

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Исмаил Мохамед Эльсайед Эльсайед Али

**Морфологические и поведенческие различия между косатками
(*Orcinus orca*) рыбоядного и плотоядного экотипов Дальнего
Востока России**

1.5.12 Зоология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре зоологии позвоночных
биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** — ***Крученкова Елена Павловна*** —
доктор биологических наук
- Официальные оппоненты** — ***Бурдин Александр Михайлович*** —
доктор биологических наук,
Камчатский филиал ФГБУН
Тихоокеанского института географии
ДВО РАН, лаборатория гидробиологии,
ведущий научный сотрудник
- Мельников Владимир Васильевич*** —
доктор биологических наук,
ФГБУН Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И.
Ильичева ДВО РАН, лаборатория
исследования загрязнения и экологии,
ведущий научный сотрудник
- Соловьева Мария Андреевна*** —
кандидат биологических наук
ФГБУН Институт проблем экологии и
эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
лаборатория поведения и поведенческой
экологии млекопитающих,
старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «3» марта 2025 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.8 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, биологический факультет, ауд. М-1.

E-mail: ksenperf@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3321>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



К.С. Перфильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности. Хищники верхних трофических уровней играют важную роль в структуре экосистем. В морских экосистемах косатка *Orcinus orca* (Linnaeus, 1758) считается вершиной пищевой пирамиды. Косатка как вид является хищником с широкой экологической нишей (Ford, 2009; Lefort et al., 2020) и разнообразным рационом, охватывающим добычу от мелких стайных рыб до китообразных, таких как синие киты (*Balaenoptera musculus*) (Ford et al., 1998; Krahn et al., 2008; Totterdell et al., 2022). Тем не менее, во многих районах формируются локальные экотипы, специализирующиеся на охоте на определенный тип добычи. Различные экотипы косаток, несмотря на то, что их относят к одному и тому же виду, демонстрируют генетические и экологические отличия (Ford et al., 1998; Ford et al., 2000; Pitman et al., 2011; Pitman & Ensor, 2003; Saulitis et al., 2000). В северо-западной части Тихого океана косатки разделяются на два экотипа: рыбадные косатки или R-тип и плотоядные косатки, также называемые косатками Бигга, или Т-тип (Filatova et al., 2018; Filatova et al., 2019; Ismail et al., 2023). Эти экотипы часто встречаются в одних и тех же районах, однако они не вступают в социальные взаимодействия и репродуктивно изолированы (Filatova et al., 2015a; Foote et al., 2011; Morin et al., 2010). Эта изоляция связана с существенными различиями в их морфологии (Baird & Stacey, 1988; Kotik et al., 2023), экологии (Bigg, 1987), поведении (Morton, 1990), акустической коммуникации (Deecke et al., 2005; Filatova et al., 2015b; Foote & Nystuen, 2008), социальной структуре (Baird & Dill, 1996), рационе (Borisova et al., 2020; Herman et al., 2005; Filatova et al., 2023) и других аспектах. Несмотря на эти различия, российские рыбохозяйственные институты не признают существование двух отдельных экотипов и необходимость их отдельной оценки. (см. например, Болтнев, 2017). По этой причине ВНИРО (Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии) по-прежнему оценивает численность обоих экотипов косаток как одной популяции. Отчасти это связано с тем, что морфологические различия между экотипами не очевидны для неспециалиста при наблюдении за китами в море. К сожалению, до настоящего времени не существует автоматизированных методов, способных легко идентифицировать эти два экотипа на фотографиях без трудоёмкого процесса оцифровки контуров плавников.

Косатки R-типа в основном питаются рыбами, такими как терпуг и лосось, в то время как косатки T-типа охотятся на морских млекопитающих, включая тюленей и китов. Примечательно, что атаки на морских млекопитающих со стороны рыбадных косаток R-типа не наблюдались, тогда как косатки T-типа охотятся на тюленей, морских свиней и даже каланов (Ford, 2009; Filatova et al., 2015a; Shpak, 2012; Fomin, 2023). Пищевая специализация этих форм в российских водах была описана на основе результатов анализа стабильных изотопов, показавшего, что трофический уровень косаток T-типа в среднем выше, чем трофический уровень косаток R-типа (Филатова и др., 2014; Borisova et al., 2020). В то же время, систематического анализа видового состава жертв косаток в акватории Дальнего Востока России до сих пор не проводилось.

Кроме того, одним из важных различий между экотипами косаток является их социальная структура. Рыбадные косатки образуют тесные семейные группы, в которых все члены связаны родством по материнской линии и проводят всю жизнь вместе. Самцы и самки после достижения половой зрелости остаются в материнской группе, поддерживая пожизненную связь с матерью. Семейные группы в составе сообщества регулярно взаимодействуют между собой (Bigg et al., 1990; Matkin et al., 1999; Ivkovich et al., 2010). В отличие от них, плотоядные косатки имеют более гибкую социальную структуру. Обычно они формируют меньшие по размеру и менее стабильные группы, чаще всего состоящие из матери и её детёнышей, и имеют слабые социальные связи по сравнению с крепкими семейными группами рыбадных косаток (Baird & Whitehead, 2000). Сравнение социальных структур рыбадных и плотоядных экотипов косаток в северо-западной части Тихого океана имеет ключевое значение для понимания их уникальных экологических ролей и поведения. Эти различия влияют на взаимодействие каждого экотипа с

окружающей средой и добычей, что, в свою очередь, отражается на всей морской экосистеме (Baird & Whitehead, 2000; Matkin et al., 1999; Ivkovich et al., 2010).

Настоящее исследование направлено на восполнение этих пробелов. Сравнение социальных структур и использование современных методов, таких как искусственные нейронные сети для морфологической идентификации, помогут уточнить различия между дальневосточными экотипами косаток. Решение этой проблемы важно для разработки эффективных стратегий управления и сохранения популяций косаток, что, в свою очередь, способствует устойчивости морских экосистем в целом.

Цель и задачи работы. Целью работы является оценка морфологических и поведенческих различий между рыбающим и плотоядным экотипами косатки Дальнего Востока России.

Основные задачи исследования: 1) оценить возможность различения экотипов искусственными нейронными сетями по различиям в форме спинного плавника и седловидного пятна; 2) вычислить коэффициент социальной связи между диадами косаток в каждом сообществе, оценить количественные характеристики социальной структуры и сравнить их между экотипами; 3) построить социальную сеть для каждого из сообществ косаток и сравнить характеристики социальных сетей между экотипами; 4) описать видовой состав объектов питания каждого экотипа в дальневосточных морях.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются косатки двух экотипов (рыбающие и плотоядные), обитающие в северо-западной части Тихого океана, включая дальневосточные моря России. Особое внимание уделено их морфологическим, социальным характеристикам и особенностям пищевой специализации.

Предметом исследования являются ключевые аспекты различий между двумя экотипами косаток (рыбающие и плотоядные), включая их морфологические особенности (форма плавников и седловидного пятна, используемые для идентификации), социальную структуру (размер групп, индексы ассоциации, структура социальных сетей) и пищевую специализацию, отражающую адаптацию к различным экологическим условиям.

Научная новизна работы. Настоящая работа является детальным исследованием различий между двумя экотипами косаток в северо-западной части Тихого океана, подтверждающим их морфологические, социальные и пищевые различия. Впервые использованы методы машинного обучения, включая автоматическое машинное обучение (AutoML), для дифференциации экотипов косаток (R-тип и T-тип) на основе их морфологических признаков, таких как форма спинного плавника и седловидного пятна. Полученные результаты направлены на сокращение разрыва между наукой об охране природы и машинным обучением, а также будут способствовать использованию подобных подходов для изучения других видов. Кроме того, впервые была детально изучена социальная структура двух экотипов в российских водах, продемонстрированы основные характеристики их социальных сетей, а также выявлены различия в рационе питания.

Теоретическая и практическая значимость работы. Наше исследование подтверждает существование морфологических различий между этими экологическими типами косаток. Результаты работы углубляют понимание закономерностей формирования социальных структур морских млекопитающих в северо-западной части Тихого океана, демонстрируя различия в социальной структуре и рационе двух экологических типов косаток (тип R и тип T).

Результаты исследования могут быть использованы для разработки эффективных стратегий управления и сохранения популяций косаток, а также помогут уточнить их охранный статус. Исследование предоставляет научные данные, которые могут быть полезны для государственных и экологических организаций при разработке программ мониторинга и регулирования использования морских ресурсов. Предложенные методы машинного обучения (включая AutoML) могут быть адаптированы для идентификации других видов морских млекопитающих, что значительно упростит мониторинг и оценку их численности. В целом, использование искусственного интеллекта для различения

экологических типов косаток (тип R и тип T) является значительным шагом, который помогает неспециалистам, таким как рыбаки, туристы, экскурсоводы и гиды, легко отличать эти типы.

Методология и методы исследования. Сбор материала проводился в ходе полевых исследований в рамках нескольких научных проектов (Проект по изучению косаток на Дальнем Востоке России "FEROP", экспедиции Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН), осуществлявшихся с 2000 по 2022 годы. Эти проекты включали наблюдения за китообразными с судов, проводимые вдоль побережья Восточной Камчатки, Курильских островов, острова Сахалин, Командорских островов, Чукотки и в Охотском море, а также наблюдения с наземным базированием в полевом лагере и с ежедневными выездами на маломерных судах в летние месяцы в Авачинском заливе, у Командорских островов и Чукотки, в Охотском море.

Модель машинного обучения была реализована с использованием двух платформ: Edge Impulse и Google Cloud AutoML. Данные, использованные для анализа социальной структуры, были обработаны с использованием программы Socprog, разработанной Уайтхедом (Whitehead) в 2009 году. Генетический анализ был выполнен в Кабинете методов молекулярной диагностики Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Генетический анализ и определение вида рыбы по чешуе проводилось участниками Проекта по изучению косаток на Дальнем Востоке России.

Положения, выносимые на защиту

1. Платформы машинного обучения демонстрируют высокую эффективность в дифференциации экотипов, с высокой точностью классифицируя косаток R- и T-типа.

2. Рыбоядные косатки образуют более крупные и сложные социальные группы, тогда как плотоядные косатки формируют меньшие и более компактные группы. Это свидетельствует о значительных различиях в социальной структуре, обусловленных их экологической специализацией и охотничьими стратегиями.

3. Между экотипами косаток в российских водах существуют выраженные различия в пищевых предпочтениях: косатки R-типа питаются различными видами рыбы, а косатки T-типа – преимущественно морскими млекопитающими, а также, возможно, кальмарами.

Личный вклад автора. Соискатель принимал личное непосредственное участие на всех этапах исследования. Полевые работы по сбору данных были выполнены в рамках нескольких научных проектов, проводившихся с 2000 по 2023 годы. Соискатель принимал участие в полевых работах, включая две экспедиции: одну на Командорские острова в 2021 году и другую — в Авачинский залив в 2023 году. Соискатель проводил индивидуальную идентификацию животных по фотографиям, обработку данных по социальным связям, анализ данных по встречаемости косаток на Командорских островах и в Авачинском заливе. Кроме того, самостоятельно были выполнены анализ с использованием методов машинного обучения, обобщение и интерпретация полученных результатов, а также подготовка публикаций, статей и докладов. Диссертация включает рисунки и фотографии, сделанные автором.

Апробация результатов диссертации.

Отдельные результаты диссертационного исследования доложены на 3 научных конференциях в форме двух устных докладов (на английском) и одного стендового доклада (на русском языке). Кроме того, материалы диссертации были доложены на семинаре лаборатории поведения и заседании кафедры зоологии позвоночных биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.:

1. **Ismail M.E., Hoyt E., Filatova O.A.** Using Elliptical Fourier analysis to determine the variation in the dorsal fin's morphology among the killer whale ecotypes in the Russian Far Eastern waters (Marine Mammals of the Holarctic: XI international conference, онлайн, 2021 г.) (устный доклад на английском языке).

2. **Исмаил М.Э., Федутин И.Д., Филатова О.А.** Наблюдения рыбадных и плотоядных косаток в акватории западного побережья острова Беринга в 2008–2021 гг («Млекопитающие в меняющемся мире: актуальные проблемы териологии» (XI Съезд Териологического общества при РАН) (г. Москва, Россия, ИПЭЭ РАН, 14–18 марта 2022 г.) (стендовый доклад)

3. **Ismail M.E., Hoyt E., Filatova O.A.** Using Neural Network to determine the variation in the dorsal fin's morphology within killer whale ecotypes (34th Conference of the European Cetacean Society, О Гроув, Галисия, Испания, 16-20 апреля 2023) (устный доклад на английском языке).

Публикации автора по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 3 статей, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science, RSCI (одна из статей была опубликована сначала на русском языке, а затем на английском в англоязычной версии того же журнала). Личный вклад в каждую публикацию отражен в списке публикаций на стр. 25 автореферата.

Структура и объём диссертации. Текст диссертации изложен на 139 страницах и состоит из следующих разделов: введение, обзор литературы, материалы и методы, три главы (в каждой представлены результаты и их обсуждение), а также заключение, выводы, благодарности, список литературы и приложения. В тексте диссертации представлено 9 таблиц и 22 рисунков. Список литературы включает 146 источников, из которых 15 — на русском языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы рассмотрены основные аспекты биологии косаток (*Orcinus orca*), включая различия в их экотипах, морфологии, поведении и социальной структуре. Оценено текущее состояние изученности рыбадного и плотоядного экотипов косаток, включая их экологические особенности, репродуктивную изоляцию и адаптации к среде обитания. Рассмотрены современные подходы к изучению косаток с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Различение экотипов по морфологическим признакам с использованием машинного обучения

2.1.1. Сбор данных. Сбор данных проходил в северо-западной части Тихого океана с использованием различных методов в рамках нескольких научных проектов, проводившихся с 2000 по 2022 годы. Эти исследования варьировались от опросов китообразных с судов, проведенных вдоль побережья Восточной Камчатки, Курильских островов, острова Сахалин, Командорских островов, Чукотки и в Охотском море, до наблюдений из базовых лагерей с ежедневными выходами на катерах в летние месяцы в Авачинском заливе, у Командорских островов и Чукотки (Рис. 1).



Рис. 1. Карта мест, где проводили сбор данных (фотографий). Зеленые круги - рыбадный экотип косаток (R-тип), красные треугольники — плотоядный экотип (Т-тип).

2.1.2. Идентификация экотипов. Идентификация экотипов косаток в полевых условиях была основана на различиях в форме спинного плавника и седловидного пятна (Baird & Stacey, 1988; Emmons et al., 2019; Filatova et al., 2015a).

2.1.3. Обработка фотографий. Качество фотографий, использованных для обработки, оценивалось по следующим параметрам: четкость, угол съемки и расстояние до косатки. На фотографии должно было быть хорошее освещение, без теней. Животные должны быть сняты при хорошем фокусе камеры и расположены параллельно плоскости камеры. Любые фотографии, содержащие помехи, такие как блики, отвлекающий фон или брызги воды, которые могли скрыть интересующую часть тела животного, были исключены. На всех фотографиях в кадр попадали как спинной плавник, так и седловидное пятно, хотя на многих из них была видна лишь часть седловидного пятна. После отбора фотографии были обрезаны с целью центрирования объекта с использованием ACDsee Photo Studio Ultimate и отредактированы в Photoshop CC для корректировки яркости и контрастности, после чего были преобразованы в черно-белый формат для минимизации отвлекающих факторов цвета. Всего для анализа было использовано 1084 фотографии (по 542 для каждого экотипа). На фотографиях рыбадных косаток (R-тип) было представлено 250 особей, а на фотографиях плотоядных косаток (Т-тип) — 197 особей.

2.1.4. Машинное обучение (ML). После обрезки и редактирования выбранных фотографий модель была реализована с использованием двух платформ машинного обучения: Edge Impulse и Google Cloud AutoML. Edge Impulse — это бесплатная онлайн-платформа, предназначенная для упрощения процесса сбора данных и обучения моделей глубокого обучения. Модель обучалась с использованием обучения с учителем, которое является самым распространённым типом в машинном обучении и обычно применяется для таких задач, как классификация фотографий. Для контролируемого обучения используют размеченные наборы данных для обучения алгоритмов предсказанию результатов и распознаванию шаблонов (Nasteski, 2017). Google Cloud AutoML представляет собой сервис, который позволяет обучать и развёртывать модели машинного обучения. Мы приняли стандартные настройки разделения набора данных: 80% фотографий каждого экотипа использовались для обучения, 10% — для валидации, а остальные 10% — для тестирования модели. Была выбрана оптимизация модели с более высокой точностью, а лимит на обучение был установлен на уровне 8 часов. Кроме того, чтобы убедиться, что результат работы нашей модели не является случайным, а её способность различать спинные плавники экотипов R-типа и Т-типа действительно основана на морфологических

различиях между ними, мы обучили другую модель, используя рандомизированные группы. Фотографии обоих экотипов были перемешаны, а затем случайным образом разделены на две группы (группа 1 и группа 2), каждая из которых содержала равное количество фотографий от обоих экотипов. Эти рандомизированные группы также были загружены на обе платформы с использованием модели. Использовались те же фотографии и те же настройки.

2.2. Социальная структура: Различия в социальных связях между экотипами касаток

2.2.1. Место и сроки сбора материала. Материал был собран в рамках проекта по исследованию косаток на Дальнем Востоке России (Far East Russia Orca Project, FEROP). Работа проходила у юго-западного побережья острова Беринга на Командорских островах в летние месяцы (с мая по сентябрь). В этой работе использовались данные о косатках R-типа, собранные в период с 2013 по 2021 год. Кроме того, данные о косатках T-типа были собраны в Авачинском заливе на Камчатке в период с 2002 по 2022 годы. (Рис. 2).

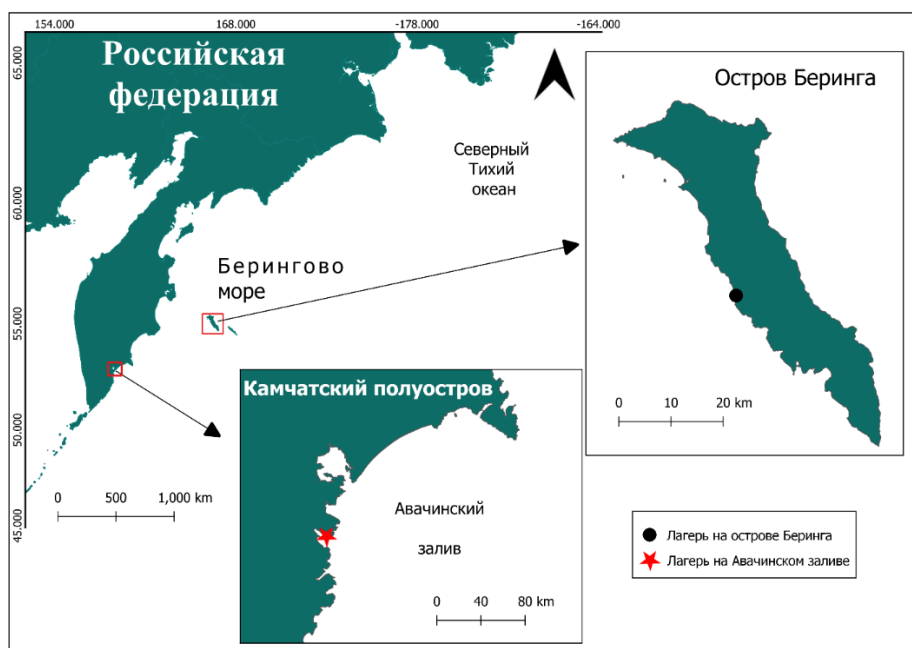


Рис. 2. Карта районов исследований: Авачинский залив и остров Беринга. Карта была построена с использованием QGIS 3.16.

2.2.2. Методика анализа данных. Идентификация отдельных косаток проводилась на основе высококачественных фотографий левой стороны животного с использованием метода фотоидентификации (Bigg et al., 1990). В процессе фотоидентификации учитывались различные естественные особенности: форма седловидного пятна, контуры и размеры спинного плавника, выемки на плавнике, а также шрамы и царапины на теле. Для обработки фотографий использовали программы ACDSee Photo Studio Ultimate 2019 и Adobe Photoshop CC. Идентификацию некоторых детенышей в возрасте примерно до 3 лет (до момента четкого проявления седловидного пятна) проводили с учетом идентификации их матери и по форме заглазничного пятна. В большинстве случаев детенышей можно было идентифицировать исключительно по их естественным меткам. Каждое животное получило уникальный идентификационный номер.

2.2.3. Анализ ассоциаций между особями. Оценка частоты взаимодействий между особями является одним из методов изучения структуры и интенсивности социальных связей (Whitehead, 2008). Под социальным контактом подразумевалось совместное присутствие особей в группе. Частоту контактов для каждой диады оценивали с использованием стандартного индекса связи Simple Ratio Index (SRI) (Ginsberg, Young 1992). Значения индекса SRI варьируют от 0 до 1. Значения индекса SRI были рассчитаны с помощью программы SOCPROG 2.9 (Whitehead, 2009), которая широко используется в

исследованиях социальной организации китообразных и других млекопитающих (Gowans et al., 2001; Einfeld, 2003). Само по себе значение индекса SRI несёт информацию о частоте контактов между особями, но не указывает на случайность связей. Даже если особи часто взаимодействуют и их индекс связи высок, это не обязательно свидетельствует о стабильности связи и предпочтении контактов друг с другом, например, в популяциях, где все особи случайно контактируют друг с другом. Чтобы оценить случайность контактов между косатками в данной выборке, был использован тест на предпочтение-избегание, основанный на процедурах бутстрепа (Whitehead, 2008). При этом генерируется определённое количество искусственных выборок на основе реальных данных. Состав групп изменяется случайным образом так, что количество особей в группе и число встреч с каждой остаются неизменными (трансформация Мэнли-Брэйдера) (Whitehead, 2008). Для всех выборок рассчитываются следующие параметры: среднее значение индекса SRI, стандартное отклонение, процент ненулевых значений индексов, среднее ненулевое значение индекса, стандартное отклонение ненулевых значений индекса. Затем оценивается достоверность различий этих параметров между реальной и искусственными выборками. Более высокие значения стандартного отклонения (SD) и коэффициента вариации (CV) в реальной выборке по сравнению с искусственными свидетельствуют о наличии стабильных долговременных связей. Для исследования было сгенерировано 10000 искусственных выборок с 1000 изменений в каждой. В данном исследовании была использована методика анализа социальных связей, подробно описанная разработчиком программы Socprog (Whitehead, 2009).

2.2.5. Разделение популяции. Популяция была разделена на группы с использованием алгоритма Ньюмана (Newman, 2006), основанного на собственных векторах, для максимизации модулярности (Q) с целью выявления социальных кластеров в сети ассоциаций. Социальный кластер — это группа особей в популяции, которые более тесно связаны друг с другом по сравнению с остальными членами сообщества, что указывает на наличие сильных социальных связей внутри этой группы. Этот метод основан на расчёте связей, которые соединяют различные сообщества, их удалении и повторении процедуры, что приводит к последовательному разделению всей сети (Newman, 2004). Количество получаемых сообществ определяется на основе того деления, которое имеет лучший коэффициент модулярности, максимизируя значения ассоциаций внутри одного сообщества и минимизируя значения ассоциаций между членами разных сообществ (Newman, 2004). Коэффициент $\geq 0,3$ считается показателем эффективного разделения (Whitehead, 2008). Коэффициент модулярности рассчитывается как разница между долей связей внутри сообщества и ожидаемым значением, если бы сеть была случайной (Newman, 2004).

2.2.6. Анализ сети. График социальной сети рыбоядных и плотоядных косаток был построен с использованием алгоритма ForceAtlas2 (Jacomy et al., 2014) в программе Gephi (Bastian et al., 2009). Статистический анализ сети выполнен с использованием программы SocProg, а использованные показатели (определены в Whitehead, 2008) включают: Сила социальных связей (количество связей) (Strength); Мера влияния (Eigenvector centrality); Охват (Reach); Коэффициент кластеризации (Clustering Coefficient); Связность (Affinity).

2.3. Различия в питании экотипов косаток

Материалы, использованные в данной работе, были собраны в ходе экспедиций, проведенных в различных районах Дальнего Востока России. Экспедиции на Камчатке, Чукотке, в северной части Охотского моря и на западном побережье острова Беринга (Командорские острова) осуществлялись в рамках Дальневосточного проекта по косатке (FEROP), на Северном и Северо-западном лежбищах северных морских котиков на острове Беринга – в рамках экспедиции КамчатНИРО, а в западной части Охотского моря – в рамках экспедиции Института проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН. В большинстве случаев экспедиционные группы располагались в полевых лагерях на берегу, а выходы в

море для наблюдений за китообразными производились на небольшой моторной лодке (4–7 м) в светлое время суток. Исключение составляют наблюдения за косатками, поедавшими останки малого полосатика в Карагинском заливе, а также за животными, атаковавшими ларг в Тауйской губе. Они были выполнены в рамках исследовательских рейсов (в Карагинском заливе – на 10-метровой яхте, в Тауйской губе – на 14-метровом катере). Однако во всех этих случаях непосредственная работа с косатками также осуществлялась с небольшой моторной лодки.

2.3.1. Регистрация фактов охоты. В данном исследовании под охотой косаток на определенный вид добычи подразумевалась исключительно успешная охота, при которой были визуально зафиксированы убийство жертвы и ее поедание, либо наблюдались остатки поедаемой добычи (например, куски мяса, жира, внутренности, чешуя), либо добыча была обнаружена в желудке косатки. В данном исследовании не учитывались случаи, когда косатки находились в непосредственной близости от морских млекопитающих или скоплений рыбы и демонстрировали поведение, схожее с охотой, но убийство и поедание добычи достоверно зафиксированы не были.

2.3.2. Генетический анализ. Генетический анализ был выполнен членами команды Дальневосточного проекта по косатке "FEROP" в Кабинете методов молекулярной диагностики Института проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН.

2.3.3. Определение вида рыбы по чешуе. После успешной охоты косаток на рыбу исследовательская команда собирала фрагменты добычи, в том числе чешую, которая использовалась для идентификации вида. Определение вида рыбы по чешуе проводилось членами команды Дальневосточного проекта по косатке "FEROP"

Глава 3. РАЗЛИЧЕНИЕ ЭКОТИПОВ ПО МОРФОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

3.1. Результаты

3.1.1. Платформа (Edge Impulse). Модель на платформе Edge Impulse была обучена с использованием 80% (434) фотографий для каждого экотипа, оставшиеся 20% (108) были специально выделены для тестирования. После этапа обучения модель достигла точности в 90,8% (Рис. 5а). В ходе тестирования она успешно идентифицировала 91,7% фотографий косаток R-типа и точно распознала 94,4% фотографий косаток Т-типа. В целом, модель достигла точности в 93,06%. Кроме того, модель не смогла идентифицировать 5,6% фотографий R-типа и 2,8% фотографий Т-типа, которые были классифицированы как неопределенные. Это могло быть связано с различными факторами. Например, некоторые фотографии, содержащие признаки, не являющиеся явно характерными для какого-либо одного класса, вместо этого содержали атрибуты нескольких классов. Проблема могла возникнуть и просто из-за качества фотографий (Рис. 3б). Рандомизированные группы показали, что модели было трудно различать две случайно составленные группы. В этом случае она достигла точности в 51,1% на этапе обучения и 7,48% при тестировании модели (Рис. 3в и 3г).

3.1.2. Платформа (Google Cloud AutoML Vertex AI). На платформе Google Cloud 10% фотографий были использованы в качестве набора для валидации, чтобы уточнить и улучшить производительность обучения модели, обеспечивая её готовность к этапу тестирования. После завершения обучения модель использовала тестовый набор (10%) для предоставления окончательных метрик оценки. Модель достигла средней точности 98,17%, измеренной по площади под кривой precision-recall (Area under Precision-Recall Curve, AuPRC) (Рис. 4А). Точность (Precision) представляет собой показатель правильности модели в идентификации конкретного класса (R-типа или Т-типа). Он гарантирует, что фотография, классифицированная как R-тип (или Т-тип), действительно является R-типом (или Т-типом). Полнота (Recall) измеряет способность модели захватывать все экземпляры данного класса, не пропуская их. Показатель AuPRC демонстрирует, насколько хорошо модель сбалансировала точность и полноту при различных порогах. Когда показатель

AuPRC высок, это означает, что модель эффективно и точно классифицирует фотографии косаток на R-тип и T-тип (Рис. 4а и 4б). Более того, классификация рандомизированных групп на платформе Google Cloud AutoML показала, что модель не смогла различить две группы (Рис. 4в, 4г). Эти результаты подтверждают точность модели машинного обучения на платформе Google Cloud.

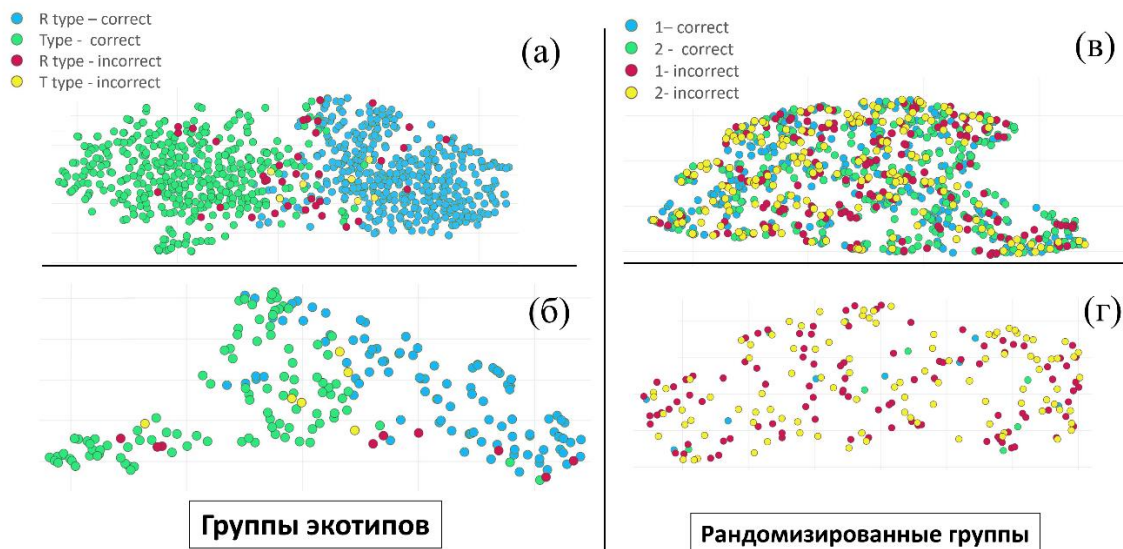


Рис. 3: Данные, использованные в платформе (Edge Impulse), для групп экотипов (фотографии R-тип и T-тип) и для рандомизированных групп: для этапа обучения (а) и (в), а также для тестирования модели (б) и (г). Точки, выделенные синим и зеленым цветом, классифицированы правильно; точки, выделенные красным и желтым цветом, классифицированы неверно (диаграммы экспортированы с платформы Edge Impulse).

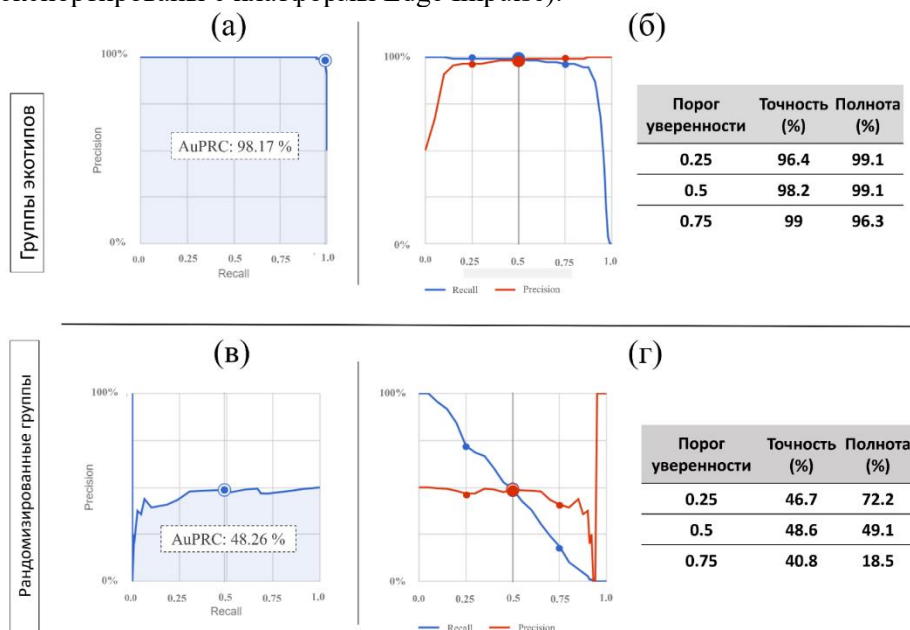


Рис. 4: Оценка модели AutoML для групп экотипов (фотографии R-типа и T-типа) (а) и рандомизированных групп (в). Площадь под кривой Precision-Recall (AuPRC); Кривая Precision-Recall в зависимости от порога достоверности (б и г) (диаграммы и значения экспортированы с платформы Google Cloud AutoML)

3.2. Обсуждение

Точность моделей на обеих платформах, Edge Impulse и Google Cloud AutoML Vertex AI, оказалась высокой, что свидетельствует об их успешной работе. Несмотря на относительно небольшой набор данных (1084 фотографии: 542 для каждого экотипа), не включающий самцов, детенышей и молодых особей, обученные модели смогли распознать

и выучить шаблоны и признаки, отличающие фотографии косаток R-типа от фотографий T-типа, что позволило их классифицировать.

Это исследование согласуется с выводами (Wäldchen & Mäder, 2018; Weinstein, 2018), что машинное обучение предоставляет мощную альтернативу для классификации изображений с целью различения экотипов, видов и даже подвидов. С другой стороны, исследование, использовавшее эллиптический анализ Фурье для различения экотипов косаток, достигло лишь 70% точности для контуров спинного плавника и 58% точности для контуров седловидного пятна (Emmons et al., 2019). Это демонстрирует сложности, с которыми сталкиваются подходы, задействующие искусственный интеллект, при достижении высокой точности в дифференциации морфологических признаков.

Различные модели машинного обучения смогли классифицировать виды комаров, несмотря на значительное межвидовое сходство и внутривидовое разнообразие (Park et al., 2020). Было отмечено, что модели глубокого обучения достигли высокой точности классификации, используя морфологические характеристики, аналогичные тем, которые применяют эксперты при классификации. Различные исследования использовали тот же подход для различения разнообразных типов организмов, включая птиц, насекомых, рыб, растений и беспозвоночных. Кроме того, алгоритмы машинного обучения доказали свою эффективность в других исследовательских областях, где требуется классифицировать изображения, например, в медицине. Платформа Google Cloud AutoML использовалась для различения двух подтипов рака легких (Zeng & Zhang, 2020) и для выявления инвазивной протоковой карциномы молочной железы (Borkowski et al., 2019).

Использование искусственного интеллекта (ИИ) для обнаружения этих различий служит объективной валидацией, помогая убедиться, что наблюдаемые исследователями различия не являются лишь предположениями или субъективными интерпретациями, и имеет потенциал для достижения аналогичной или даже более высокой точности. Обе платформы для классификации изображений (Edge Impulse и Google Cloud AutoML) сработали эффективно и адекватно представили результаты, с незначительными различиями, которые не повлияли на общий результат. Однако Google Cloud AutoML и другие аналогичные сервисы, такие как Amazon Web Services (AWS) и Microsoft Azure, бесплатны только в пределах определенных лимитов. Превышение этих лимитов ведёт к необходимости денежных затрат, тогда как платформа Edge Impulse полностью бесплатна и не имеет ограничений.

Многие авторы предлагали рассматривать косаток R-типа и T-типа как разные виды или подвиды (Baird & Stacey, 1988; Morin et al., 2010; Morin et al., 2024; Reeves et al., 2004). Эти два экотипа социально и генетически изолированы (Filatova et al., 2015a; Hoelzel et al., 2002; Hoelzel et al., 2007; Miller et al., 2010; Morin et al., 2024; Riesch et al., 2012). Настоящее исследование поддерживает дифференциацию этих экотипов, подтверждая стабильные морфологические различия между ними. Очевидно, что различие между рыбоядными (R-тип) и плотоядными (T-тип) косатками следует учитывать при проведении исследований численности, оценке влияния человека или изучении других биологических аспектов. На Дальнем Востоке России предпринимаются усилия для оценки различий между двумя экотипами косаток в целях их охраны (Filatova et al., 2015a). Охранные мероприятия могут быть более эффективными, если внутривидовые группы будут выделены в качестве отдельных подвидов или видов (Cronin, 2006). В этом отношении управление всеми косатками в конкретном регионе как единой управленческой единицей неприемлемо, поскольку оно не учитывает отличительные экологические и биологические характеристики этих животных. Текущее исследование ясно демонстрирует, что эти различия существуют и их наличие может быть подтверждено с использованием инструментов машинного обучения, что означает, что они реальны, объективны и надежны.

ГЛАВА 4. РАЗЛИЧИЯ В СОЦИАЛЬНЫХ СВЯЗЯХ МЕЖДУ РЫБОЯДНЫМИ И ПЛОТОЯДНЫМИ ЭКОТИПАМИ КОСАТОК

4.1. Результаты

4.1.1. Рыбоядные косатки (R-типа)

4.1.1.1. Ассоциации между особями (R-типа). В анализе использовались только те особи, которые были встречены 2 раза и более, как рекомендовано Whitehead (2008). В результате в анализ была включена 398 особей. С использованием программы SOCPROG 2.9 и индекса ассоциации Simple Ratio Index (SRI) были рассчитаны значения индексов ассоциации между особями. Среднее максимальное значение индекса ассоциации составило 0,82 (SD = 0,24).

4.1.1.2. Разделение популяции (R-типа). Кластерный анализ, проведенный с использованием модульности сообществ для особей, которые были встречены два раза и более, разделил популяцию на 39 социальных кластеров разного размера и полового состава (Рис. 5). Модульность этого разделения составила 0,888, что также указывает на успешное структурирование популяции на социальные кластеры. Размер каждого кластера варьировался от 1 до 27 косаток, со средним значением 10.21 (SD = 6.76) косаток. При этом один из кластеров (кластер 4) включал одну косатку, а 9 кластеров содержали 5 и менее особей. Остальные кластеры включали от 6 до 27 косаток (Рис. 5). Индекс ассоциации значительно варьируется между кластерами, что указывает на разнообразие социальных связей внутри популяции. Примечательно, что 10 кластеров из 39 демонстрируют самые высокие индексы ассоциации, равные 1,0, что свидетельствует о сильных социальных связях внутри этих групп (Рис. 6).

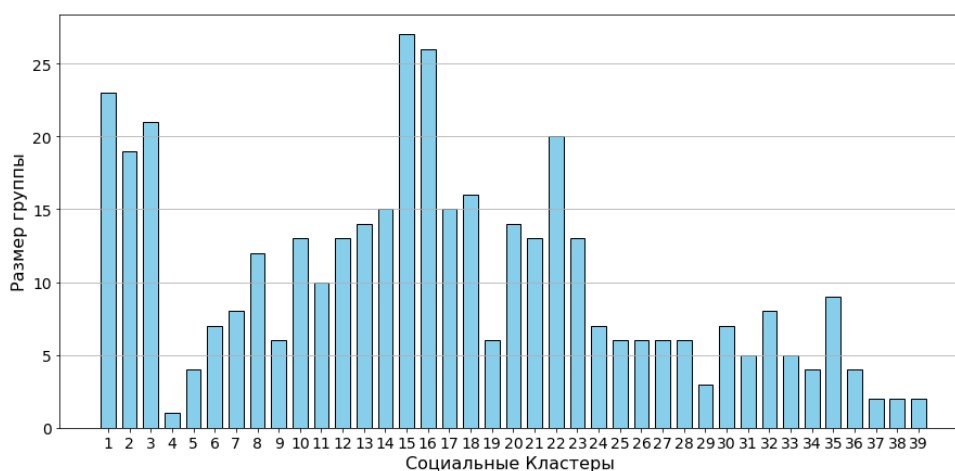


Рис. 5. Распределение особей по социальным кластерам для рыбоядных косаток.

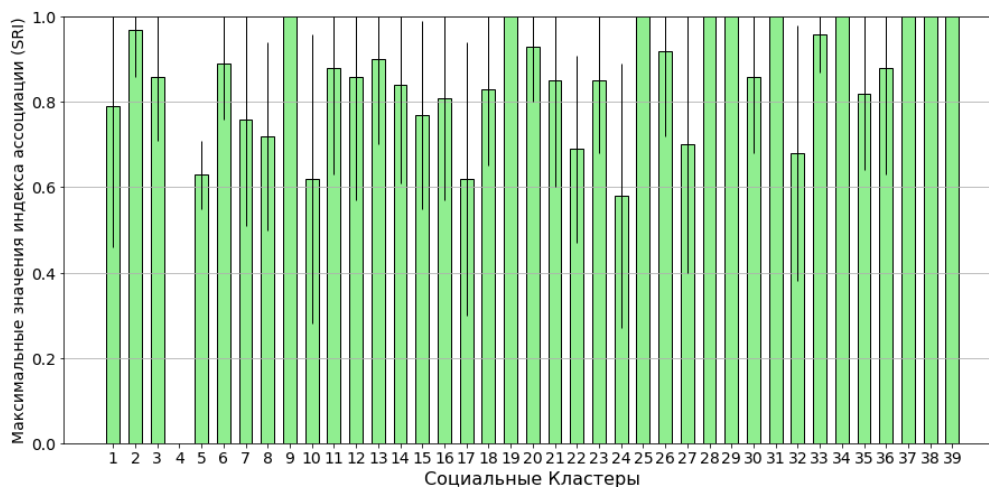


Рис. 6. Максимальные значения индекса ассоциации (SRI) рыбоядных косаток в пределах социальных кластеров.

4.1.1.3. Тесты на предпочтение-избегание ассоциаций (R-типа). Тесты на предпочтение-избегание с использованием перестановок показали значительную поддержку неслучайных ассоциаций. Другими словами, наблюдаемые отношения или ассоциации статистически значимы, а не являются результатом случайных совпадений. Результаты указывают на то, что в популяции рыбадных косаток существуют значительные предпочтительные ассоциации между отдельными особями. Стандартное отклонение реальных данных выше, чем случайных данных, при уровне значимости $P = 0.0000$, а коэффициент вариации (CV) реальных данных превышает CV случайных данных, с уровнем значимости $P = 0.0010$. Это указывает на то, что сила ассоциаций в реальных данных значительно варьируется по сравнению с случайными данными, что свидетельствует о наличии очень сильных ассоциаций у некоторых диад, в то время как у других ассоциации слабые или отсутствуют. В ходе анализа было выявлено 198 значимых диад при двустороннем уровне значимости 0.05. Все значимые диады демонстрируют предпочтительные ассоциации. Например, диады CO041 и CO039, CO41 и CO040 выделяются значениями P , близкими к 1, что указывает на сильные и значимые ассоциации, а индекс ассоциации составляет 1.00, что означает, что они всегда наблюдались вместе при присутствии.

4.1.1.4. Анализ сети (R-типа). Изображение социальной сети рыбадных косаток (Рис. 7) демонстрирует кластерную структуру, где каждый кластер выделен отдельным цветом. Толщина линий отражает величину индекса ассоциации между особями. Статистический анализ подкрепляет визуализацию, предоставляя количественные оценки социальной структуры популяции рыбадных косаток (Табл. 1). Средняя сила социальных связей составляет 4.63 ($SD = 2.46$) и Средняя Связность групп 5.00 ($SD = 2.09$). 21 из 39 кластеров, демонстрируют высокую плотность внутрикластерных связей (средняя Сила социальных связей и Связность групп более 5; см. Приложение 8). Эти группы характеризуются высокой социальной связанностью и стабильностью. В отличие от этого, кластеры 29, 37, 38 и 39 характеризуются низкой плотностью внутрикластерных связей (средняя Связность групп составляет 2 или менее), что свидетельствует о слабой социальной связанности внутри этих групп. Корреляция между силой социальных связей и связностью групп оказалась сильной и положительной (0.8711), что свидетельствует о значительном влиянии силы связей на стабильность социальных групп (Табл. 1).

Таблица 1. Средние значения и коэффициенты корреляции для статистических показателей анализа сети у рыбадных косаток. Значения в круглых скобках () представляют стандартные отклонения соответствующих сетевых статистик.

Статистика анализа сети Индекс ассоциации = SRI					
	Сила социальных связей	Степень влиятельности	Охват	Коэффициент кластеризации	Связность групп
Средние значения	4.63 (2.46)	0.01 (0.05)	27.50 (27.82)	0.51 (0.22)	5.00 (2.09)
Коэффициенты корреляции					
Сила по коэффициенту кластеризации: 0.0592					
Сила по связности: 0.8711					

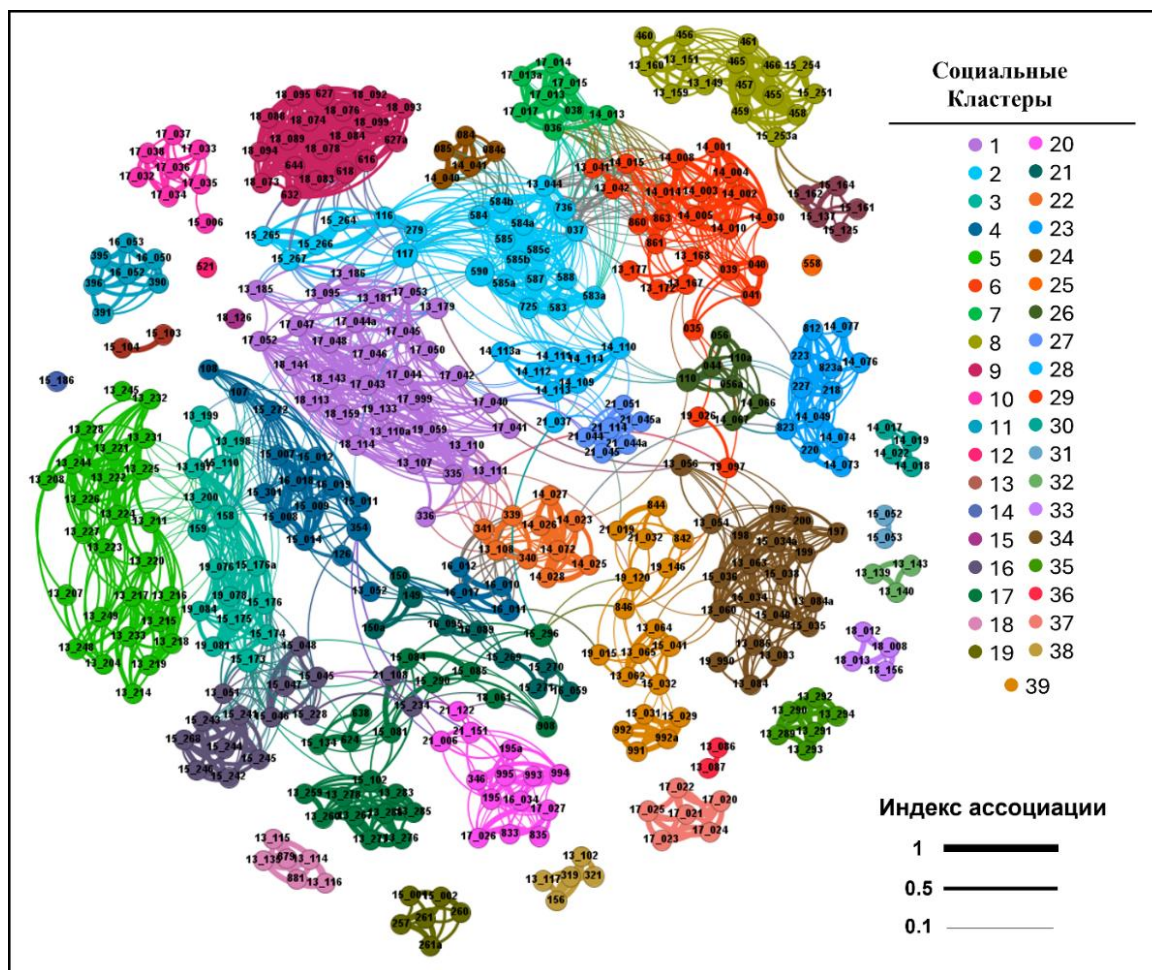


Рис. 7. Социальная сеть, показывающая ассоциации между косатками (R-тип). Отдельные особи представлены узлами (цветными кругами), а ассоциации — рёбрами (линиями) между узлами. Цвета обозначают социальные кластеры, а рёбра взвешены по индексу ассоциации простого отношения (SRI).

4.1.2. Плотоядные косатки (Т-типа)

4.1.2.1. Ассоциации между особями (Т-типа). Что касается плотоядных косаток в Авачинском заливе, в анализе использовались только те особи, которые были встречены 2 раза и более, как рекомендовано Whitehead (2008). С использованием программы SOCPROG 2.9 и индекса ассоциации Simple Ratio Индекс (SRI) были рассчитаны значения индексов ассоциации между особями. В Авачинском заливе было включено 27 особей, и среднее максимальное значение индекса ассоциации составило 0,77 (SD = 0,32).

4.1.2.2. Разделение популяции (Т-типа). Кластерный анализ, проведенный для особей, которые были встречены два раза и более, выявил разделение популяции на 7 социальных кластеров для косаток Авачинского залива. Модульность этого разделения составила 0,697, что также подтверждает успешное структурирование популяции на социальные кластеры. Размер каждого модуля варьировался от 1 до 6 косаток, со средним размером 3,86 (SD=1,55) косатки. Только один кластер (кластер 4) состоит из 1 косатки (взрослого самца), в то время как остальные кластеры включают от 3 до 6 косаток в каждом социальном кластере (Рис. 8).

Максимальный индекс ассоциации значительно варьируется между социальными кластерами. Примечательно, что кластеры 2, 3 и 7 демонстрируют самые высокие максимальные индексы ассоциации, равные 1 (Рис. 9).

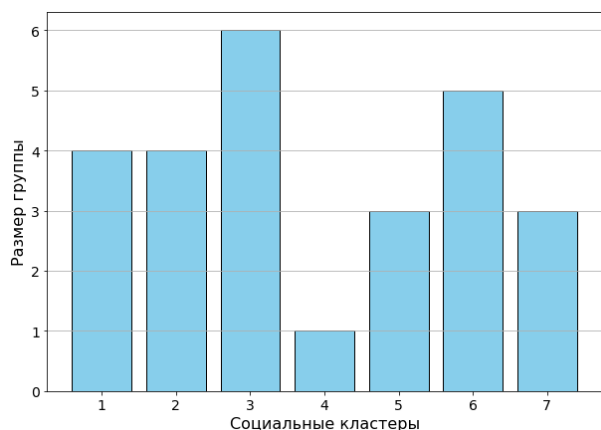


Рис. 8. Распределение особей по социальным кластерам для плотоядных косаток в Авачинском заливе.

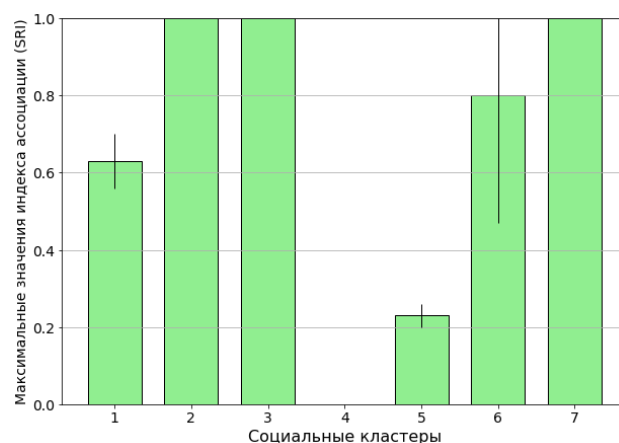


Рис. 9. Максимальные значения индекса ассоциации (SRI) в пределах социальных кластеров для плотоядных косаток в Авачинском заливе.

4.1.2.3. Тесты на предпочтение-избегание ассоциаций (Т-типа). Тесты на предпочтение-избегание с использованием перестановок для плотоядных косаток в Авачинском заливе показывает, что стандартное отклонение реальных данных несколько выше, чем случайных данных, при уровне значимости $P = 0.0379$. Однако коэффициент вариации (CV) для реальных данных не отличается значимо от случайных данных ($P = 0.1951$), что свидетельствует о том, что изменчивость силы ассоциаций среди плотоядных косаток сходна с тем, что можно было бы ожидать случайным образом. Кроме того, не было выявлено значимых диад при двустороннем уровне значимости 0.05 (Табл. 7, Приложение 4).

4.1.2.4. Анализ сети (Т-типа). Изображение социальной сети плотоядных косаток в Авачинском заливе (Рис. 10) демонстрирует четко выраженную кластерную структуру, где каждый кластер выделен отдельным цветом. Толщина линий отражает величину индекса ассоциации между особями. Статистический анализ подкрепляет визуализацию, предоставляя количественные оценки социальной структуры популяции плотоядных косаток (Табл. 2). Средняя сила связей составляет 2.52 ($SD = 1.28$), а коэффициент кластеризации — 0.61 ($SD = 0.27$), что указывает на высокую степень групповой организации в популяции (Табл. 2). Большинство кластеров характеризуются сильными внутрикластерными связями, что указывает на тесные и устойчивые группы. Однако кластер 5 имеет более слабые внутрикластерные связи.

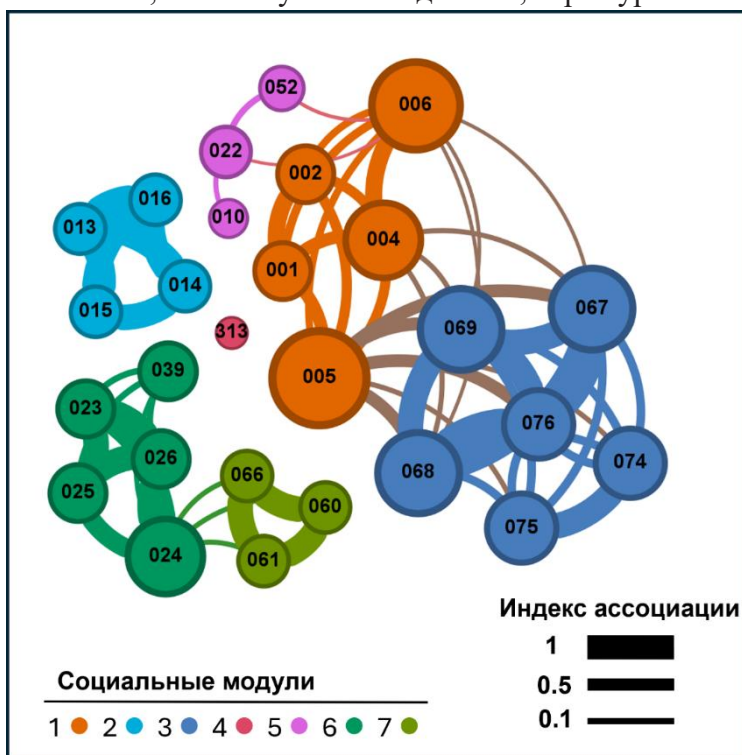


Рис. 10. Социальная сеть, показывающая ассоциации между плотоядными косатками в Авачинском заливе. Отдельные особи представлены узлами (цветными кругами), а ассоциации — рёбрами (линиями) между узлами. Цвета обозначают социальные модули, а рёбра взвешены по индексу ассоциации простого отношения (SRI).

Межкластерные связи наблюдаются между большинством кластеров, что подчеркивает взаимодействие между этими социальными группами. В то же время кластеры 5, 6 и 7 кажутся более изолированными, с минимальным количеством связей с другими группами, что предполагает их относительную автономность в рамках популяции. Кроме того, кластер 4, состоящий из одной косатки, не имеет никаких связей с другими кластерами (Рис. 10). Корреляция между силой связей и связностью групп оказалась сильной и положительной (0.8603), что подтверждает важность взаимодействий между особями для формирования устойчивых социальных структур (Табл. 2).

Таблица 2: Средние значения и коэффициенты корреляции для статистических данных анализа сети у плотоядных косаток в Авачинском заливе. Значения в скобках () представляют стандартные отклонения соответствующих статистических показателей сети.

Статистика анализа сети					
Индекс ассоциации = SRI					
	Сила социальных связей	Степень влияния	Охват	Коэффициент кластеризации	Связность групп
Средние значения	2.52 (1.28)	0.11 (0.16)	7.93 (5.26)	0.61 (0.27)	2.80 (0.90)
Коэффициенты корреляции					
Сила по коэффициенту кластеризации: 0.3016					
Сила по связности: 0.8603					

4.1.3. Статистическое сравнение социальных параметров экотипов

Тест Манна-Уитни использовался для выявления различий в социальных параметрах между рыбадными и плотоядными косатками. Результаты анализа показали, что значимой разницы в индексе ассоциации между экотипами не обнаружено ($U = 912$, $p = 0,993$). Однако размеры кластеров рыбадных косаток ($U = 60$, $p = 0,0234$) значительно превышают размеры кластеров плотоядных. Кроме того, значимые различия были выявлены по следующим параметрам: сила социальных связей ($U = 8359.5$, $p = 0,000$), степень влияния ($U = 3488.0$, $p = 0,000$), охват ($U = 8805.5$, $p = 0,000$), коэффициент кластеризации ($U = 3518.5$, $p = 0,0252$) и связность групп ($U = 8725.5$, $p = 0,000$).

4.2. Обсуждение

Анализ ассоциаций между экотипами косаток показал, что большую часть времени они проводят в группах. Постоянство группировок задокументировано для многих видов китообразных (например, Connor et al., 1992; Christal, Whitehead, 2001; Ottensmeyer, Whitehead, 2003). Такие длительные ассоциации характерны как для транзитных (плотоядных), так и для резидентных (рыбадных) косаток северо-восточной части Тихого океана (Bigg et al., 1990; Matkin et al., 1999; Baird, Whitehead, 2000). Как и семейные группы косаток северо-восточной части Тихого океана (матрилинейные группы, субподы), семьи косаток Авачинского залива и Командорских островов включают в себя животных разного пола и возраста (Bigg et al., 1990; Matkin et al., 1999; Baird, Whitehead, 2000).

При сравнении структуры ассоциаций между рыбадными и плотоядными косатками, можно отметить следующие различия. Индекс ассоциации между особями у плотоядных косаток показывает несколько более низкое среднее максимальное значение 0,77 ($SD = 0,32$) по сравнению с рыбадными 0,82 ($SD = 0,24$), но при этом более высокий процент рыбадных косаток демонстрирует максимальный индекс 0,5 и выше (89,95% против 81,5% у плотоядных). На уровне кластеров, у рыбадных косаток 38 из 39 кластеров имеют индекс связи более 0,58 (Максимальное значение индекса ассоциации SRI). У всех обоих экотипов индекс ассоциации внутри кластеров составляет более 0,5, что говорит о высокой степени ассоциации внутри кластеров.

Рыбадные и плотоядные косатки значительно различаются по размерам кластеров. Рыбадные косатки разделены на 39 социальных кластеров, размер кластеров варьируется от 1 до 27 особей, в среднем составляя 10.21 ($SD = 6.76$) косаток. Однако, плотоядные

косатки разделены всего на 7 социальных кластеров, размер групп варьируется от 1 до 6 особей, а средний размер составляет 3,7 ($SD = 1,5$) косаток. Разница в размерах кластеров между рыбадными и плотоядными косатками была статистически значимой, что указывает на существенное различие в социальных структурах этих двух экотипов. Это указывает на то, что плотоядные косатки образуют группы, меньшие по размеру, чем рыбадные косатки. Это соответствует результатам, представленным Ивкович (2006), где отмечено, что группы плотоядных косаток достоверно меньше, чем группы рыбадных косаток.

Сравнение предпочитаемых и избегаемых ассоциаций у рыбадных и плотоядных косаток выявляет значительные различия в их социальных структурах. Рыбадные косатки демонстрируют сильные и значимые неслучайные ассоциации, с большим количеством предпочитаемых диад, что указывает на наличие долговременных стабильных связей между особями. У плотоядных косаток мы не обнаружили долговременных стабильных связей между особями. То есть, связи плотоядных косаток не отличались от случайных.

Анализ сетей рыбадных и плотоядных косаток выявляет заметные различия в их социальных структурах. Рыбадные косатки демонстрируют более высокую среднюю силу связей ($4.63 \pm 2.46 SD$) по сравнению с плотоядными ($2.52 \pm 1.28 SD$), что указывает на то, что особи рыбадных косаток имеют значительно больше социальных связей, чем особи плотоядных. И социальная сеть плотоядных, и социальная сеть рыбадных косаток - разделены на различимые кластеры. Значение связности сети оказалось выше у рыбадных косаток ($5.00 \pm 2.09 SD$), чем у плотоядных ($2.80 \pm 0.90 SD$). Рыбадные косатки чаще контактируют с большим числом других особей, чем плотоядные. Кроме того, статистический анализ показал значительные различия между двумя экотипами по этим параметрам, что подтверждает существенные различия в их социальной организации и структуре сетей.

В целом, плотоядные косатки имеют высокие значения индекса связи, так же как и рыбадные. То есть они часто контактируют с одними и теми же особями, но эти контакты не отличаются от случайного. При этом рыбадные косатки имеют большее разнообразие социальных связей. Социальные сети и рыбадных и плотоядных косаток разделены на кластеры (социальные группы), размер которых различается: группы рыбадных косаток больше групп плотоядных. Это соответствует литературным данным, где рыбадные косатки северо-восточной части Тихого океана отличаются наличием крупных стабильных социальных групп с минимальным постоянным отделением от родной группы (Bigg et al., 1990; Matkin et al., 1999; Ford et al., 2000). Однако наблюдались случаи, когда группы навсегда разделялись по матрилинейной линии (Stredulinsky et al., 2021). В отличие от них, плотоядные косатки (тип Т) обычно встречаются в небольших группах, состоящих из родственников по материнской линии, с постоянным расселением самок после рождения их первого детеныша, при этом существует высокая степень филопатрии у самцов (Baird & Whitehead 2000; Stredulinsky et al., 2021; Ford & Ellis, 2014).

ГЛАВА 5. РАЗЛИЧИЯ В ПИТАНИИ МЕЖДУ РЫБАДНЫМИ И ПЛОТОЯДНЫМИ КОСАТКАМИ

5.1. Результаты

В ходе исследования в рационе косаток было отмечено десять видов морских млекопитающих: финвал *Balaenoptera physalis*, белокрылая морская свинья *Phocoenoides dalli*, малый полосатик *Balaenoptera acutorostrata*, гренландский кит *Balaena mysticetus*, акиба *Pusa hispida*, ларга *Phoca largha*, лахтак *Erignathus barbatus*, сивуч *Eumetopias jubatus*, северный морской котик *Callorhinus ursinus*, калан *Enhydra lutris*, пять видов рыб: кижуч *Oncorhynchus kisutch*, кета *O. keta*, нерка *O. nerka*, чавыча *O. tshawytscha* и северный одноперый терпуг *Pleurogrammus monopterygius*, а также неопределенные виды кальмаров (Рис. 11).

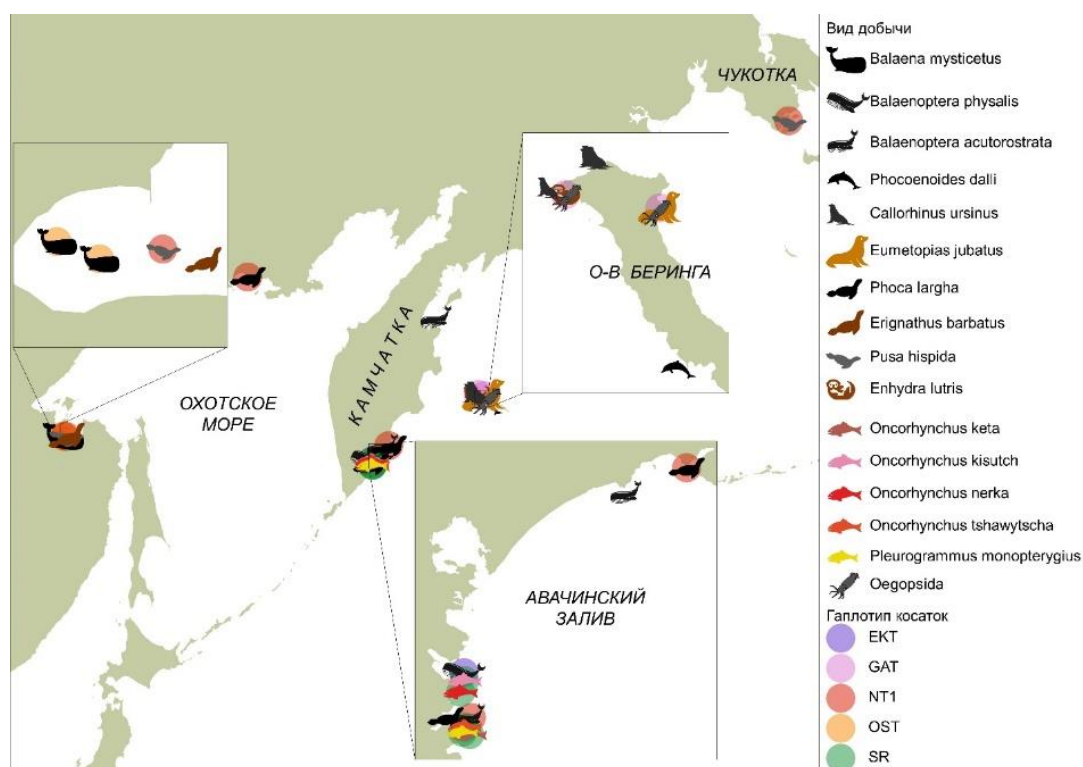


Рис. 11. Карта локаций охот косаток на разные виды жертв в дальневосточных морях России. Значками обозначены разные виды жертв. В тех случаях, когда для косаток был определен гаплотип, он обозначен цветным полупрозрачным кругом.

5.1.1. Чукотка. В проливе Сенявина на Чукотке несколько раз фиксировались случаи охоты косаток на неопределённую подводную жертву, после чего на поверхности воды оставались кровавые пятна и фрагменты добычи. В одном из наблюдений из такого фрагмента была выделена ДНК, которая позволила определить, что добычей была кольчатая нерпа (акиба). Самец косатки, охотившийся в этом эпизоде, имел гаплотип NT1, зарегистрированный в Генбанке под номером DQ399075.1. (Здесь и далее, если ссылки на дополнительные источники отсутствуют, номера последовательностей в Генбанке приведены по Zerbini et al. (2007), а все известные названия гаплотипов соответствуют обозначениям в Barrett-Lennard (2000)).

5.1.2. Камчатка. Во время продолжительных наблюдений за косатками в Авачинском заливе (юго-восточная часть Камчатки) неоднократно регистрировались эпизоды охоты этих животных как на рыбу (различные виды лососей рода *Oncorhynchus* и северного одноперого терпуга), так и на морских млекопитающих, включая ларгу, малого полосатика и финвала. При охоте на лосося косатки совершали нырки в разные стороны, часто заканчивавшиеся "финальным броском," когда они с высокой скоростью выныривали из воды и преследовали рыбу. Некоторые эпизоды охоты удалось зафиксировать с помощью дрона, что позволило наблюдать, как косатка гналась за рыбой и поглощала её. После успешной охоты на лосося в воде оставалась чешуя, что позволяло определить вид рыбы. Чаще всего это был кижуч ($N = 51$) или кета ($N = 18$), реже нерка ($N = 7$) или чавыча ($N = 6$). Также наблюдались случаи охоты на северного одноперого терпуга в местах его нереста (мыс Опасный, мыс Кекурный), где рыбу можно было увидеть через воду, а иногда даже в пасти косаток. Все косатки, охотившиеся на рыбу и от которых удалось получить биопсию ($N = 50$), имели гаплотип SR (номер в Генбанке DQ399077.1).

Эпизоды охоты на морских млекопитающих фиксировались как в Авачинском заливе, так и в Карагинском заливе, расположенном на севере Камчатки. В Карагинском заливе была замечена группа косаток, поедающих неопознанную крупную добычу. В толще воды наблюдались куски ткани размером до 30x30 см. Один из таких фрагментов был взят

для анализа, который показал, что добычей оказался малый полосатик. Биопсию от самих косаток в этом случае получить не удалось.

В Авачинском заливе охота на малого полосатика была зарегистрирована дважды. В 2010 году вид жертвы определялся визуально по отснятым и собранным частям тела убитого кита; косатки имели гаплотип NT1. В 2017 году охота была полностью зафиксирована: косатки таранили и топили кита, затем одна из них вырвала ему язык, после чего добыча была разделена на части. Биопсию косаток в этом случае получить также не удалось. В этом же районе была отмечена охота на более крупного усатого кита – финвала. Сначала охота была замечена с туристических катеров, но к моменту прибытия исследовательской лодки жертва уже была убита, а косатки поедали куски мяса и жира. Вид добычи был установлен генетически по фрагменту, взятому от одного из кусков. Гаплотип этих косаток ранее не был описан и отличался одной заменой от гаплотипа GAT2 (номер в Генбанке DQ399080) из северо-восточной части Тихого океана. Этот новый гаплотип получил название ЕКТ и зарегистрирован в Генбанке под номером OP729197.

Кроме того, в Авачинском заливе фиксировалась охота на ларгу. В июле 2021 года косатки охотились в полосе прибоя к югу от мыса Шипунского. Один из самцов прошел мимо лодки с окровавленной добычей в пасти; это было зафиксировано на фотографиях. Гаплотип этих косаток был определен как NT1. В августе 2022 года охота на ларгу наблюдалась дважды в районе бухты Русская. В обоих случаях косатки кружились на месте. Один эпизод был сфотографирован, а другой удалось зафиксировать с дрона. Косатки хватали ларгу за задние лапы, ныряли с ней и отпускали. В группе присутствовал детёныш, который тоже принимал участие в охоте. Момент смерти ларги зафиксировать не удалось, но в конце наблюдений косатки делили остатки добычи. Индивидуальная идентификация косаток по фотографиям показала, что группы косаток с гаплотипом SR, охотившихся на рыбу, никогда не взаимодействовали с группами, охотившимися на морских млекопитающих и имевшими гаплотипы NT1 и ЕКТ.

5.1.3. Командорские острова. На Командорских островах были зафиксированы случаи охоты косаток на морских млекопитающих. Хотя визуально охоту на рыбу в этом регионе наблюдать не удалось, неоднократно отмечались эпизоды, когда косатки с гаплотипом SR ныряли на 3–4 минуты, сопровождая это интенсивными эхолокационными щелчками. Это может свидетельствовать о возможной охоте на рыбу, так как морских млекопитающих поблизости в такие моменты не наблюдалось. Среди морских млекопитающих охота косаток была зарегистрирована на белокрылую морскую свинью (*Phocoenoides dalli*) и северного морского котика (*Callorhinus ursinus*). Охота на *Phocoenoides dalli* происходила у западного побережья острова Беринга, напротив бухты Лисинской. Во время атаки косатка нападала на свинью снизу, полностью вылетая вертикально из воды. Затем две косатки совместно потребляли добычу, снимая кожу с жировым слоем. Даже мелон был аккуратно отделён от головы, а позвоночник с ребрами и мясом извлечён, при этом голова и внутренние органы оставались нетронутыми. Остатки позволили установить, что жертва была молодой особью, так как зубы только начали прорезываться из десен. Охота на *Callorhinus ursinus* неоднократно наблюдалась в районах Северного и Северо-Западного лежбищ. Косатки часто подбрасывали добычу в воздух ударами хвоста, что было зафиксировано на фотографиях. К сожалению, биопсию ни у этих косаток, ни у группы, охотившейся на *Phocoenoides dalli*, взять не удалось. Интересно отметить, что согласно фотоидентификации только три из 24 косаток, встреченных в районе Северного и Северо-Западного лежбищ, были также замечены у юго-западного побережья острова Беринга, где в общей сложности идентифицировано 18 косаток Т-типа. Также проводилось изучение содержимого желудков двух косаток, найденных мёртвыми на побережье острова Беринга. В желудке косатки, обнаруженной вблизи мыса Западного в апреле 2020 года, были обнаружены шесть каланов (*Enhydra lutris*), ещё один застрял в пищеводе, а также клювы и глаза кальмаров (подробности в Fomin et al. (2023)). В кишечнике косатки, найденной в бухте Столбовой в июне 2021 года, присутствовала

персть сивуча (*Eumetopias jubatus*) и клювы кальмаров. Обе косатки имели гаплотип GAT (номер в Генбанке DQ399081.1).

5.1.4. Охотское море. В северной и западной прибрежной зоне Охотского моря охота косаток регистрировалась исключительно на морских млекопитающих, а достоверных сведений об охоте на рыбу получить не удалось. Косатки охотились на кольчатую нерпу (*Pusa hispida*), ларгу (*Phoca largha*), лахтака (*Erignathus barbatus*), и гренландского кита (*Balaena mysticetus*). Охота на *Phoca largha* была зафиксирована в центральной части Тауйской губы, недалеко от берега напротив протяжённой песчаной косы. Косатка схватила ларгу, которая находилась в воде неподалёку от исследовательской лодки, и утащила её под воду. Позднее наблюдали косаток с окровавленными кусками добычи в зубах. Охота на акибу, лахтака и гренландского кита регистрировалась в Ульбанском заливе. Во время наблюдений охоты на акибу и лахтака, косатки обнаруживались уже с убитыми и разорванными на части жертвами. Видовая принадлежность добычи определялась по характерной окраске шкуры (акиба) и форме головы (лахтак). При атаках на гренландского кита косатки таранили китов и пытались их притопить. Косатки, охотившиеся на ластоногих, имели гаплотип NT1. В то же время, группы косаток, охотившихся на гренландского кита, имели ранее неизвестный гаплотип, отличающийся от NT1 на одну замену. Этот новый гаплотип был назван OST и зарегистрирован в GenBank под номером OP729198.

Наблюдались взаимодействия между группой косаток с гаплотипом OST, убивших гренландского кита, и подошедшей позже группой с гаплотипом NT1. Модальность этих взаимодействий остаётся неясной. При появлении второй группы косатки-китобои быстро направились им навстречу, затем "чужие" прошли мимо места кормления, а "хозяева" вернулись к киту. Спустя некоторое время "чужие" также приблизились к месту, где находилась добыча. Между двумя группами были замечены активные социальные взаимодействия, такие как плавание брюхом к брюху, что иногда интерпретируется как попытка спаривания.

5.2. Обсуждение

Специализация является важным направлением биологической эволюции (Северцов, 1987), а пищевая специализация широко признана характерной чертой экотипов косаток (Ford et al., 1998; Herman et al., 2005; Ford et al., 2006). Настоящее исследование показало, что косатки, обитающие в дальневосточных морях России, демонстрируют чёткую пищевую специализацию, которая коррелирует с гаплотипами контрольного региона митохондриальной ДНК. Косатки с гаплотипами NT1 и GAT, ранее идентифицированными у плотоядных косаток Т-типа из северо-восточной Пацифики (также известных как косатки Бигга), были замечены охотящимися исключительно на морских млекопитающих и не проявляли интереса к рыбе. В противоположность этому, косатки с гаплотипом SR, ранее описанным для рыбоядных косаток R-типа из северо-восточной Пацифики, охотились исключительно на рыбу. Кроме того, было обнаружено два новых гаплотипа в Авачинском заливе и Охотском море у косаток, охотившихся на крупных усатых китов (Filatova et al., 2018). Эти гаплотипы близки к гаплотипам, зарегистрированным ранее у косаток Т-типа.

Ранее, в работах, оценивающих питание косаток в дальневосточных морях России, доказательством охоты на определенную добычу нередко считалось само нахождение косаток в непосредственной близости от морских млекопитающих или скоплений рыбы (например, Томилин, 1957; Болтнев и др., 2015). Это привело к ошибочному мнению, что косатки дальневосточных морей не имеют чёткой пищевой специализации и могут свободно переходить с питания рыбой на питание морскими млекопитающими. Однако в данном исследовании не был зафиксирован ни один случай, когда одни и те же косатки питались как рыбой, так и морскими млекопитающими. С другой стороны, в желудках косаток были обнаружены клювы и глаза кальмаров вместе с остатками каланов и сивучей, и в литературе также неоднократно описаны подобные

случаи (Rice, 1968; Yamada et al., 2007; Hanson & Walker, 2014). Это подтверждает, что головоногие моллюски входят в рацион плотоядных косаток.

Японские исследователи представили отчет о содержимом желудков косаток Тихого океана, проанализировав 364 желудка косаток, добытых во время китобойного промысла в Японии в 1948–1957 годах (Nishiwaki & Handa 1958). В этой работе представлены только общие данные о видовом составе жертв, но не уточняется, были ли найдены остатки рыбы и морских млекопитающих в одном и том же желудке. Единственное исследование, где упоминается одновременное присутствие остатков рыбы и морских млекопитающих в желудках северотихоокеанских косаток, — это работа Hanson и Walker (2014), в которой анализируется питание косаток головоногими моллюсками. В желудках косаток из северо-восточной части Тихого океана были найдены остатки кальмаров и морских млекопитающих, и только в одном желудке косатки, убитой в 1988 году в японских водах, обнаружены кальмары, три вида рыбы и остатки белокрылой морской свиньи. Возможно, в этих водах существует экотип, который питается как рыбой, так и морскими млекопитающими. Однако, учитывая, что данные были собраны на промысле 26 лет назад, их следует трактовать с осторожностью. В более современном исследовании желудки косаток, зафиксированных в водах северной Японии, содержали только остатки тюленей и кальмаров (Yamada et al., 2007).

В работах других авторов в северо-восточной части Тихого океана не упоминается о наличии в одном желудке как рыбы, так и морских млекопитающих. Например, в исследовании Райса (Rice, 1968) из восьми желудков косаток, добытых у Аляски и Калифорнии, два содержали только остатки рыбы, а шесть — морских млекопитающих и кальмаров. В работе, охватывающей 14 косаток с побережья Британской Колумбии, в восьми желудках были остатки рыбы, а в трех — морских млекопитающих (Ford et al., 1998). В исследовании, основанном на 12 желудках косаток, найденных на побережье Аляски, рыбы в желудках не было найдено, зато в семи из них обнаружены остатки морских млекопитающих (Heise et al., 2003). Описан также желудок косатки, в котором были найдены остатки калана, тюленя, выдры, морских птиц, осьминога и других объектов, но рыбы не было (Vos et al., 2006).

Корреляция между пищевыми предпочтениями косаток и гаплотипами митохондриальной ДНК подтверждает, что охотничьи навыки передаются по материнской линии (очевидно, не генетически, а посредством обучения). Митохондриальная ДНК наследуется исключительно через яйцеклетку, что означает, что и гаплотипы митохондриальной ДНК передаются по материнской линии. Передача навыков по материнской линии связана с тем, что социальная структура косаток основывается на родстве по материнской линии. У косаток R-типа социальная структура стабильна: детеныши обоих полов остаются в материнской группе на протяжении всей жизни (Bigg et al., 1990; Ivkovich et al., 2010). У косаток T-типа структура групп более гибкая, однако детеныши также остаются с матерью минимум до 10–15 лет (Baird & Dill, 1996). Охотничьи навыки детеныши перенимают от матери и других членов семьи (Guinet, 1991), что способствует дифференциации экологических ниш: в одном и том же районе могут обитать косатки, специализирующиеся на разных типах добычи.

Дифференциация экологической ниши приводит к снижению конкуренции. Кроме того, специализация на определенном типе добычи позволяет охотиться на нее более эффективно, так как для охоты на морских млекопитающих и рыбу требуются противоположные морфологические и поведенческие адаптации. Плотоядным косаткам выгоднее быть более крупными и плотно сложенными, а рыбадным — более легкими и маневренными; действительно, было показано, что плотоядные косатки Британской Колумбии и штата Вашингтон имели более широкую голову и были в среднем длиннее, чем обитающие в том же районе рыбадные (Kotik et al. (2023)). Различия в социальной структуре и поведении также связаны с типом добычи: плотоядные косатки молчаливы и чаще держатся небольшими группами, которые жертве сложнее заметить, и лишь иногда собираются большими скоплениями для охоты на крупных китов или социального

поведения; в то же время рыбацкие косатки передвигаются большими семьями и часто кричат, так как рыба не в состоянии оценить присутствие хищников по этим признакам (Baird & Dill, 1996). Интересно, что в северной Атлантике, где разделение косаток по пищевым предпочтениям проходит не на межпопуляционном уровне, как в Тихом океане, а внутри популяций, семьи, которые регулярно охотятся на тюленей, демонстрируют те же поведенческие особенности, что и тихоокеанские косатки Т-типа: передвигаются молча и небольшими группами (Jourdain et al., 2017).

Внутри экотипов косаток, вероятно, существует определённая экологическая диверсификация. Например, группа косаток, охотившихся на гренландских китов в Ульбанском заливе, имела уникальный гаплотип OST, не зафиксированный в северо-восточной части Тихого океана. Этот гаплотип был впервые описан в исследовании по географическому распределению гаплотипов полных митохондриальных геномов косаток Тихого океана (Filatova et al., 2018, номер в Генбанке MN062792). Косатки с гаплотипом OST взаимодействовали с другими косатками Т-типа с распространённым гаплотипом NT1, что позволяет предположить, что они могли принадлежать к одной популяции. Склонность косаток с этим гаплотипом к охоте на китов, скорее всего передавалась по материнской линии через социальное обучение.

Интересным является также обнаружение косаток с гаплотипом GAT на Командорских островах. Ранее в этом районе, по данным Parsons et al. (2013), встречались только косатки с гаплотипом NT3. Гаплотип GAT был преимущественно найден на восточных Алеутских островах, в заливе Аляска и на центральных Алеутах. Обе косатки с этим гаплотипом были выброшены на берег острова Беринга и имели в желудке остатки морских млекопитающих и кальмаров. Возможно, различия в присутствии этих косаток связаны с сезонностью их пребывания в водах Командорских островов, где косатки с гаплотипом NT3 появляются летом, а с гаплотипом GAT — весной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено подробное исследование различий между двумя экотипами косаток в северо-западной части Тихого океана, подтверждающее их морфологические, социальные и пищевые особенности. Впервые применены методы машинного обучения, включая автоматическое машинное обучение (AutoML), для дифференциации экотипов косаток (R-тип и Т-тип) на основе их морфологических признаков: формы спинного плавника и седловидного пятна. Освоенные методики и полученные результаты позволят сократить разрыв между наукой об охране природы и технологиями машинного обучения, а также будут способствовать использованию подобных подходов для изучения других видов.

Кроме того, впервые была детально изучена социальная структура двух экотипов косаток в российских водах, продемонстрированы основные характеристики их социальных сетей, а также выявлены различия в рационе питания. Анализ ассоциаций в популяциях разных экотипов выявил существенные различия в их социальной организации, что отражает адаптацию к различным экологическим условиям и типам питания. Рыбацкие косатки образуют более крупные и сложные социальные группы, тогда как плотоядные косатки формируют меньшие и более компактные группы. Рыбацкие косатки имеют большее разнообразие социальных связей, в то время как плотоядные косатки демонстрируют высокие значения индекса связи, что свидетельствует о частых контактах с одними и теми же особями, хотя эти контакты не отличаются от случайных. Социальные сети обоих экотипов разделены на кластеры (социальные группы), размер которых также различается: группы рыбацких косаток значительно больше групп плотоядных косаток.

Исследование особенностей питания рыбацких и плотоядных косаток показало, что косатки, обитающие в дальневосточных морях России, различаются по своей пищевой специализации, что коррелирует с определёнными гаплотипами митохондриальной ДНК. Для косаток с гаплотипами NT1 и GAT, характерными для плотоядного экотипа (Т-тип),

была зафиксирована охота на морских млекопитающих, в то время как косатки с гаплотипом SR, связанным с рыбадными косатками (R-тип), охотились исключительно на рыбу. Кроме того, в ходе исследования не было зарегистрировано ни одного случая, когда одни и те же косатки охотились бы и на рыбу, и на морских млекопитающих, что свидетельствует о строгом разделении пищевых ниш между экотипами.

Данное исследование иллюстрирует важность культурных традиций и социального обучения в дифференциации экологических ниш у китообразных. Передающаяся от матери к детенышам специализация к охоте на определенную добычу позволяет косаткам разных экотипов избегать пищевой конкуренции и приобретать морфологические и поведенческие адаптации, облегчающие охоту на конкретный тип жертвы. Вероятно, такая специализация оказывается адаптивной лишь в тех случаях, когда биомасса добычи каждого типа достаточно высока, поэтому она наблюдается только в продуктивных водах высоких широт (северная часть Тихого океана и Антарктика, в меньшей степени северная Атлантика); в то же время в других районах, особенно в тропических и субтропических водах, косатки нередко питаются и рыбой, и морскими млекопитающими, не формируя определенной пищевой специализации (de Bruyn et al., 2013). Наличие пищевой специализации у косаток дальневосточных морей России следует учитывать при разработке мер охраны и устойчивого использования их популяций, а также при расчете потребляемой ими биомассы разных типов добычи в моделях морских трофических сетей.

ВЫВОДЫ

1. Морфологические различия между двумя экотипами косаток являются объективными и надежными, что подтверждается высокой точностью классификации экотипов по фотографиям с помощью искусственных нейронных сетей.
2. Исследование подтверждает морфологические различия между экотипами, что важно для разработки более эффективных охранных мероприятий.
3. Анализ социальных сетей показал, что рыбадные косатки имеют больше социальных связей и более сильные ассоциации, чем плотоядные, что подтверждает значительные различия в социальной структуре между экотипами.
4. Размер социальных групп рыбадных косаток значительно больше, чем у плотоядных, что подтверждено статистически значимой разницей, выявленной с помощью теста Манна-Уитни.
5. Разделение пищевых ниш у двух экотипов предотвращает конкуренцию за ресурсы между ними и способствует эффективной адаптации к различным экологическим условиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Прежде всего, я хотел бы выразить искреннюю благодарность своему научному руководителю Елене Павловне Крученковой. Я искренне благодарен Елене Павловне за моральную поддержку, энтузиазм, помощь на всех стадиях работы, а также ценные советы и конструктивную критику.

Особую благодарность хочу выразить Ольге Александровне Филатовой за неоценимую помощь на всех этапах работы, включая сбор и обработку материала, написание данного текста, за ценные критические замечания, обеспечение необходимой литературой, всестороннюю поддержку, а также за ценные советы и конструктивную критику.

Благодарю рецензента Марию Андреевну Соловьёву за интерес и внимание к моей работе, а также ценные комментарии. Огромная благодарность всем участникам проекта FEROP (Far East Russia Orca Project) за их поддержку и помощь в сборе материала. Особую благодарность хочу выразить Ивану Федутину, как руководителю командорской

экспедиции, за его вклад в успешную реализацию исследований. Также выражаю искреннюю признательность моей дорогой коллеге Вере Федоровой за помощь и поддержку в ходе исследования. Благодарю Татьяну Ивкович за советы и рекомендации, касающиеся анализа социальной структуры, а также за предоставленную возможность получить важный опыт полевой работы. Отдельное спасибо Ольге Шпак за предоставленные фотографии встреч с косатками.

Также выражаю глубокую благодарность своим родителям и любимой сестре за поддержку и веру в меня. Но основную поддержку на протяжении всего моего аспирантского пути я получал от своей дорогой жены Алаа и наших детей - Адам и Нур. Спасибо вам за любовь, терпение и понимание, которые помогли мне достичь этой цели.

Искренне благодарен всем сотрудникам кафедры зоологии позвоночных за доброжелательное отношение и поддержку.

Искренне благодарю мою родную страну Египет, а также Россию за поддержку моего исследования через грант [Mission 2019] по совместной программе Арабской Республики Египет и Российской Федерации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science, RSCI

1. **Ismail M. E.**, Fedutin I. D., Ivkovich T. V., & Filatova O. A. Occurrence of killer whales *Orcinus orca* off the Commander Islands and Avacha Gulf from 2008–2021 and its relation to the sea otter *Enhydra lutris* population decline // Russian Journal of Theriology. – 2023. – V. 22. – No. 1. – P. 74–83. DOI: 10.15298/rusjtheriol.22.1.08. SJR: 0.169. 1.08/0.86 усл. печ. л.: концепция, сбор и обработка данных, текст.

2. Филатова О. А., Федутин И. Д., Белонович О. А., Борисова Е. А., Волкова Е. В., Ивкович Т. В., **Исмаил М. Е.**, Мещерский И. Г., Титова О. В., Фомин С. В., Шпак О. В. Различия в питании репродуктивно изолированных экотипов косаток (*Orcinus orca* Linnaeus, 1758) в морях дальнего востока России // Биология моря. – 2023. – Т. 49. – № 6. – С. 417–428. DOI: 10.1134/S1063074023060032. РИНЦ: 0,820 (Переводная версия версия: Filatova O. A., Fedutin I. D., Belonovich O. A., Borisova E. A., Volkova E. V., Ivkovich T. V., **Ismail M. E.**, Meschersky I. G., Titova O. V., Fomin S. V., & Shpak O. V. Differences in the Diet of Reproductively Isolated Ecotypes of Killer Whales (*Orcinus orca* Linnaeus, 1758) in the Seas of the Russian Far East // Russian Journal of Marine Biology. – 2023. – V. 49. – No. 6. – P. 477-487. DOI: 10.31857/S0134347523060037. SJR: 0.207). 1.27/0.578 усл. печ. л.: сбор данных.

3. **Ismail M. E.**, Fedutin I. D., Hoyt E., Ivkovich T. V., & Filatova O. A. Auto machine learning tools to distinguish between two killer whale ecotypes // Marine Mammal Science. – 2024. – e13175. DOI: 10.1111/mms.13175. SJR: 0.724. 1.27/ 1.1 усл. печ. л.: концепция, сбор и обработка данных, текст.