непосредственной связи топологических характеристик и самих явлений. Напрашивается глубокое сопоставление сетевых, топологических параметров (в т. ч. комбинаций метрик) при разных порогах с реально наблюдаемыми и фиксируемыми процессами и явлениями, что способствовало бы выявлению (расшифровке) скрытых и к настоящему времени и не до конца понимаемых взаимосвязей (например, свидетельств об истощении кормовой базы, фрагментации ландшафта, отклике на иные угрожающие факторы).



*Рис. 6. Сообщества сетевой структуры модели, отвечающие пиковым значениям диаметра и средней геодезической для модельной (охотхозяйства Партизанского и Лазовского районов — А) и заповедных территорий (национальный парк «Зов тигра» — В и Лазовский заповедник — С). Узлы, принадлежащие разным сообществам, размечены разными цветами*

*Fig. 6. Model network structure communities corresponding to peak values of diameter and mean geodesic for model (hunting grounds of Partizansky and Lazovsky district — A) and protected areas (Zov Tigra “Call of the Tiger” National Park — B, Lazovsky Reserve — C). Nodes belonging to different communities are marked with different colors*

На рисунке 6 представлены сообщества сетевой структуры моделей, отвечающие пиковым значениям средней геодезической для модельной и заповедных территорий. Оценка территории обитания тигра в предположении, что в идеальном варианте она имеет форму круга и при отсутствии незаселенной зоны, в НП «Зов тигра» и Лазовском госзаповеднике составляет 314 км<sup>2</sup> и 491 км<sup>2</sup>.

Для изучения проблемы в наибольшей степени подходит пространственная экология животных. Во многих работах демонстрируется относительная успешность анализа оценки связности в применении к проблеме устойчивости дикой природы [Maguire et al., 2015].

Предстает актуальной проблема выявления географического распределения охотничьих животных, являющихся объектом конкурентного интереса человека и крупных хищников. Она имеет полисистемный (междисциплинарный) формат, что подчеркивается многоплановостью задач по ее решению (как научно-технических, так и правовых, организационных), множественностью участников, наличием разного рода барьеров (ведомственных, территориальных и междисциплинарных). Несомненно, особую важность имеют сетевые измерители — метрики и индикаторы, свидетельствующие об угрожающем состоянии популяции тигров, но не менее важным для сопоставления являются карты плотности населения копытных животных — основных объектов питания тигра.

Для набора порогов в диапазоне 1–100 км в датасете узлов и связей проведены расчеты ключевых сетевых метрик модели:  $N$  — число узлов,  $M$  — число связей,  $\lambda$  — среднее кратчайшее расстояние (далее — среднее геодезическое),  $n_c$  — число сообществ (табл. 1).

Табл. 1. Метрики связности обитания амурского тигра на модельной и заповедных территориях по данным 2005 г.

Table 1. Metrics of amur tiger habitat connectedness in model and protected areas based on 2005 data

314, км	Модельная территория				Зов тигра				Лазовский заповедник			
	N	M	$\lambda$	$N_c$	N	M	$\lambda$	$N_c$	N	M	$\lambda$	$N_c$
1	664	74	1	607								
2.5	664	198	1.08	535								
5	664	331	1.633	465	70	64	1.547	22	536	771	2.858	188
7.5	664	545	1.728	400	70	103	1.689	23	536	1373	5.504	118
10	664	748	2.899	346	70	132	2.839	16	<b>536</b>	<b>1864</b>	<b>6.908</b>	<b>83</b>
12.5	664	926	2.778	315	<b>70</b>	<b>168</b>	<b>4.167</b>	<b>12</b>	536	2387	5.194	60
15	664	1116	2.72	278	70	201	3.398	11	536	2861	4.569	51
17.5	664	1355	2.332	245	70	243	2.879	8	536	3436	3.847	44
20	664	1557	2.237	229	70	272	3.005	8	536	3856	3.907	39
22.5	664	1770	2.225	205	70	304	2.679	8	<b>536</b>	<b>4337</b>	<b>5.104</b>	<b>37</b>
25	664	1974	2.235	179	<b>70</b>	<b>329</b>	<b>4.624</b>	<b>6</b>	536	4756	6.034	33
30	664	2396	2.478	130	70	403	3.622	7	536	5642	5.062	23
<b>35</b>	<b>664</b>	<b>2928</b>	<b>5.491</b>	<b>106</b>	70	465	3.078	6	536	6503	4.169	20
40	664	3452	5.097	88	70	518	2.768	5	536	7296	3.697	19
50	664	4518	5.984	59	70	640	2.374	4	536	8836	3.253	12
60	664	5448	5.831	42	70	734	2.053	4	536	10408	2.687	9
<b>70</b>	<b>664</b>	<b>6406</b>	<b>9.146</b>	<b>32</b>	70	841	1.813	3	536	12068	2.344	9
80	664	7433	7.13	25	70	945	2.295	3	536	13562	2.184	9
90	664	8750	6.534	21	70	1057	1.993	3	536	15104	1.997	7
100	664	10348	7.856	18	70	1145	1.857	3	536	16683	2.192	8

Второй локальный максимум  $\lambda$  свидетельствует о достижении порога, при котором происходит основное формирование сообществ (кластеров). В качестве оценки численности тигра принимается число кластеров за минусом отбракованных, тех, у которых число узлов составляет менее 2 % от общего числа узлов в сети. Нижней границей являлось число связанных компонентов сети при  $R_0 = 100$  км. Сигнальной сетевой метрикой может служить  $\lambda$ -среднее кратчайшее расстояние (геодезическая). Ее первый локальный максимум соответствует значению порога, когда происходит объединение сетевого кластера следов отдельного участка со следами следов соседнего. Специальной работой должно быть исследование, в котором результаты сетевого моделирования можно использовать для



оценок площади участков совместного обитания тигра, лучших по качеству охотничьих угодий путем сопоставления таковых с необходимыми расчетами территориального распределения копытных животных, которые мы приводим здесь (рис. 7).

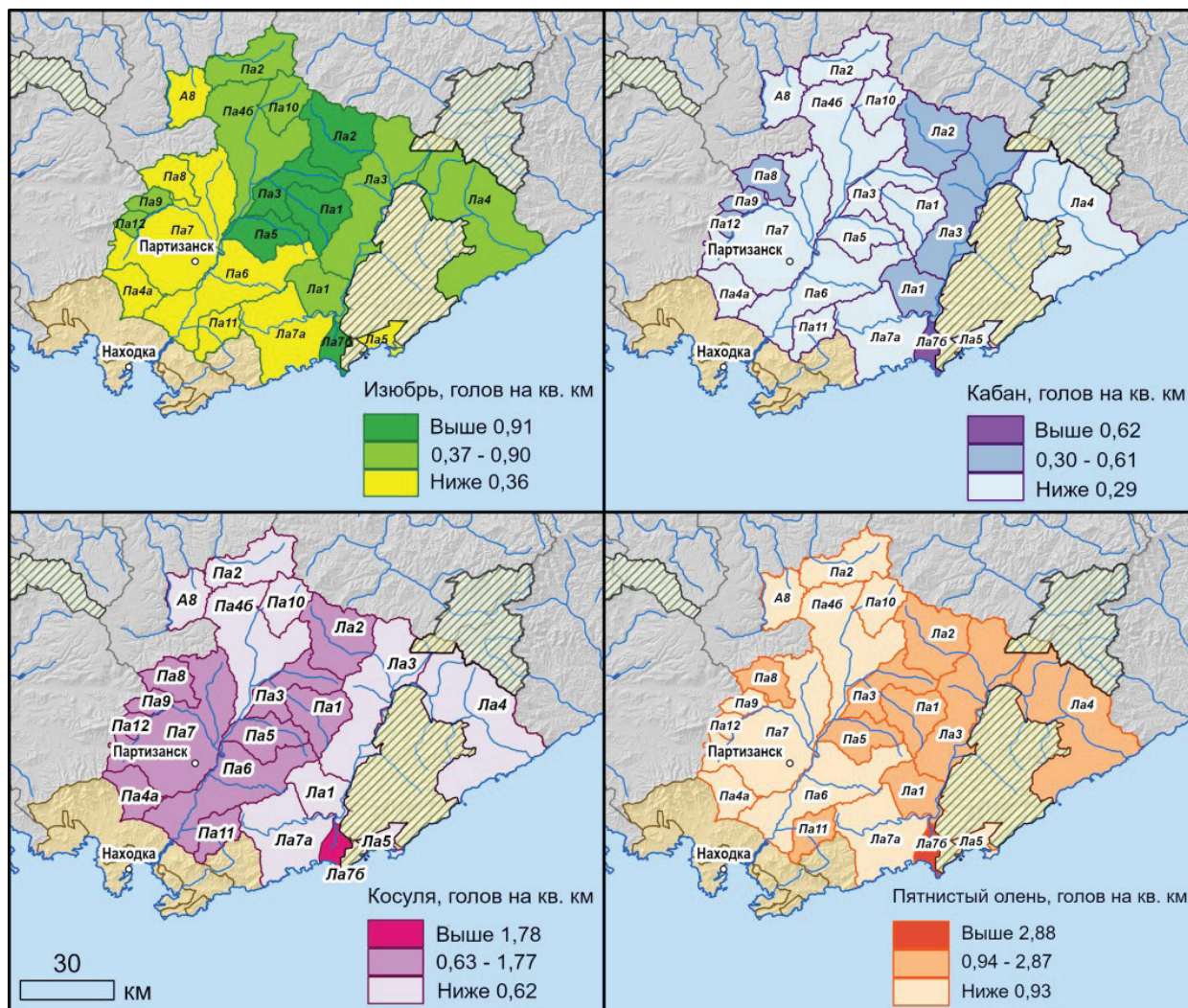


Рис. 7. Распределения копытных животных на модельной территории  
Fig. 7. Distributions of ungulates in model area

Применяемая синергия геоинформационного моделирования и сетевого анализа обеспечивает эффективным аналитическим инструментарием исследования в области пространственной экологии животных. В сетевых моделях оказываются «зашифрованными» такие характеристики, как площадь обитания особей, коридоры между участками обитания, в более сложной связи — достаточность ресурсов, различные неблагоприятные факторы, влияющие на популяцию хищника. Полученные нами результаты указывают, что сетевые метрики, определяющие связность (или, наоборот, фрагментарность) чувствительны к тем или иным наблюдаемым процессам или явлениям. Главное — наши результаты исследования показывают глубокое взаимопроникновение мест человеческой деятельности и инфраструктуры в основные места обитания крупных животных в зимний период [Bocharnikov et al., 1998].

Здесь следует заметить, что тигр выступает как естественный конкурент охотникам, поскольку главной задачей ведения охотничьего хозяйства является обеспечение успешной



охоты для лиц, приобретающих разрешения на добычу охотничьих животных. Не следует исключать и факты нелегальной охоты, а также гибель копытных от неблагоприятных климатических условий, вследствие болезней и зимней бескормицы. Необходим поиск баланса между поддержанием высокого уровня численности охотничьих объектов с поддержанием оптимальных условий для амурского тигра; полагаем, что в этом отношении хорошим инструментом является сетевой подход.

## **ВЫВОДЫ**

Геоинформационный и сетевой подход способны успешно дополнять и наглядно демонстрировать достаточно сложные закономерности, которые наблюдались авторами применительно к крупным харизматичным объектам животного мира на территории Приморского края. Для модельного участка территории Юго-Восточного Сихотэ-Алиня (Приморский край) подготовлены сетевые модели и геоинформационное отображение зимнего распределения амурского тигра, представляющее собой результат использования порога близости как ключевого варьируемого параметра сетевой модели; рассчитана плотность населения, основанная на ядерной оценке плотности; созданы карты распределения копытных, основанные на пересчете общего числа зверей, оцененных охотпользователями на территории охотничьих угодий; составлены базовые сетевые модели естественного присутствия крупных животных. Следующим этапом должно быть уточнение освоенного человеком пространства (дороги, населенные пункты), сложившихся систем землепользования и фактическим и оптимальным распределением крупных животных. На основании объемных результатов проведенного исследования и их анализа можно заключить, что сетевой подход и используемые модели топологии продемонстрировали свою адекватность в предметной области проблематики угроз существованию крупных хищников. Так, отмечено, что метрики сетевой модели находятся в согласии с наблюдаемыми количественными и качественными показателями популяции амурского тигра, в т. ч. такого, как размер участка обитания хищника. Оцениваемая его численность также не противоречит данным наблюдений. Выявленные пиковые значения сетевых метрик дают ориентиры на поиск слабых мест и территорий, критичных к выживанию тигра. Подтверждено как обоснованное использование порога близости в качестве базового варьируемого параметра сетевой модели. Несомненна перспективность подхода и сопутствующих моделей для прояснения скрытых сложных взаимосвязей численности хищника и происходящих изменений в технологических и природных компонентах территорий его обитания.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-57-44002. Авторы выражают свою признательность заместителю министра Министерства лесного хозяйства и охраны объектов животного мира А.Л. Суровому и начальнику управления по охране объектов животного мира и особо охраняемых природных территорий Приморского края А.П. Тимофеевой за представленные информационные материалы и организационную помощь в проведении полевых работ. Большая благодарность охотоведу А.А. Курашову за ценную информацию по учетам тигра в охотничьих хозяйствах Партизанского района Приморского края, генеральному директору НПО «Охотсервис» к. б. н. П.В. Баранову, оказавшему помощь в разработке классификации охотничьих угодий модельного района, научному сотруднику ТИГ ДВО РАН Т.К. Музыченко за практические советы и техническую помощь в подготовке иллюстраций к данной статье.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was partially funded by RFBR and MECSS, project No. 20-57-44002. The authors express their gratitude to the Deputy Minister of the Ministry of Forestry and Wildlife Protection A.L. Surov and the Head of the Department for the Protection of Wildlife Objects and Specially Protected Natural Areas of the Primorsky Territory A.P. Timofeeva for the information materials presented and organizational assistance in conducting field work. The authors are also grateful to the hunting specialist A.A. Kurashov for valuable information on tiger accounts in the hunting farms of the Partizansky district of the Primorsky Territory, the general director of the NPO Okhotservice, PhD of biological sciences P.V. Baranov, who assisted in the development of the classification of hunting grounds in the model region, T.K. Muzychenko, researcher of PGI FEB RAS for practical advice and technical assistance in preparing illustrations for this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Керли Л.Л., Борисенко М.М.* Выживаемость амурских тигров и их передвижение между Лазовским заповедником и национальным парком «Зов тигра». XII Дальневосточная конференция по заповедному делу, 2017. С. 87–89.
- Пикунов Д.Г., Середкин И.В., Солкин В.А.* Амурский тигр (история изучения, динамика ареала, численности, экология и стратегия охраны). Владивосток: Дальнаука, 2010. 104 с.
- Салькина Г.П., Поддубная Н.Я.* Следовые учеты тигра в Лазовском заповеднике. Мониторинг состояния природных комплексов и многолетние исследования на особо охраняемых природных территориях, 2019. № 3. С. 88–95.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 317 с.
- Bergsten A., Zetterberg A.* To model the landscape as a network: A practitioner's perspective. *Landscape and Urban Planning*, 2013. V. 119. P. 35–43. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.06.009.
- Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D.* Complex ecological networks. *Encyclopedia of Ecology*, 2019. P. 536–545. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10564-0.
- Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D., Liu J.* Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. *Ecology and Society*, 2014. V. 19. No. 3. Art. 43. DOI: 10.5751/ES-06881-190343.
- Fenu G., Pau P.L.* Topological and conceptual complex network models for environmental planning. *Procedia Computer Science*, 2016. V. 83. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.procs.2016.04.107.
- Gawecka K.A., Bascompte J.* Habitat restoration in spatially explicit metacommunity models. *Journal of Animal Ecology*, 2021. V. 90. Iss. 5. P. 1239–1251. DOI:10.1111/1365-2656.13450.
- Gray C., Baird D.J., Baumgartner S., Jacob U., Jenkins G.B., O’Gorman E.J., Lu X., Ma A., Pocock M.J., Schuwirth N., Thompson M., Woodward G.* FORUM: Ecological networks: The missing links in biomonitoring science. *Journal of Applied Ecology*, 2014. V. 51. Iss. 5. P. 1444–1449. DOI: 10.1111/1365-2664.12300.
- Maguire D.Y., James P.M.A., Buddle C.M., Bennett E.M.* Landscape connectivity and insect herbivory: A framework for understanding tradeoffs among ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2015. V. 31. P. 73–84. DOI: 10.1016/j.gecco.2015.05.006.
- Shi F., Liu S., An Y., Sun Y., Zhao S., Liu Y., Li M.* Spatio-temporal dynamics of landscape connectivity and ecological network construction in Long Yangxia Basin at the Upper Yellow River. *Land*, 2020. V. 9. No. 8. Art. 265. DOI: 10.3390/land9080265.
- Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G.* Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993. V. 68. P. 571–573. DOI: 10.2307/3544927.

*Tiang D.C.F., Morris A., Bell M., Gibbins C., Azhar B., Lechner A.* Ecological connectivity in fragmented agricultural landscapes and the importance of scattered trees and small patches. *Ecological Processes*, 2021. V. 10. Art. 20. DOI: 10.1186/s13717-021-00284-7.

## REFERENCES

*Bergsten A., Zetterberg A.* To model the landscape as a network: A practitioner's perspective. *Landscape and Urban Planning*, 2013. V. 119. P. 35–43. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.06.009.

*Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D.* Complex ecological networks. *Encyclopedia of Ecology*, 2019. P. 536–545. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10564-0.

*Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D., Liu J.* Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. *Ecology and Society*, 2014. V. 19. No. 3. Art. 43. DOI: 10.5751/ES-06881-190343.

*Fenu G., Pau P.L.* Topological and conceptual complex network models for environmental planning. *Procedia Computer Science*, 2016. V. 83. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.procs.2016.04.107.

*Gawecka K.A., Bascompte J.* Habitat restoration in spatially explicit metacommunity models. *Journal of Animal Ecology*, 2021. V. 90. Iss. 5. P. 1239–1251. DOI:10.1111/1365-2656.13450.

*Gray C., Baird D.J., Baumgartner S., Jacob U., Jenkins G.B., O'Gorman E.J., Lu X., Ma A., Pocock M.J., Schuwirth N., Thompson M., Woodward G.* FORUM: Ecological networks: The missing links in biomonitoring science. *Journal of Applied Ecology*, 2014. V. 51. Iss. 5. P. 1444–1449. DOI: 10.1111/1365-2664.12300.

*Kerley L.L., Borisenko M.M.* Amur tiger survivability and movement between Lazovsky Reserve and Zov Tigra (Call of the Tiger) National Park. XII Far Eastern conference on conservation, 2017. P. 87–89 (in Russian).

*Maguire D.Y., James P.M.A., Buddle C.M., Bennett E.M.* Landscape connectivity and insect herbivory: A framework for understanding tradeoffs among ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2015. V. 31. P. 73–84. DOI: 10.1016/j.gecco.2015.05.006.

*Pikunov D.G., Serezhkin I.V., Solkin V.A.* Amur tiger (history of study, range dynamics, abundance, ecology and conservation strategy). Vladivostok: Dal'nauka, 2010. 104 p. (in Russian).

*Salkina G.P., Poddubnaya N.Ya.* Trace records of the tiger in the Lazovsky Reserve. Monitoring of the state of natural complexes and long-term research in specially protected natural territories, 2019. No. 3. P. 88–95 (in Russian).

*Shi F., Liu S., An Y., Sun Y., Zhao S., Liu Y., Li M.* Spatio-temporal dynamics of landscape connectivity and ecological network construction in Long Yangxia Basin at the Upper Yellow River. *Land*, 2020. V. 9. No. 8. Art. 265. DOI: 10.3390/land9080265.

*Sochava V.B.* Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1978. 317 p. (in Russian).

*Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G.* Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993. V. 68. P. 571–573. DOI: 10.2307/3544927.

*Tiang D.C.F., Morris A., Bell M., Gibbins C., Azhar B., Lechner A.* Ecological connectivity in fragmented agricultural landscapes and the importance of scattered trees and small patches. *Ecological Processes*, 2021. V. 10. Art. 20. DOI: 10.1186/s13717-021-00284-7.