

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
институт

Кафедра водных и наземных экосистем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ подписью _____ инициалами, фамилией
« ____ » _____ 20 ____ г

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

06.03.01 - Биология

Оценка связи между внешней морфологией
инвазионных видов рыб и степенью их акклиматизации в
бассейне реки Чулым

Тема

Руководитель

_____ подписью, дата

_____ должностью, ученая степень

И. В. Зуев

инициалы, фамилия

Выпускник

_____ подписью, дата

Ю. И. Трубчанинов

инициалы, фамилия

Красноярск, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	5
1.1. Проблема биологических инвазий рыб	5
1.2. Методы определения инвазивного статуса рыб	11
1.3. Геометрический морфометрический анализ.....	13
2.МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	19
3.РЕЗУЛЬТАТЫ.....	24
ВЫВОДЫ.....	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	31

ВВЕДЕНИЕ

Проблема биологических инвазий беспокоит ученых с 90-х годов прошлого столетия (Дгебуадзе, 2013). Присутствие чужеродных видов в экосистеме может привести к уменьшению ее биоразнообразия, а также к уменьшению ее экономической пользы (Карабанов, Кодухова, 2015; Bunn, Arthington, 2002).

В данный момент, методы по ликвидации чужеродных рыб из экосистем недостаточно эффективны и поэтому все больший интерес представляют методы, которые призваны предсказать успешность инвазий того или иного вида на основе разных его характеристик. Существуют методы, способные к идентификации степени успешности интродукции видов рыб на основе их жизненных характеристик (Copp and Fox, 2020; Copp, 2013), филогении (Schaefer et al., 2011), морфологии (Azzurro et al., 2014), а также на основе экологической ниши и трофических сетей, в которых участвует интересующий вид.

Есть гипотезы, говорящие о том, что степень непохожести инвазивных видов рыб на нативные или аборигенные виды может характеризовать степень их успешной инвазии в водоем, так как морфология вида является интегральным показателем его экологической приспособленности (Azzurro et al., 2014; Copp and Fox, 2020).

Предназначение данной работы состоит в попытке оценки успешности инвазий видов рыб в бассейне реки Чулым на основании их морфологии. Река Чулым, в свою очередь выступает инвазивным коридором, который предполагает вселение чужеродных видов в экосистемы, нехарактерные им.

В качестве морфологического анализа был выбран метод геометрической морфометрии (Павлинов, 2009; Rohlf and Bookstein, 1990), как один из самых селективных на сегодняшний день (Rohlf et al., 1993; Adams et al., 2004; Takacs et al., 2016). На основе данных, полученных в ходе данного анализа, были построены полигоны Вороного, характеризующие морфопространства каждого отдельного вида, по отношению к другим (Azzurro et al., 2014). Полигоны в свою очередь будут сравнены с информацией, касающейся экологии каждого вида, на основании чего, будут сделаны выводы об их взаимосвязи.

Цель работы: Оценить наличие взаимосвязи между морфологией инвазивных рыб бассейна р. Чулым со степенью успешности их биологических инвазий

Задачи:

1. Ранжирование инвазионных видов рыб бассейна р. Чулым по их распространению, температурным предпочтениям, времени вселения и оценке по протоколу FISK.
2. Ранжирование инвазионных видов рыб бассейна реки Чулым по внешней морфологии
3. Оценка статистической связи между формой тела инвазионных видов рыб и степенью их распространения в бассейне р. Чулым

1.1. Проблема биологических инвазий рыб

Проблема биологических инвазий является одной из самых важных на протяжении большого промежутка времени (Дгебуадзе, 2013). Переселение видов может привести к экологическому кризису, который, в свою очередь, может привести к ущербу промысловой деятельности человека, а также к снижению биологического разнообразия видов для некоторых экосистем (Кабанов, 2015; Болдырев, 2020).

А.Ф. Алимов и Н.Г. Богуцкая в своей книге «Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах» (2004) говорят о том, что биологические инвазии, начиная с 20 века увеличивают свои количественные и качественные характеристики. Это связано прежде всего с антропогенным воздействием, которое увеличивается параллельно с индустриальными успехами человечества. Также они выделяют ряд причин, по которым могут происходить данные инвазии:

1. Естественное расширение ареалов по типу диффузии;
2. Перемещения, связанные с какими-либо климатическими факторами, геологическими факторами, или флюктуационными изменениями численности;
3. Антропогенная нагрузка на ареалы, в ходе которой идет преобразования границ ареалов;
4. Специальное расселения видов “полезных” с антропогенной точки зрения;
5. Случайные заносы, получившиеся при интенсивном освоении территорий человеком (расселение видов с импортом “полезных” интродуцентов).

Одной из основных проблем, связанных с биологическими инвазиями – непредсказуемость экономических и экологических последствий, к которым может привести интродукция чужеродного вида. Зачастую, вселение инвазивного вида может привести к возникновению его конкурентных отношений с аборигенным видом, занимающим ту же экологическую нишу, что может привести к вытеснению последнего, а значит и качественному изменению самой экосистемы, которое часто может привести к уменьшению биоразнообразия в ней (Карабанов и Кодухова, 2015).

Также стоит отметить, что помимо прямого вреда экосистеме инвазионные виды могут принести и косвенный. Вид-вселенец, не представляющий угрозы для аборигенных видов с точки зрения конкурентных отношений, может нести в себе патогенную угрозу для обитателей экосистемы, которые могут быть к ней попросту не готовы (Copp et al., 2016).

Некоторые авторы в своих работах выделяют несколько методов борьбы с инвазивными видами рыб, в рамках данного литературного обзора, стоит рассмотреть некоторые из них, чтобы понять, насколько борьба с вселенцами может быть трудоемкой и затратной для ее инициаторов. Данный обзор может помочь в понимании, почему предсказать инвазионный статус вселенца менее затратное мероприятие, нежели прямая борьба с ним (Карабанов, Кодухова, 2015; Махаров и др., 2014).

Традиционные методы борьбы с инвазивными видами рыб, могут предполагать то, что данные инвазивные виды уже натурализовались в водоеме, а значит методы борьбы с ними обретут некоторые трудности в плане эффективности и затратности данных методов. Примером одного из таких методов может служить массовое плановое осушение водоемов и сооружение заградительных строений, которые могут помочь в сортировке аборигенных и чужеродных видов при прохождении через них. Данный метод может быть применим в вопросах сохранения аборигенного видового состава во всяческих

культурных, рекреационных и коммерческих водоемах. На первый взгляд данные мероприятия кажутся довольно эффективными в вопросе сохранения видового состава, но есть ряд неприятных последствий, которые они за собой влекут. Например, заградительные мероприятия могут принести вред не только инвазивным видам, но и аборигенным, они могут быть причиной ухудшения “жилищных качеств” водоема и вырождения популяций нативных видов водоема. Сюда же можно отнести невозможность применения данных мероприятий на водоемах с редкими, краснокнижными, либо же ценными промысловыми рыбами ввиду наносимого ущерба данным популяциям. Также не стоит забывать о том, что данные виды, в последствие данных мероприятий могут оказаться в почти полной изоляции, что может привести к генетическому вырождению популяции. Заградительные мероприятия не могут в полной мере помочь с изъятием инвазивных видов из водоема, если среди интродуцентов водоема будут присутствовать экологически пластичные виды рыб, способные к выживаемости в огромном спектре условий, например, как ротан-головешка, то изъятие его из водоема может быть осуществлена лишь с помощью полного его осушения, либо с помощью перехода на замкнутую систему водообмена, что приведет к тотальному ущербу для нативных обитателей экосистемы. (Карабанов, Кодухова, 2015).

Другим способом ликвидации чужеродных видов могут послужить химические методы борьбы с видами-вселенцами. (Карабанов, Кодухова, 2015). Но как отмечают авторы, данные мероприятия могут в несколько раз преумножить ущерб для нативных видов, по сравнению с теми же традиционными методами. А в некоторых случаях принести наибольший вред из всех возможных (Карабанов, Кодухова, 2015). Суть химического метода заключается в применении ихтиоцидов, которые должны соответствовать ряду требований. Например, данный препарат должен быть минимально вредоносен для теплокровных животных, которые могут оказаться в зоне действия препарата. Его применение желательно в замкнутых

водоемах по типу озер и прудов с последующим зарыблением аборигенными видами, либо целевыми полезными видами при коммерческом использовании водоема. Главной проблемой данных препаратов является их высокая токсичность и оставление длинного экологического следа, которые могут послужить причиной для затратных мероприятий по восстановлению биоразнообразия и устойчивости экосистем. Также сами препараты могут иметь большую стоимость. Наряду с массой минусов данных препаратов, можно отметить высокую эффективность их применения, которая может помочь в крайне чрезвычайных ситуациях. Например, при угрозе эпидемиологического заноса в водоемы всяческих инфекций и паразитов рыб и беспозвоночных, которые могут оказать несравнимый вред для неподготовленных особей (Карабанов, Кодухова, 2015).

Также к традиционным методам можно отнести физический вылов инвазионных видов рыб с помощью непосредственного лова с участием тралов и неводов. Но при данных мероприятиях стоит помнить о том, что целью данного метода является вылов инвазионных рыб и сохранение аборигенных видов, соответственно при попадании в улов аборигенных представителей ихтиофауны следует вернуть их в водоем. Данный метод также, как и все предыдущие, имеет некоторые минусы. Например, применение прямого лова на мелкочаеистые сети или жаберные сети может привести к неумышленному повреждению аборигенных видов рыб, которая в свою очередь может привести к ухудшению физиологической активности вида или его гибели. Также нельзя сказать, что данный метод является высокоэффективным так как ручной лов не может объять всю популяцию инвазивного вида в водоеме чисто из физических соображений. Наряду с минусами, у данного метода также имеются и плюсы, самым главным из которых можно назвать низкую стоимость данных мероприятий. При привлечении других участников в лице, например, рыбаков можно добиться некоторых успехов при данных мероприятиях (Карабанов, Кодухова, 2015).

Наряду с традиционными методами борьбы с рыбами-вселенцами, существуют также и биологические методы борьбы с чужеродными видами. Например, эффективным методом борьбы может выступать простое взаимодействие хищник-жертва, которое может быть в форме хищничества напрямую, либо в форме паразитарной инфекцией чужеродного вида. Основными проблемами данных мероприятий могут послужить трудности в избираемости хищником или паразитом целевого вида, основываясь на своих предпочтениях. Так, мы не можем быть уверены, что при интродукции какого-либо хищника, который по задумке должен вступить во взаимоотношения с целевым видом, данного хищника не заинтересует другой вид рыбы, который к всеобщему несчастью может оказаться аборигенным. Такая же ситуация может произойти и с интродукцией паразита в водоем. Никто не может быть уверен, что получится избежать эпидемиологической ситуации в водоеме в целом, особенно при условии, что паразит в своем жизненном цикле может использовать несколько групп живых организмов и навредить не только рыбам, но и беспозвоночным или другим группам животных, обитающим не только в самом водоеме, но и за его пределами (Карабанов, Кодухова, 2015; Алимов, Богущкая, 2004). В общем-то стоит также понимать, что в случае привнесения в экосистему данных методов, мы планируем инвазию, чтобы бороться с инвазивными методами, без расчета риска мы нет никакой уверенности в том, что хищник сам не займет чью-то экологическую нишу и не вступит в конкурентные отношения, а если он еще и победит в этой конкурентной борьбе, то сам станет инвазивным видом, что не подразумевается под борьбой с инвазивными видами. Исходя из всего этого, можно сказать, что данные мероприятия, применимые в рамках биологических методов, требуют перед своим использованием доскональной изученности последствий и рисков, которые последние могут за собой привести. Но также стоит отметить, что по соотношению эффективности к экономическим и трудовым затратам данные методы могут служить одними из самых лучших среди остальных (Карабанов, Кодухова, 2015).

Одним из самых перспективных среди биологических методов борьбы с инвазивными видами могут служить генетические методы борьбы. Одним из таких методов может служить выпуск стерильных самцов и самок инвазивных видов. Гарантом стерильности данных особей может служить преднамеренная триплоидизация видов. По некоторым данным гонады триплоидных особей не развиваются, а значит популяция инвазивного вида со временем сойдет на нет (Махаров и др., 2014).

Также одним из генотипических методов борьбы является внедрение особей с двойной Y-хромосомой. Такой метод называется методом «Троянских генов». Генотипически, особи представляют собой организмы с YY-модификацией половых хромосом, но фенотипически, они являются самками. Это достигается путем обработки икринок эстрогенами, например, диэтилстильбэстроном. Сначала обычных самцов XY-хромосомами превращают в самок с XY-хромосомами, после проводится их спаривание с обычными самцами, вследствие чего мы можем получить самцов с YY-хромосомами, позже данных самцов феминизируют с помощью эстрогенов. В конечном счете данные процедуры могут привести к половому дисбалансу популяции, что приведет к спаду численности ненативных видов. Данное мероприятие имеет несколько минусов в своем содержании. Во-первых, внесение троянских генов в популяции является очень трудоемким процессом. В алгоритме присутствуют сразу две феминизации потомства и последующий отбор целевых самцов. В итоге получается метод, который не может похвастаться своей эффективностью и массовостью. (Махаров и др., 2014)

Исходя из всего вышесказанного можно сказать, что методы традиционной и биологической борьбы с инвазивными видами еще не получили достаточной эффективности и массовости, ввиду того, что развитие данных методов является трудоемким и экономически затратным мероприятием. Поэтому, стоит перенаправить силы от изучения методов избавления от чужеродных видов к методам выявления их инвазионного

статуса, которое в свою очередь обладают меньшими затратами в своей работе.

1.2. Методы определения инвазивного статуса рыб

На протяжении многих лет, ведутся попытки предсказать успешность инвазий того или иного вида на основе разных его характеристик. Ведется активная разработка различных методов для идентификации степени успешности интродукции вида на основе его жизненных характеристик (Copp and Fox, 2020), филогении (Schaefer et al., 2011), морфологии (Azzurro et al., 2014), а также на основе экологической ниши и трофических сетей, в которых участвует интересующий вид. Есть гипотезы, говорящие о том, что степень непохожести инвазивных видов на нативные или аборигенные виды, занимающих ту же экологическую нишу, может характеризовать степень их успешной инвазии в водоем (Azzurro et al., 2014; Copp and Fox, 2020).

Данные методы призваны дать оценку потенциальной опасности определенного вида для экосистем, в которые он может быть вселен. Они помогают понять, какой способ борьбы подходит с данным видом и насколько важен контроль его расселения в другие водоемы (Карабанов и Кодухова, 2015).

В нынешнее время набирает популярность протокол проведения оценки потенциальной инвазивности рыб под названием FISK (Fish Invasiveness Screening Kit). Главным преимуществом метода является исключение субъективизации полученных результатов со стороны эксперта (Copp et al., 2016). Протокол включает в себя 49 вопросов о биологии и экологии вида вселенца и в зависимости от баллов, полученных в ходе проверки, позволяет приурочить виду его потенциальную инвазивность: низкую, среднюю или

высокую. В нашем регионе, также есть работы, использующие данный метод и помогающие в борьбе с инвазивными видами (Злотник, 2019).

Изначально, протокол FISK был сформирован, как аналог протокола WRA (Weed Risk Assessment), который также, как и FISK предполагал серию из нескольких вопросов, относительно видов растения, вследствие которых эксперт мог дать объективную оценку инвазионному статусу вида. Именно из-за отсутствия субъективизации оценки со стороны эксперта, данный анализ получил широкое применение, а также было принято решение сделать подобный протокол не только для растений, но и для пресноводных рыб. Также, помимо FISKа, существуют и другие подобные протоколы, основанные не на растениях и пресноводных рыбах, а, например, на амфибиях – AmphISK (Amphibian invasiveness Screening Kit), или на морских рыбах MFISK (Marine Fish Invasiveness Screening Kit) (Copp et al., 2016).

Протокол FISK не единственный в своем роде призван предсказать инвазионный статус какого-либо вида. В 2007 году в ответ на требование правительства Великобритании был разработан протокол ENSARS (European Non-native Species in Aquaculture Risk Analysis Scheme), также, как и протокол FISK, протокол ENSARS призван урегулировать вопрос контроля за инвазивными видами (Copp et al., 2016). Данный метод также основан на контрольных вопросах об экологии вида и в зависимости от ответов виду может присваиваться один из рангов его инвазивности (Copp et al., 2016).

В некоторых странах, например, в США, существуют так называемые белые и черные списки видов. Черный список, в данном случае, подразумевает то, что ввоз вида, будь то растения или животное, занесенного в этот список, строго запрещается. Но по мнению некоторых авторов данная методика работает неэффективно, т.к. рост количества инвазивных видов не только не останавливается, но и увеличивается (Simberloff, 2016). Авторы связывают это прежде всего с тем, что данный закон сформулирован не верно. В нем

говорится лишь о запрете ввоза некоторых организмов, но совершенно не затрагивает их хранение. Из-за этого, виды, что уже были в стране на момент принятия закона, но являлись чернокнижными все равно оставались в стране.

1.3. Геометрический морфометрический анализ

Геометрический морфометрический анализ – вид морфометрического анализа, чья цель – изучение морфологической изменчивости видов, путем анализа их геометрической формы (Rohlf et al., 1993, Павлинов, 2002). Помимо геометрической морфометрии есть еще несколько видов морфометрического анализа: Классическая или традиционная морфометрия (Правдин, 1966); Морфометрический анализ методом Truss Network (Strauss and Bookstein, 1982). В данной работе, морфология рыб оценивается именно с помощью геометрической морфометрии, потому что по мнению некоторых авторов, геометрический морфометрический анализ способен объять большее количество признаков и иметь большую сепаративную силу, нежели остальные виды морфометрии (Takacs, 2016, Adams et al., 2004)

Со временем, с целью оптимизации работы и решения проблем, которые были присущи традиционному морфометрическому методу и методу truss network, были разработаны и другие методы морфометрического анализа, значительное развитие которых связано непосредственно с достижениями в сфере технологического прогресса, а именно с появлением новых инструментов обработки изображений, в том числе и цифровых. Одним из таких методов, является геометрический метод морфометрического анализа. Основой современной геометрической морфологии были заложены в работах Д'Арси Томпсона, которые датировались началом 20 века. В своих работах он впервые применил трансформационную решетку для иллюстрации

изменчивости форм. Однако, из-за отсутствия количественных оценок данный метод не получил своего распространения. К концу столетия появился новый подход к сравнению форм, объединяющий в себе метод трансформационной решетки и количественные методы, основные достижения в это принадлежат Букштейну, Рольфу и нашему соотечественнику Павлинову. Данный подход получил название геометрической морфометрии (geometric morphometry) или метода сравнения формы (shape analysis) (Афанасьев, 2017).

Данные, полученные с помощью этого метода, позволяют судить об изменчивости объектов, опираясь на их различия в форме. Он предполагает работу с контурами объекта и координатами на этих контурах. Одновременно с разработкой данного метода, статистиками были разработаны методы статистического анализа формы, с помощью которых стало возможно комбинированное использование многомерных статистических методов и методов для прямой визуализации в биологической форме. Данные преимущества по сравнению с традиционной морфометрией не остались незамеченными. Этот морфометрический метод также широко распространен среди современных авторов научных работ, направленных на проблемы таксономической идентификации, разделения видов и другие проблемы, основывающиеся на морфологической изменчивости (Ai et al., 2019).

Первыми геометрическими морфометрическими методами стали так называемые «контурные методы (Outline methods)». Эти методы предполагают работу с контуром объекта, и могут быть использованы для достижения результатов с большей эффективностью, вследствие более подробного изучения объектов, морфологически схожих между собой. Стоит отметить, что под «более подробным» здесь подразумевается то, что геометрическая морфометрия делает возможным получение более достоверной информации о размерных характеристиках объекта, по сравнению с традиционным морфометрическим методом. Данный метод, в своей работе, использует оцифровку точек вдоль контура объекта и дальнейшего анализа данных с

помощью многомерного анализа или анализа Фурье. Полученные данные могут быть обратно интерпретированы в изображение объекта в виде контура. Самые ранние методы предполагали работу с длинами объектов, например, длины от определенной точки до контура объекта. Такой точкой мог быть центр тяжести. Но данный метод также предполагал неточности, связанные с определением этой самой точки (Rohlf et al., 1993).

Хотя все эти методы являлись работоспособными, все равно оставалась проблема в статистических результатах исследования. Связано это с тем, что один статистический анализ, очевидно, дает разные результаты для разных методов морфологического анализа. Также причиной являлось отсутствие согласованной теории, что позволила бы исследователю выбрать лучший метод для своих работ (Rohlf et al., 1993).

Геометрические морфометрические методы, основанные на координатах объекта, были разработаны совместно с накоплением биологически обоснованных данных в двух- и трехмерном пространстве. Достоверный анализ этих данных также оставался невозможным, из-за сложностей, связанных с положением и масштаба объекта на изображении. Следовательно, данный изъян должен быть устранен до анализа этих переменных. Только после этого возможен последующий анализ данных объектов, и его графическая интерпретация. Было предложено несколько методов, каждый из которых имеют свой протокол и степень оптимизации. GPA (Generalized Procrustes Analyze), упоминаемый в ранней литературе, как GLS (Generalized Least Squares) анализ. Он подразумевает наложение конфигураций координат объекта по методу оценки наименьших квадратов, направленное на компенсацию перемещений и вращений этих конфигураций. В первую очередь центральный блок каждой конфигурации переводится в «общий центральный блок» всех конфигураций. Набор размеров конфигураций масштабируется к общему размеру, с помощью деления на общий центральный блок конфигураций. Данные усреднения касаются также

и вращений объекта, с целью минимизации различий между ориентирами. Данные процессы повторяются несколько раз для нахождения усредненной формы объектов, что используется для их последующего анализа.

Таким образом, можно сказать, что в отличие от остальных методов морфометрического анализа, данный метод работает с геометрией (формой) биологических объектов, а именно с координатными плоскостями в двухмерном пространстве (2D) и в трехмерном пространстве (3D). По контуру объекта откладываются метки, и на основании координат этих меток создается фигура, которая используется в дальнейшем исследовании.

Координаты являются более удобным объектом для исследования, нежели традиционные измерения. Используя данный метод, всегда можно проверить адекватность проделанных измерений с помощью визуализации данных точек на координатной плоскости. Акцент здесь сделан на записи гомологичных точек, с их помощью можно получить более емкую биологическую интерпретацию полученных результатов, основанных на изменчивости разных частей тела и аллометрии. Причем это дает возможность не просто сказать, что какая-то часть тела объекта больше или меньше, а именно детально проследить смещение точек, относительно других объектов, что опять же повышает чувствительность и селективность данного метода по сравнению с традиционной морфометрией (Rohlf et al., 1993). Доказательством увеличения спроса геометрического метода морфометрического анализа может послужить увеличение цитирования работ, включающих данный метод, с 1976 по 2001 года (Adams et al., 2004).

Полигоны Вороного - геометрические фигуры многоугольной формы, построенные на множестве точек таким образом, чтобы каждый из полигонов имел рациональную площадь, с точки зрения технологических правил, которые задаются в зависимости от задачи построения (Муханов, Сотников, 2006). Алгоритмов для построения данных полигонов несколько, но один из

основных методов, «сканирующую прямую», представили Шамос и Хоуи в своей работе "Geometric intersection problem"(1976), они показали последовательность, для пересечения отрезков на плоскости, а также продемонстрировали, что метод "Сканирующей прямой" в купе с "сбалансированными бинарными деревьями" может помочь с поиском всех пересечений отрезков N на плоскости, со сложностью $O(N \log N)$ (Shamos, Hoey, 1976).

У полигонов Вороного возможны множества применений. Существуют работы, где полигоны применяются в качестве рациональных площадей при проектировании или анализе территорий. Причем в примеры применений в данной области может входить как планирование оптимального расположения трансформаторных подстанций (Афанасьев, 2018), так и районирование целых регионов и областей, как было показано на примере Оренбургской области (Петрищев, 2010). Также, применение полигонов Вороного может быть и в более близкой для биологов тематике. Существуют примеры, где полигоны использовались для оптимизации площадей тралирования при ловле различных гидробионтов, с целью увеличения эффективного вылова и в то же время уменьшению перелова гидробионтов.

В рамках данной работы, полигоны Вороного используются для визуализации морфопространства каждого из видов, обитающих в реке Чулым. В комбинации с геометрическим морфометрическим методом, полигоны позволяют количественно оценить пространство, обусловленное морфологической изменчивостью. Конкретно в этой работе, полигоны интерпретируют степень непохожести одного вида на другой и дают понять, какое место среди семейства или всей экосистемы занимает вид с точки зрения его морфологии.

У данного метода имеется неоспоримая полезность в вопросах пространственной организации структур, площадей. Одним из минусов может

являться сложность понимания и выполнения алгоритма для построения полигонов вручную, но в современном мире, при современном уровне технологий, вычислительной мощности смартфона малой ценовой категории хватит для выполнения данной процедуры.

Основой для данной работы послужила статья “External morphology explains the success of biological invasions” (Azzurro et al., 2014), чьей гипотезой является попытка объяснения успешности биологических инвазий рыб-вселенцев Средиземного моря на основе их различия в морфологии с аборигенными видами. Было принято решение провести аналогичную работу для ихтиофауны реки Чулым, так как по данным некоторых авторов она является неким инвазивным коридором и может служить аналогом для проведения данной работы (Злотник, 2019; Зуев и др., 2014), процент инвазивных рыб в бассейне реки составляет 37,5% от всего видового состава, обитающего в Чулыме.

В качестве материала для исследования были отобраны изображения 33 видов рыб, обитающих в бассейне реки Чулым (Таблица 1). Большинство фотографий для последующего анализа были взяты с сайта «Животный мир Красноярского края» (<http://nature.sfu-kras.ru/fishes>), фото некоторых из видов были предоставлены Дарьей Викторовной Злотник. Данные, включающие количественную оценку инвазивности рыб на основе протокола FISK, а также данные включающие оценку степени инвазий на основе расселения рыб вселенцев были предоставлены в рамках диссертационной работы Злотник Д.В. (Злотник, 2019).

Таблица 1. Виды бассейна реки Чулым (Злотник, 2019; Зуев и др., 2014)

№	Семейство	Вид
1	Cottidae	<i>Cottus sibiricus</i> (Linnaeus, 1758)
2	Cyprinidae	<i>Gobio gobio</i> (Linnaeus, 1758)
3	Cyprinidae	<i>Abramis brama</i> (Linnaeus, 1758)*
4	Cyprinidae	<i>Alburnus alburnus</i> (Basilewsky, 1855)*
5	Cyprinidae	<i>Leucaspius delineatus</i> (Heckel, 1843)*
6	Cyprinidae	<i>Leuciscus idus</i> (Linnaeus, 1758)

7	Cyprinidae	<i>Leuciscus leuciscus</i> (Linnaeus, 1758)
8	Cyprinidae	<i>Rhynchocypris percunurus</i> (Pallas, 1814)
9	Cyprinidae	<i>Phoxinus phoxinus</i> (Linnaeus, 1758)
10	Cyprinidae	<i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758)
11	Balitoridae	<i>Barbatula toni</i> (Linnaeus, 1758)
12	Ictaluridae	<i>Ictalurus punctatus</i> (Linnaeus, 1758)*
13	Coregonidae	<i>Coregonus albula</i> (Linnaeus, 1758)*
14	Coregonidae	<i>Coregonus ludoga</i> (Linnaeus, 1758)*
15	Coregonidae	<i>Stenodus leucichthys nelma</i> (Guldenstadt, 1772)
16	Coregonidae	<i>Coregonus peled</i> (Gmelin, 1789)
17	Thymallidae	<i>Thymallus arcticus</i> (Pallas, 1784)
18	Salmonidae	<i>Brachymystax tumensis</i> (Mori, 1930)
19	Salmonidae	<i>Hucho taimen</i> (Pallas, 1773)
20	Salmonidae	<i>Parasalmo mykiss</i> (Walbaum, 1792)*
21	Esocidae	<i>Esox Lucius</i> (Linnaeus, 1758)
22	Lotidae	<i>Lota lota</i> (Linnaeus, 1758)
23	Percidae	<i>Gymnocephalus cernuus</i> (Linnaeus, 1758)
24	Percidae	<i>Perca fluviatilis</i> (Linnaeus, 1758)
25	Percidae	<i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus, 1758)*
26	Odontobutidae	<i>Perccottus glenii</i> (Dybowski, 1877)*
27	Cyprinidae	<i>Carassius carassius</i> (Linnaeus, 1758)
28	Cyprinidae	<i>Carassius gibelio</i> (Linnaeus, 1758)*
29	Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i> (Linnaeus, 1759)*
30	Cyprinidae	<i>Tinca tinca</i> (Linnaeus, 1758)
31	Cyprinidae	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (Valenciennes, 1844)*
32	Acipenseridae	<i>Acipenser baerii</i> (Brandt, 1869)
33	Acipenseridae	<i>Acipenser ruthenus</i> (Linnaeus, 1758)

* - инвазивные рыбы бассейна реки Чулым

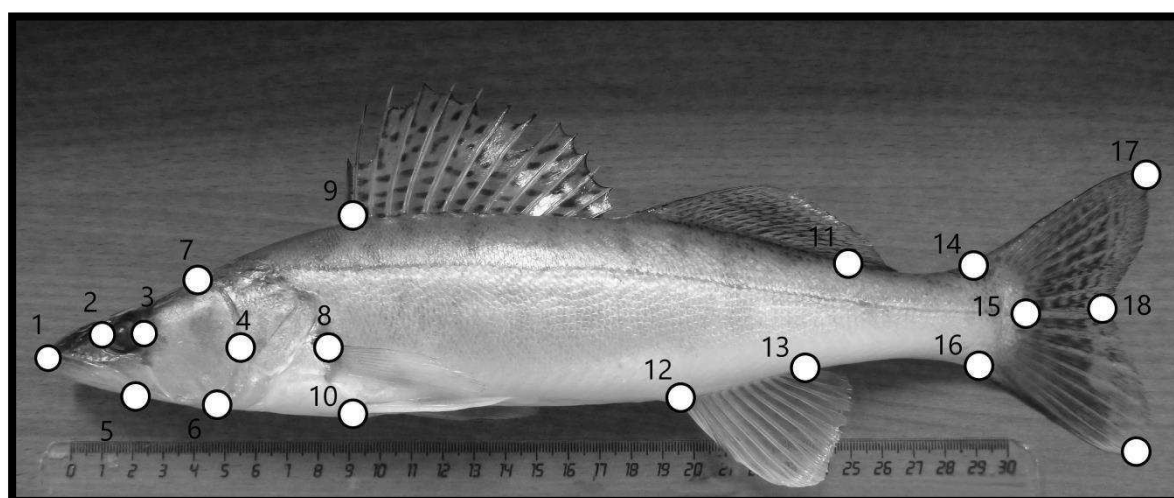


Рисунок 1. Координаты для геометрической морфометрии

Для геометрической морфометрии были приняты 19 гомологичных точек (Рисунок 1): 1 – передний конец верхней челюсти; 2 – передний край глаза; 3 – задний край глаза; 4 – задний конец жаберной крышки; 5 – задний конец верхней челюсти; 6 – нижний конец жаберной крышки; 7 – задний конец затылочной кости; 8 – верхний луч грудного плавника; 9 – первый луч спинного плавника; 10 – первый луч брюшного плавника; 11 – последний луч спинного плавника; 12 – первый луч анального плавника; 13 – последний луч заднего плавника; 14 – основание верхнего луча хвостового плавника; 15 – основание луча хвостового плавника на уровне срединной линии; 16 – основание нижнего хвостового плавника; 17 – окончание верхнего хвостового плавника; 18 – окончание луча хвостового плавника на уровне срединной линии; 19 – окончание нижнего луча хвостового плавника.

Изображения рыб загружались в программу *TPSdig*, где происходила расстановка координат и формировался TPS-файл с положением каждой координаты. После этого TPS-файл загружался в программу *R-studio*, где на его основе проводился прокрустов анализ для выравнивания видов относительно друг друга, после этого там же формировалась таблица относительных деформаций. Данные процедуры проводились с помощью библиотеки *geomorph* для *R-studio* (Adams et al., 2013; Sherratt, 2016). После этого, на основании таблицы относительных деформаций проводился многомерный статистический анализ по методу главных компонент, с помощью библиотеки *ggplot2* для *R-studio*.

На основе построенного графика главных компонент, также в *R-studio* формировались полигоны Вороного, с помощью библиотеки *ggoronoi*. Для оценки морфопространства было принято следующее ранжирование: I ранг по морфопространству получали полигоны, находящиеся внутри пространства, занимаемого семейством, либо с меньшей или аналогичной площадью; II ранг по морфопространству получали полигоны, имеющие или большую площадь, чем соседние, или расположенные на периферии пространства, занимаемого

семейством; III ранг по морфопространству получали полигоны, расположенные на периферии всего общего морфопространства видов.

Для оценки успешности инвазий рыб-вселенцев бассейна реки Чулым были приняты два способа: Первый способ основан на протоколе Fish Invasiveness Screening Kit, Второй - на расселении инвазивных видов по бассейну реки Чулым. Протокол FISK предполагает количественную и качественную характеристику инвазивности видов. Все данные по этим двум методам были предоставлены Злотник Д.В. в рамках ее диссертационной работы (Злотник, 2019). Для определения инвазивности видов на основе их расселения, было принято следующее ранжирование: I ранг по расселению получали виды, встречающиеся локально в одном водоеме бассейна реки Чулым; II ранг по расселению получали виды, встречающиеся на территориях, составляющих половину и больше половины реки Чулым; III ранг по расселению получали виды, встречающиеся повсеместно в бассейне реки Чулым.

Также к присутствующим параметрам вида были приурочены еще две переменные, а именно: температурные предпочтения для каждого вида-вселенца на основе обзора соответствующей литературы (Голованов, Капшай, 2015; Решетников, 2013). А также было добавлено время нахождения каждого вида-вселенца в бассейне реки Чулым в годах, также на основе данных из диссертационной работы Злотник Д.В.(2019).

На основании данных, полученных в предыдущих пунктах были проведены два статистических анализа на поиск взаимосвязи между морфологическими переменными и переменными, характеризующими инвазионный статус рыб вселенцев, и экологическую составляющую видов, а именно, была проведена простая линейная регрессия между переменными, а также был проведен корреляционный анализ Спирмена для поиска взаимосвязи между переменными. Корреляционный анализ Спирмена был

выбран потому, что он нацелен на поиск взаимосвязей между номинативными переменными, которыми и являются некоторые из перечисленных перечисленные.

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы:

1. Было проведено ранжирование инвазионных видов рыб бассейна р. Чулым по их распространению, температурным предпочтениям, времени вселения и оценке по протоколу FISK. Самый высокий ранг по распространению получили: обыкновенный лещ, обыкновенная верховка и ротан головешка. Высший ранг по потенциальной инвазионности, на основе протокола FISK получили: обыкновенный лещ, ротан головешка и обыкновенный сазан.
2. Проведено ранжирование инвазионных видов рыб бассейна реки Чулым по внешней морфологии. Самыми непохожими на соседей видами оказались: европейская ряпушка, сиг-лудога, ротан головешка и белый толстолобик
3. Произведена оценка статистической взаимосвязи между морфологией рыб и степенью успешности их инвазий. Р-уровень значимости для регрессионного анализа во всех предложенных моделях составил больше 0,05, что свидетельствует об отсутствии статистически достоверной взаимосвязи между переменными.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алимов А. Ф. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах / А. Ф. Алимов, Н. Г. Богутская, М. И. Орлова [и др.]. – М. : Т-во науч. изд. КМК, 2004. – 436 с.
2. Алимов И. А. Повышение эффективности заводского подращивания личинок карповых рыб : дис. – ИА Алимов-М.: ТСХА, 1994.-25 с, 1994.
3. Афанасьев А. П. ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГРАММ ВОРОНОГО ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ИХ ЗОН ОТВЕТСТВЕННОСТИ //Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – №. 1-1 (67).
4. Афанасьев П. К., Орлов А. М., Рольский А. Ю. Сравнительный анализ формы отолитов как инструмент видовой идентификации и изучения популяционной организации различных видов рыб //Зоологический журнал. – 2017. – Т. 96. – №. 2. – С. 192-200.
5. Болдырев В. С. ОБЫКНОВЕННЫЙ РЫБЕЦ *VIMBA VIMBA VIMBA* (АСТИНОПТЕРЫГИ: СУПРИНИДАЕ) НА НЕЗАРЕГУЛИРОВАННОМ УЧАСТКЕ НИЖНЕЙ ВОЛГИ //Российский журнал биологических инвазий. – 2020. – Т. 13. – №. 3. – С. 2-11.
6. Голованов В. К., Капшай Д. С. Сравнительный анализ температурного оптимума и верхней температурной границы жизнедеятельности у молоди рыб, обитающих в водоемах Верхней Волги //Труды Института биологии внутренних вод РАН. – 2015. – №. 72 (75). – С. 80-90
7. Григорьев С. С. Биологические основы и основные направления разведения рыбы индустриальными методами: уч. пособ. для студентов специальности 110901 «Водные биоресурсы и аквакультура» очной и заочной форм

- обучения //Индустриальное рыбоводство. -Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. – 2008. – №. 2. – 186 с.
8. Захаров Е. А., Емелин П. О. Актуальность использования аппаратуры контроля орудий лова для снижения погрешности в оценке численности гидробионтов //Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). – 2016. – Т. 186.
 9. Зданович В. В., Панов В. П., Келехсаев М. З. Рост и продукционные показатели молоди радужной форели *Oncorhynchus mykiss* Walbaum при постоянных температурах и в условиях температурного градиента //Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2013. – №. 1. – С. 97-103.
 10. Злотник Д. В. и др. Чужеродные виды в ихтиофауне бассейна реки Чулым (Средняя Обь): дис. ... канд. биол. наук : 03.02.04 : защищена 16.01.20. Томск, 2019. 250 с.
 11. Зуев И. В. и др. Современный состав и распространение чужеродных видов рыб в водных объектах Красноярского края //Российский журнал биологических инвазий. – 2016. – Т. 9. – №. 3. – С. 28-38.
 12. Карабанов, Д. П. Традиционные и перспективные методы борьбы с чужеродными видами рыб / Д. П. Карабанов, Ю. В. Кодухова // Вестн. Астраханского государственного технического ун-та. Сер. Рыбное хозяйство. — 2015. — №. 1. — С. 124—133.
 13. Кривоускова Е. В., Соколов А. В. Влияние сезонных температурных изменений в озере виштынецком (Калининградская область) на вертикальное распределение уловов европейской ряпушки //Вестник молодежной науки. – 2018. – №. 1 (13). – С. 1-7.
 14. Махаров А. А., Карабанов Д. П., Кодухова Ю. В. Генетические методы борьбы с чужеродными видами //Российский журнал биологических инвазий. – 2014. – Т. 7. – №. 2. – С. 110-126.

15. Муханов К. С., Сотников М. А. Алгоритм построения диаграммы Вороного для внутренней части замкнутого ортогонального полигона в метрике L_{∞} // Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС). – 2006. – №. 1. – С. 135-141.
16. Павлинов И. Я., Микешина Н. Г. Принципы и методы геометрической морфометрии // Журнал общей биологии. – 2002. – Т. 63. – №. 6. – С. 473-493.
17. Петрищев В. П., Яковлев И. Г. Разработка территориальных моделей дифференциации структуры природопользования в Оренбургской области // Вопросы степеведения. – 2010. – Т. 8.
18. Попов П. А., Казанцев В. А. Рыбы Сибири: распространение, экология, вылов. – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет", 2007. – 542 с.
19. Решетников Ю. С. и др. Атлас пресноводных рыб России. – 2003. – 253 с.
20. Рыжков Л. П., Дзюбук И. М. Биология сига-лудогги юго-западной части Онежского озера // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2014. – Т. 1. – №. 8 (145). – С. 16-20.
21. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. – Алексей Владимирович Скворцов, 2002. – 128 с.
22. Суховольский В. Г., Захаров Ю. В., Ковалев А. В. Моделирование дефектов в горизонтальной структуре лесных насаждений // Хвойные бореальной зоны. – 2016. – Т. 34. – №. 3-4. – с. 174-179.
23. Шумак В. В. Канальный сом *ictalurus punctatus* (Raf.) как объект акклиматизации (на примере водоема-охладителя озера Белое). – 2001.
24. Adams D. C., Rohlf F. J., Slice D. E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution' // Italian Journal of Zoology. – 2004. – Т. 71. – №. 1. – С. 5-16.

25. Adams D. C., Otárola- Castillo E. geomorph: an R package for the collection and analysis of geometric morphometric shape data //Methods in Ecology and Evolution. – 2013. – T. 4. – №. 4. – C. 393-399.
26. Ai Q. et al. Genetic and morphological differences between yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) from the Bohai Sea, China and the Southern Ocean, Australia //Aquaculture and Fisheries. – 2021. – T. 6. – №. 3. – C. 260-266.
27. Azzurro E. et al. External morphology explains the success of biological invasions //Ecology letters. – 2014. – T. 17. – №. 11. – C. 1455-1463.
28. Bunn S. E., Arthington A. H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity //Environmental management. – 2002. – T. 30. – №. 4. – C. 492-507.
29. Copp G. H. et al. The Fish Invasiveness Screening Kit (FISK) for non-native freshwater fishes: A summary of current applications //Risk Analysis. – 2013. – T. 33. – №. 8. – C. 1394-1396.
30. Copp G. H. et al. European Non- native Species in Aquaculture Risk Analysis Scheme—a summary of assessment protocols and decision support tools for use of alien species in aquaculture //Fisheries Management and Ecology. – 2016. – T. 23. – №. 1. – C. 1-11.
31. Copp G. H., Garthwaite R., Gozlan R. E. Risk identification and assessment of non-native freshwater fishes: a summary of concepts and perspectives on protocols for the UK //Journal of Applied Ichthyology. – 2005. – T. 21. – №. 4. – C. 371.
32. Rohlf F. J., Bookstein F. L. Proceedings of the Michigan morphometrics workshop. – University of Michigan Museum of Zoology, 1990. – C. 380.
33. Rohlf F. J., Marcus L. F. A revolution morphometrics //Trends in ecology & evolution. – 1993. – T. 8. – №. 4. – C. 129-132.
34. Schaefer H. et al. Testing Darwin's naturalization hypothesis in the Azores //Ecology letters. – 2011. – T. 14. – №. 4. – C. 389-396.

35. Shamos M. I., Hoey D. Geometric intersection problems //17th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1976). – IEEE, 1976. – C. 208-215.
36. Sherratt E. Quick guide to geomorph 3.0. 2. – 2016.
37. Simberloff D. Risk assessments, blacklists, and white lists for introduced species: are predictions good enough to be useful? //Agricultural and Resource Economics Review. – 2006. – T. 35. – №. 1203-2016-95336. – C. 1-10.
38. Takács P. et al. Repeatability, reproducibility, separative power and subjectivity of different fish morphometric analysis methods //PloS one. – 2016. – T. 11. – №. 6. – C. 1-16.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
институт

Кафедра водных и наземных экосистем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись инициалы, фамилия

к в 20 г

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

06.03.01 - Биология

Оценка связи между внешней морфологией
инвазивных видов рыб и степенью их акклиматизации в
бассейне реки Чулым
Тема

Руководитель

З, 25.06.21
подпись, дата

доцент, к.б.н.
должность, ученая степень

И. В. Зув
инициалы, фамилия

Выпускник

Ю. И. 25.06.21
подпись, дата

Ю. И. Трубчанинов
инициалы, фамилия

Красноярск, 2021

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
институт

Кафедра водных и наземных экосистем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

подпись инициалы, фамилия

« » 20 г

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

06.03.01 - Биология

Оценка связи между внешней морфологией
инвазионных видов рыб и степенью их акклиматизации в
бассейне реки Чулым

Тема

Руководитель

З, 25.06.21
подпись, дата

доцент, к.б.н.
должность, ученая степень

И. В. Зуев

инициалы, фамилия

Выпускник

Дмитрий 25.06.21
подпись, дата

Ю. И. Трубчанинов

инициалы, фамилия

Красноярск, 2021