

На правах рукописи



САУТКИН ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ

ПОКАЗАТЕЛИ ВИДОВОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗНООБРАЗИЯ
В ОЦЕНКЕ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Казань – 2023

Работа выполнена на кафедре общей экологии
Института экологии и природопользования
Казанского (Приволжского) федерального университета

Научный руководитель:

Рогова Татьяна Владимировна – доктор биологических наук, профессор кафедры общей экологии Института экологии и природопользования ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты:

Нешатаев Василий Юрьевич – доктор биологических наук, заведующий кафедрой ботаники и дендрологии Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова»

Елумеева Татьяна Георгиевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и географии растений Биологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита диссертации состоится “27” июня 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета КФУ.015.3 в Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Сведения о защите, автореферат и диссертация размещены на официальных сайтах ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>) и ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (<http://kpfu.ru>).

Автореферат разослан “___” 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент



Кожевникова М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности

Биологическое разнообразие и экосистемные услуги, которые оно обеспечивает, являются основой жизни на Земле, а также источником средств к существованию и залогом благополучия людей повсюду в мире. Охрана биоразнообразия и предотвращение дальнейшей его утраты — это необходимая инвестиция в общее будущее.

В современных исследованиях, акцент делается на экосистемных услугах как инструменте для оценки экосистем и поощрения их устойчивого использования и механизмов, с помощью которых различные организмы способствуют доставке экосистемных услуг.

Способность экосистемы предоставлять несколько услуг, в первую очередь, заключается в распределении соответствующих свойств экосистем и определения того, какие организмы или группы организмов, контролируют эти свойства. Определение ключевых характеристик и механизмов, с помощью которых эти организмы влияют на свойства экосистем является важнейшей задачей, работа над решением которой активно ведется повсеместно.

За последние десять лет в мире проблематика экосистемных услуг стремительно развивалась, что нашло отражение не только в научных разработках, но и в концептуальных официальных документах ведущих международных организаций. Во многом такой интерес и активность ученых связана с осознанием быстрой деградации природы, которая наносит огромный ущерб благосостоянию людей и экономике.

Цель исследования

Разработка подходов к оценке экосистемных услуг по показателям видового и функционального разнообразия сосудистых растений.

Задачи исследования

- Оценить влияние функциональных признаков листьев растений на продукционные экосистемные услуги растительных сообществ.
- Разработать методику прогноза биомассы луговых сообществ, используя показатели видового разнообразия растений.
- Используя функциональные признаки растений оценить культурные экосистемные услуги.
- Провести оценку экосистемных услуг для ООПТ с учетом показателей видового разнообразия.

Научная новизна

Использованные для оценки продукционных экосистемных услуг луговых сообществ функциональные признаки растений, относящиеся к экономическому спектру листа, позволили выявить прямую зависимость биомассы от них. Показано, что прогностическая модель, учитывающая показатели видового состава сообщества, обилия функциональных групп растений и доминантных видов, и классификации растительности и местообитаний позволяет оценить качество продукционных услуг. Установлено, что разработанный метод поправочных коэффициентов, дает возможность провести стоимостную оценку экосистемных услуг лесных сообществ с учетом эколого-ценотического спектра видового состава. Показано, что вклад видового разнообразия в поставки эстетических и рекреационно-туристических культурных экосистемных услуг можно оценить с помощью функциональных признаков растений.

Теоретическая и практическая значимость

Метод оценки продукционных услуг, основанный на учёте и измерении функциональных признаков растений, относящихся к экономическому спектру листа, позволяет установить, насколько продуктивно будет луговое сообщество: наименее продуктивные сообщества характеризуются низкими значениями измеряемых функциональных признаков, тогда как наиболее продуктивные — высокими. Разработанная математическая модель прогнозирует биомассу сообществ, без ее изъятия. Полученные прогнозные значения

статистически достоверны и соответствуют значениям фактически собранной биомассы. Предлагаемая модель может быть применена для быстрой и достоверной оценки продуктивности различных растительных сообществ.

Предложенный метод поправочных коэффициентов, позволяет ввести в оценку компоненту биоразнообразия и получить более высокие значения стоимости оцениваемых производственных экосистемных услуг. В качестве метода оценки качества эстетических и рекреационно-туристических культурных экосистемных услуг предлагается использование легко измеряемых индивидуальных функциональных признаков растений. Метод может быть полезен в управлении рекреационным потенциалом территорий, а также в городском озеленении.

Положения, выносимые на защиту

1. Вклад видового разнообразия в экосистемные услуги можно охарактеризовать через функциональные параметры растений. Между видовым составом, функциональным биоразнообразием и качеством экосистемных услуг существует устойчивая связь.

2. Статистическая модель, учитывающая видовой состав и функциональное разнообразие сообществ позволяет с достаточно высокой степенью достоверности оценить продуктивность луговых сообществ, сходных по видовому составу и принадлежащих к одним классификационным категориям, без непосредственного сбора данных о продуцируемой биомассе.

3. Учет видового состава сообщества и применение предложенного метода поправочных коэффициентов, включающего данные о доле лесных, редких и охраняемых видов растений, повышающих, иrudеральных видов, понижающих качество оказываемых экосистемных услуг, позволяет получить более точные значения стоимости экосистемных услуг по сохранению биоразнообразия.

Степень достоверности и апробации результатов исследования.

Выводы и научные положения, сделанные в диссертации, строго обоснованы и вытекают из собственных исследований автора работы. Достоверность выводов подтверждена современными методами статистического анализа экспериментальных данных.

Результаты научных исследований представлялись на Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 60-летию института леса Карельского научного центра РАН «Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги» (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г.); на 60-м ежегодном симпозиуме IA VS «Растительный покров в природных и культурных ландшафтах» (Италия, Палермо, 20-24 июня 2017 г.); на III Международной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века» (Казань, 27-29 сентября 2017 г.); на XXV Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы) «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 12 –16 марта 2018 г.); на Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2018», МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 9 - 13 апреля 2018 г.); на Российской научно-практической конференции XXX Чтения имени эколога и зоолога, профессора Виктора Алексеевича Попова: (Казань, 16 марта 2019 г.); на Итоговой научной конференции КФУ, секция: Общая экология. (Казань, 30 января 2020 г.); на III Национальной научной конференции с международным участием «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия» (Екатеринбург, 20–25 апреля 2020 г.), на 29-ой конференции European Vegetation Survey «Revegetating Europe – Contributions of the EVS to the UN. Decade on Ecosystem Restoration» (Онлайн конференция, 6-7 сентября 2021 г.)

Личный вклад.

Теоретическая часть работы, сбор полевого материала, анализ и обобщение результатов исследований, представленные в диссертации, проведены лично автором.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 2 в зарубежных изданиях, входящих в Scopus / Web of Science, 2 в отечественных изданиях, входящих в перечень ВАК и в Scopus / Web of Science, 1 в отечественных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация общим объемом 170 страниц состоит из введения, 4 глав и выводов. Список литературы включает 239 источника, в том числе 230 иностранных. Работа включает 17 рисунков, 10 таблиц и приложение на 26 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

В обзоре литературы описана суть концепции экосистемных услуг и история ее становления, дается классификация экосистемных услуг. Приводится идея «каскада экосистемных услуг», объясняющая взаимосвязь между биоразнообразием, функционированием экосистем и благосостоянием человека. Рассмотрены перспективные направления развития концепции, а также угрозы для экосистемных услуг в следствии сокращения биоразнообразия.

Глава 2. Природные условия территории исследования

В главе рассмотрены природные условия четырех природных районов рассматриваемого региона. Характерным для территории республики является наличие границ крупных единиц районирования практически по всем основным ландшафтообразующим компонентам (Бакин и др., 2000; Марков, 1946; Ступишин, 1964). В соответствии с ботанико-географическим районированием по территории проходят зональные границы подтаежных еловово-широколиственных лесов, широколиственных лесов и луговых степей (Растительность европейской части СССР, 1980).

Глава 3. Материалы и методы исследования

Материалы для исследования собирались на территории Республики Татарстан: в Раифском участке Волжско - Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ), в Айшинском лесничестве, в окрестностях малых населенных пунктов Зеленодольского района: села Ильинское, поселков Новочувашский, Новопольский, Грузинский и Урняк; в лесопарке «Лебяжье» городского округа Казань; в окрестностях малых населенных пунктов Рыбно-Слободского района: п.г.т. Рыбная Слобода и села Анатыш, и в окрестностях деревни Мелля-Тамак Муслюмовского района.

Объектами исследования были выбраны различные луговые и лесные сообщества, встречающиеся на территории Республики Татарстан. Луговые сообщества представлены вторичными лугами, сформировавшимися на месте подтаежных хвойно-широколиственных и широколиственных лесов. Лесные сообщества представлены различными сообществами сосновой, березовой и липовой формаций.

В ходе полевых работ выполнены геоботанические описания 47 пробных площадей. Описания выполнены по стандартной методике (Воронов, 1973) с указанием видового состава и характеристикой обилия видов по шкале Друде. Площадь пробной площадки для луговых сообществ - 100 м², для лесных - 400 м². Помимо полевого материала, из базы данных «Флора» («Vegetation Database of Tatarstan» (Prokhorov et al., 2017)) взято 735 геоботанических описаний, выполненных с 2000 по 2019 гг.

Сообщества классифицированы при помощи программного обеспечения JUICE v7.0 (Tichý, 2002) и отнесены к синтаксонам уровня класса растительности системы Браун-Бланке (EVC) (Mucina et al., 2016). По итогам классификации все рассматриваемые луговые сообщества отнесены к классам: Molinio-Arrhenatheretea R. Tx. 1937 (MOL), Festuco-Brometea

Br.-Bl. Et Tx. Ex Soy 1947 (FES) и Artemisietea vulgaris Lohmeyer et al. Ex von Rochow 1951 (ART); лесные сообщества к классам: Vaccinio-Piceetea Br.-Bl. In Br.-Bl. et al. 1939 (PIC), Brachypodio pinnati-Betuletea pendulae Ermakov et al. 1991 (BRA) и Carpino-Fagetea sylvaticae Jakucs ex Passarge 1968 (FAG). По типам местообитаний EUNIS Habitat Classification (Chytrý et al., 2020) исследуемые луга относятся к лугам (E), сенокосным лугам на низких и средних высотах (E22), постоянным мезотрофным пастбищам и лугам, выпасаемым после сенокосов (E21) и антропогенным травяным сообществам (IE51). Выделение ассоциаций и их названия даны на основании доминантно-детерминантного подхода.

На 17 из 47 пробных площадей заложено по десять площадок площадью 0,25 м² каждая, где выполнены сплошные укосы и проведена оценка проективного покрытия видов в процентах.

Выполнены измерения функциональных признаков листьев доминирующих видов, которые составляют большую часть расчетной биомассы на каждом отдельном участке (Grime, 1998). В исследованных лесных сообществах учитывались лишь виды травяно-кустарничкового яруса напочвенного покрова, древесные виды – явные доминанты в структуре биомассы сообщества, были исключены из анализа. Таким образом было собрано 2088 листьев с 74 видов луговых и лесных сосудистых растений и выполнена оценка следующих признаков: площадь листьев, см² (LA), сухая масса листьев, г (LDM), удельная площадь листьев на единицу их массы, см²/г (SLA). Отбор и замеры выполнялись в соответствии со стандартными протоколами измерений (Perez-Harguindeguy et al. 2013).

Средневзвешенные по сообществу значения (CWM) признаков листьев и индексы функционального разнообразия рассчитаны для сообществ каждой пробной площади. Для расчетов брались значения трех признаков листьев: площади, сухой массы и SLA. Для оценки функционального разнообразия использованы индексы функционального богатства Fric, функциональной выравненности Feve и функциональной дивергенции Fdiv (Mason et al. 2005; Villeger et al. 2008; Mouchet et al. 2010). Расчеты CWM признаков и функционального разнообразия проводили в программной среде R с помощью пакета FD (Laliberte et al. 2014).

Основываясь на классификации услуг МЕА (2005), для исследования были выбраны два вида социокультурных услуг: эстетические и рекреационно-туристические. Для каждого вида услуг по методике Garcia-Llorente (2011) был определен влияющий набор функциональных признаков растений.

Используя данные стоимостных оценок вклада экосистемных услуг природных сухопутных ландшафтов России, опубликованных в Пятом национальном докладе «Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации» (2015), была произведена удельная денежная оценка экосистемных услуг на исследуемой территории Раифского лесничества ВКГПБЗ. Для оценки вклада видового разнообразия в оценку экосистемных услуг были разработаны поправочные коэффициенты с учетом эколого-ценотического состава исследуемых площадей.

Статистическая обработка данных и построение модели выполнены в программной среде R (R Core Team, 2022). Для прогнозирования биомассы использовался линейный регрессионный анализ. В качестве скалярных независимых переменных использовались данные проективного покрытия функциональных групп и видов-доминантов, в качестве факторов – принадлежности площади к конкретному классу растительности и типу местообитания. Ординация была выполнена с помощью анализа главных компонент (Principal component analysis). Кластерный анализ проводился по алгоритму Варда (Ward), в качестве метрики сходства использовалось Евклидово расстояние (Murtagh et al., 2014).

Глава 4. Результаты исследований

4.1 Функциональное разнообразие и экосистемные услуги

В главе рассмотрены отношения между свойствами и компонентами экосистем, в которых биоразнообразие может быть регулятором фундаментальных экосистемных процессов, экосистемной услугой или благом. Описана связь функциональных признаков и групп организмов с процессами генерации экосистемных услуг. Для объяснения этой связи рассмотрены две гипотезы: *гипотеза разнообразия* и *гипотеза о соотношении массы*.

4.2. Функциональные признаки листьев растений в оценке продукционных экосистемных услуг растительных сообществ

Целью исследования является оценка зависимости первичной надземной биомассы растений от средневзвешенных значений функциональных признаков сообщества (гипотеза соотношения биомассы) и от функционального разнообразия (гипотеза комплементарности ниш). Всего заложено 7 лесных и 10 луговых пробных площадей.

Для подтверждения гипотезы о соотношении биомассы, оценивалась корреляционная связь величины биомассы со средневзвешенными значениями (CWM) признаков SLA, LA и LDM. Предполагалось, что высокие CWM признаков будут характерны для высокопродуктивных сообществ. Положительная связь между биомассой и CWM LA ($r = 0.69^*$) и SLA ($r = 0.67^*$) является статистически значимой. Наиболее продуктивными сообществами являются: зарастающий лесом разнотравный луг (414.28 г/м^2), сенокосный разнотравно-злаковый луг (238.86 г/м^2) и пастбищный злаково-разнотравный луг с контролируемым выпасом (282.65 г/м^2). Травяно-кустарничковый ярус лесных сообществ характеризуется наличием положительной, но не значимой связи между биомассой и CWM LA ($r = 0.54$, $p > 0.05$) и LDM ($r = 0.54$, $p > 0.05$). Отрицательная не значимая связь отмечается между биомассой и CWM SLA ($r = -0.44$, $p > 0.05$). Наиболее продуктивные лесные сообщества – относительно сухие ландышево-чернично-зеленомошные сосняки (101.76 г/м^2) соответствуют низким CWM SLA и высоким CWM LA и LDM. Влажные чернично-сфагновые сосняки (28.99 г/м^2) характеризуются высокими CWM SLA, низкими CWM LA и LDM и наименьшей биомассой.

Вторая проверяемая гипотеза комплементарности ниш, предполагает, что функциональное разнообразие положительно коррелирует с биомассой. Максимальные значения биомассы и индекса Fric соответствуют зарастающим лесным разнотравным лугам ($Fric = 0.6$). Заметно меньшим значением биомассы при достаточно высоком уровне функционального богатства характеризуется сенокосный луг, находящийся в активном пользовании ($Fric = 0.5$). Пастбищный луг с контролируемым выпасом ($Fric = 0.1$) также отличается достаточно высокими значениями биомассы, но показывает более низкое функциональное богатство. Самостоятельную группу формируют луга, испытывающие высокую пастбищную нагрузку: сбитое пастбище ($Fric = 0.5$) и рекреационный луг в лесопарке ($Fric = 0.5$). При высоком функциональном разнообразии они имеют низкие значения биомассы. Однако корреляционный анализ не выявил статистически значимых связей между значениями биомассы и Fric луговых сообществ ($r = 0.34$, $p > 0.05$). Лесные сообщества демонстрируют более выраженные положительные связи исследуемых показателей, статистически не значимые ($r = 0.56$, $p > 0.05$). Самыми высокими значениями биомассы и Fric отличается сухой сосняк ландышево-бруснично-зеленомошный ($Fric = 0.6$), а наименьшими значениями – березняк пущево-сфагновый ($Fric = 0.1$).

Функциональная выравненность (Feve) может рассматриваться как степень равномерности распределения биомассы сообщества в пространстве ниши, позволяющей эффективно использовать весь спектр доступных ему ресурсов. Связь биомассы и индекса функциональной выравненности Feve во многом повторяет закономерности связи биомассы и индекса функционального богатства Fric. Корреляционный анализ не выявил статистически значимой связи между значениями биомассы и индекса Feve. В луговых сообществах величина биомассы в большей мере зависит от характера антропогенного воздействия ($r = 0.33$, $p > 0.05$).

Лесные сообщества показали слабую связь биомассы и индекса Feve ($r = 0.41$, $p>0.05$). Максимальные значения биомассы и выравненности характерны для сосновых ландышево-чернично-зеленошерстистых (Feve = 0,7) и березняков пущево-сфагновых (Feve = 0,75). Сочетанием минимальных значений биомассы и Feve отличается сосновый чернично-сфагновый (Feve = 0,1).

Высокие значения индекса функциональной дивергенции Fdiv указывают на высокую степень дифференциации ниш и, следовательно, низкую конкуренцию за ресурсы (Mason et al., 2005). Сообщества с высокой функциональной дивергенцией могут обеспечивать выполнение более разнообразных экосистемных функций в результате более эффективного использования ресурсов. Корреляционный тест показал слабую, статистически не значимую связь между значениями биомассы и индексом функциональной дивергенции Fdiv.

Анализируя в целом полученные значения индексов функционального разнообразия лесных и луговых сообществ, занимающих различные экотопы по режимам увлажнения, почвенного плодородия и характера антропогенного использования территории, можно предположить, что лесные сообщества более функционально структурированы. Очевидно, это является результатом длительного существования многолетних видов лесного сообщества и успешной дифференциацией их экологических ниш по сравнению с полидоминантными и сменно-доминантными луговыми сообществами, которые постоянно испытывают возмущения, вызванные внешним воздействием, что отражается на разнообразии и характере взаимоотношений видов.

4.3 Показатели видового разнообразия в прогнозе биомассы луговых сообществ

Опираясь на основные положения гипотезы соотношения биомассы, с помощью построения статистической линейной модели выполнена проверка возможности прогнозирования величины надземной биомассы по данным о видовом составе сообществ и обилии доминантных функциональных групп растений, которые выступают в качестве универсальных оценочных критериев. В качестве обучающей выборки выбраны 10 луговых площадей.

Наибольшая биомасса отмечается в условиях отсутствия сенокосной нагрузки на застраивающем лугу, расположенному на территории заповедника- (103.57 г/м^2). В категорию наименее продуктивных, предсказуемо попадают пастбищные луга с интенсивным выпасом. Наиболее показательна выборка площадей Рыбно-Слободского района, где относительно высокие значения биомассы получены для пастбищ, выпас на которых проходит умеренно (76.09 и 70.66 г/м^2), тогда как на пастбищах, где выпас идет интенсивно и в течение более длительного времени, биомасса значительно ниже (33.16 г/м^2).

На рисунке 1 приведены результаты кластерного анализа сообществ на ординационной плоскости. Верхнему кластеру соответствуют наиболее продуктивные, застраивающие луга классов MOL и FES. Среднему кластеру соответствуют преимущественно сенокосные луга классов MOL и FES. Нижний кластер объединил пастбищные луга всех трех классов. Наибольшей продуктивностью отличаются луга класса MOL местообитаний E22, используемые большей частью как сенокосы, в том числе и ныне не используемые. Луга класса FES местообитаний IE51 характеризуются средней биомассой, а наименьшая биомасса соответствует лугам класса ART местообитаний IE51, интенсивно используемым под выпас. Достаточно четко видна обратная зависимость величины биомассы от интенсивности антропогенной нагрузки на экосистему (вектора BM и Scen).

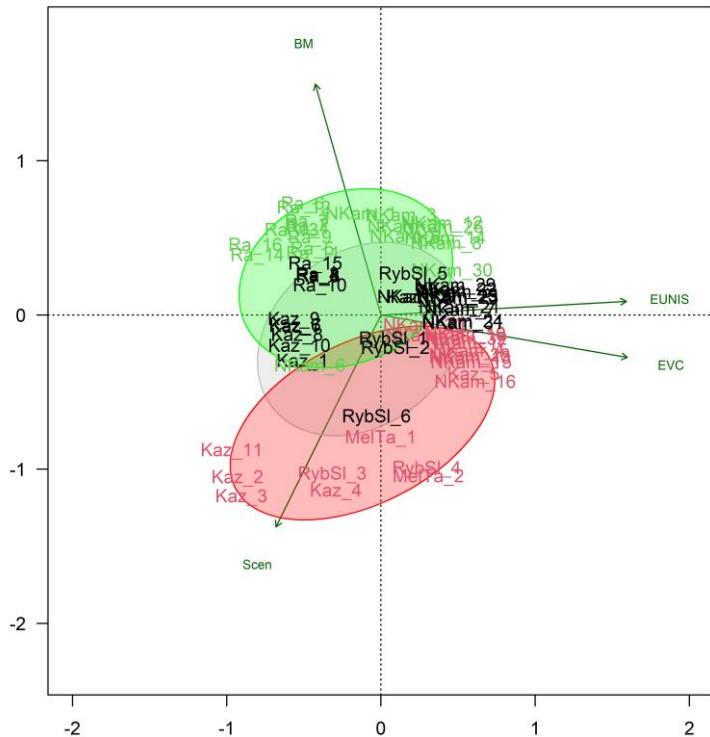


Рисунок1 –Ординационная плоскость в осях двух главных компонент. Цветом выделены основные кластеры сообществ; кодировка площадей: Ra - Волжско-Камский заповедник, NKam – нацпарк «Нижняя Кама», Kaz - окрестности г. Казань (Зеленодольский район), RybSl - окрестности п. Рыбная Слобода, MelTa - окрестности н.п. Мелля-Тамак (Муслюмовский район).

Используя все полученные фактические данные площадей эмпирической выборки, была разработана линейная регрессионная модель, позволяющая оценить биомассу BM ($\text{г}/\text{м}^2$) у схожих сообществ без необходимости её сбора:

$BM = \alpha + \beta_1 A_Gram + \beta_2 A_Leg + \beta_3 A_Dom + \beta_4 I(EUNIS = "E22") + \beta_5 I(EUNIS = "IE51") + \beta_6 I(EVC = "FES") + \beta_7 I(EVC = "MOL")$, где:

α – биомасса для нулевого обилия граминоидов, бобовых и доминантных видов разнотравья при типе *EUNIS* = E и классе *EVC* = ART;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коэффициенты регрессии, отражающие единичный вклад в биомассу величины проективного покрытия граминоидов A_{Gram} , бобовых A_{Legi} доминантных видов разнотравья A_{Dom} ;

$I(\dots)$ – обозначение индикаторной функции, которая принимает значение 1 в случае, если условие выполняется, иначе принимает значение 0;

$\beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ – коэффициенты регрессии, отражающие вклад в величину биомассы факторов, характеризующих типы местообитаний *EUNIS* и классы растительности *EVC*.

Полученная модель характеризуется статистически значимыми вкладами всех переменных в прогноз биомассы. Сама модель отличается высокой статистической значимостью (<0.001 , критерий Фишера, число степеней свободы 91) и объясняет 72% вариации биомассы (скорректированный R^2). Стандартная ошибка прогноза составляет 16.4 г/м² на исходных данных. По результатам перекрестной проверки (leave-out-out), коэффициент детерминации модели составил 69%, а стандартная ошибка прогноза составляет 17.2 г/м². Можно утверждать, что качество модели хорошее, модель демонстрирует приемлемые прогностические способности. Будучи протестированной на эмпирической выборке значений биомассы, полученная модель далее применялась для предсказания биомассы 48 пробных площадей с аналогичными типами местообитаний и классами растительности, для которых были установлены диапазоны значений исходных независимых переменных.

Спрогнозированные значения оказались сравнимы с фактическими данными по биомассе схожих классов растительности и типов местообитаний. Проверка достоверности предсказанных значений биомассы проводилась при помощи генератора псевдослучайных чисел путем создания искусственных диапазонов значений. Генерация искусственных диапазонов значений основывается на фактически измеренных диапазонах. Предсказанные моделью значения биомассы в 93% случаев попадают в диапазоны фактических значений биомассы.

4.4. Функциональный подход в оценке культурных экосистемных услуг на примере лесопарка «Лебяжье».

Демонстрация эстетической и рекреационной ценности может быть выведена через предпочтение определенных характеристик. На эстетические услуги влияние оказывают: жизненная форма и высота растения (травы, кустарнички и невысокие кустарники); привлекательность цветков, плодов и листьев; ранняя фенология и продолжительность жизни (многолетники). На рекреационно-туристические услуги влияют: жизненная форма и высота растения (деревья, кустарнички и травы); привлекательность листьев; продолжительность жизни (многолетники); не ядовитость. Было взято 40 геоботанических описаний, сделанных в лесопарке «Лебяжье». Большинство площадей принадлежали к соснякам ландышевым и соснякам злаково-разнотравным, находящимся на 2, 3 и 4 стадии рекреационной дигрессии. На заложенных площадках было зафиксировано 236 видов сосудистых растений, относящихся к 162 родам и 40 семействам.

Для оценки вклада каждого вида в обеспечение услуг использовались данные о наборах признаков, влияющих на выбранные виды услуг. Результаты кластерного анализа показали наличие 4 функциональных групп (Рисунок2).

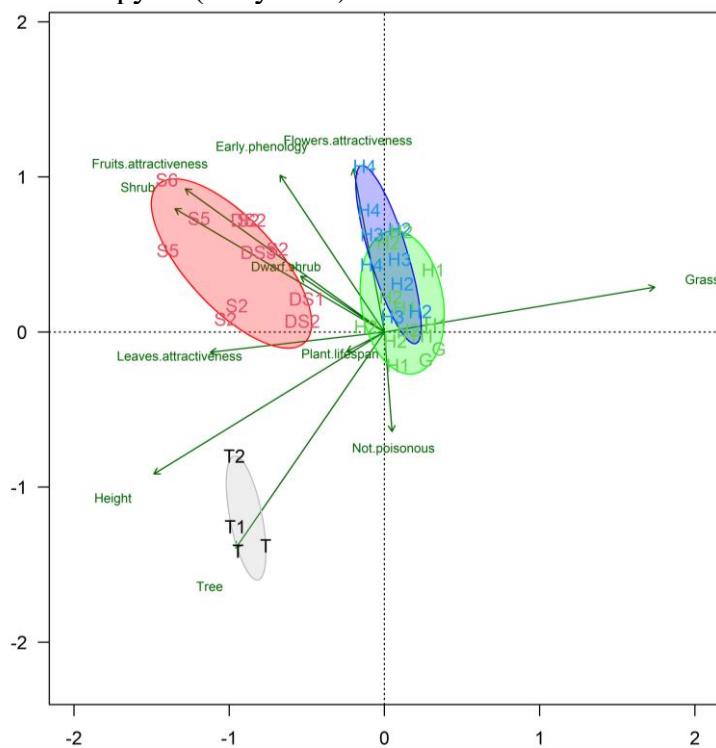


Рисунок2 – Ординация видов по 11признакам. Группа1. (T, T1, T2). Группа 2. (S2, S5, S6, DS1, DS2). Группа 3. (H2, H3, H4). Группа4. (H1, H2, G).

1 группа. В эту группу вошли исключительно многолетники, деревья и высокорослые кустарники, высотой более 10 м, с высокой привлекательностью листьев. Данный набор признаков позволяет определить группу как оказывающую в основном рекреационно-

туристические услуги. Эстетические услуги, оказываемые группой не столь значительны, и обуславливаются в основном привлекательностью листьев.

2 группа. Группа представлена кустарниками и кустарничками. Представители группы оказывают преимущественно эстетические услуги, что обуславливается большим числом красивоцветущих видов, видов с ярко окрашенными плодами и листьями. Рекреационные услуги незначительны ввиду наличия ядовитых растений и кустарников, не образующих полога, отмечается положительный вклад в услугу низкорослых полукустарничков.

3 группа. Группа представлена травянистыми растениями. Все виды, попавшие в эту группу, характеризуются высокой привлекательностью цветков, для доли видов характерна ранняя фенология. Растения из этой группы в наибольшей степени оказывают эстетические услуги. На рекреационные услуги положительно влияет принадлежность всех видов к травянистым растениям, отрицательное воздействие сводится к наличию ядовитых видов.

4 группа. Эта группа представлена граминоидами иrudеральными видами. Виды, вошедшие в группу, являются травянистыми растениями, с привлекательными листьями, что позволяет причислить их к оказывающим высокий вклад в рекреационные услуги.

Кластерный анализ позволяет охарактеризовать эстетические и рекреационные услуги лесопарка «Лебяжье» через видовой состав растений, произрастающих на его территории. На эстетические услуги влияют красивоцветущие травы и кустарники с ранней фенологией, для кустарников также важна привлекательность плодов и листьев. Для рекреационных услуг важна четко выраженная ярусность сообщества, в котором наибольший вклад будут иметь представители древесного, полукустарникового и травянистого яруса.

4.5. Комплексная оценка стоимости экосистемных услуг Раифского лесничества ВКГПБЗ

Оценка экономической ценности ООПТ, помимо решения прочих задач, позволяет продемонстрировать обоснованность инвестиций в воспроизводство и охрану природных ресурсов и во многих случаях доказать, что сохранение природы экономически более выгодно, чем другие виды природопользования. Для исследования было взято 647 геоботанических описаний, сделанных в Раифском лесничестве ВКГПБЗ. Исследуемые площади принадлежат к сосновой, березовой и липовой формациям.

На исследуемой территории заповедника проведена комплексная оценка экосистемных услуг. Всего в расчетах участвовало 50 кварталов заповедника общей площадью 1449 га. Использовались медианные значения стоимости экосистемных услуг в денежном эквиваленте на 1 га в год. Наименьшая стоимость климаторегулирующих услуг – 40215 руб. Наибольшая стоимость зафиксирована для почвозащитной (2240550 руб.) и стабилизационной услуг (1487955 руб.). Другие виды экосистемных услуг характеризуются следующей стоимостью: водорегулирующая – 137880 руб., ассимиляционная – 91920 руб., биопродукционная – 82728 руб., биоресурсная – 195330 руб., сохранения биоразнообразия – 137655 руб.

Было сделано предположение, что детальный учет присутствия редких и охраняемых видов с одной стороны и наличиеrudеральных видов с другой стороны, существенно повлияет на результаты оценки экосистемных услуг. С целью получить более достоверные оценки введены поправочные коэффициенты. При расчете коэффициента, основываясь на данных эколого-ценотического состава, были использованы значения долей, встречающихся лесных иrudеральных видов. Вклад редких видов рассчитывался на основе данных по категориям охраняемых видов растений, встречающихся на исследуемой территории. В соответствии с категорией редкости, каждому редкому виду был присвоен соответствующий коэффициент.

Окончательный вариант поправочного коэффициента выглядел следующим образом:

$$\text{ПК} = \mathcal{E} + \text{ДЛ} - \text{ДР} + 0.4 * K_4 + 0.6 * K_3 + 0.8 * K_2 + 1 * K_1$$

где ПК – поправочный коэффициент; \mathcal{E} – коэффициент экспертной стоимости (= 1); ДЛ – доля лесных видов; ДР – доляrudеральных видов; K_4 – количество видов категории редкости 4; K_3 –

количество видов для категории редкости 3; K_2 – количество видов для категории редкости 2; K_1 – количество видов для категории редкости 1.

Использование поправочного коэффициента позволило получить более высокие значения стоимости услуги по сравнению с использованием данных только по площади кварталов (Рисунок 3). Для ряда кварталов (кв. 24, 26) стоимость с поправочным коэффициентом оказалась ниже, чем при расчете только через площадь. Это связано с высокой долей рудеральных видов и небольшим числом редких видов.

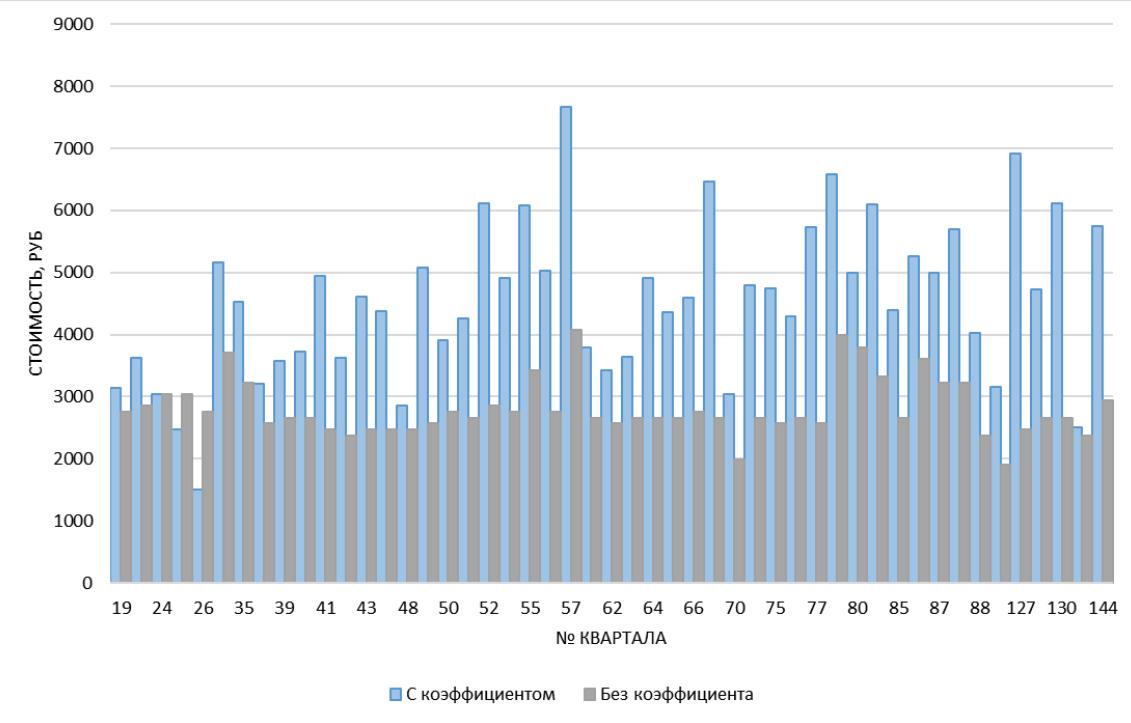


Рисунок 3 – Стоимость экосистемных услуг по сохранению биоразнообразия.

Для кварталов 41, 49, 52, 67, 77, 127, 130, 144 стоимость экосистемной услуги по сохранению биоразнообразия увеличилась более чем в два раза. Для остальных кварталов отмечено увеличение стоимости услуги в 1.5-1.9 раз. На увеличение стоимости экосистемных услуг в большей мере повлияло включение в оценку редких и охраняемых видов. Несмотря на заповедную территорию, экосистемы подвергаются постоянному антропогенному воздействию, отсюда и высокая доля рудеральных видов, что также оказывает влияние на стоимость экосистемных услуг.

ВЫВОДЫ

1. Функциональный подход, связывает многочисленные аспекты биоразнообразия с доставкой экосистемных услуг. Между биоразнообразием, качеством и количеством экосистемных услуг существует устойчивая связь. Вклад видового разнообразия в экосистемные услуги можно охарактеризовать через функциональные параметры растений. Анализ функциональных признаков растений как особых отличительных свойств различных экологических группировок в структуре видового состава сообщества является надежным инструментом определения и оценки генерируемых экосистемных услуг.
2. Предположение о наличии связи между биоразнообразием сообщества и его продуктивностью подтверждается примененным алгоритмом, в основе которого лежит информация, получаемая при геоботанических описаниях на пробных площадях стандартного размера, статистической моделью, учитывающей видовой состав и функциональное разнообразие сообществ, и применением кластерного анализа.
3. Положительная связь биомассы луговых сообществ со средневзвешенными значениями (CWM) признаков LA и SLA статистически значима. Показано, что луговые сообщества, растения которых характеризуются крупными листьями с высокими средневзвешенными

значениями (CWM) площади и удельной площади на единицу массы листа, являются максимально продуктивными.

4. Величина биомассы сменно-доминантных и полидоминантных луговых сообществ зависит как от видового и функционального разнообразия, так и от характера и интенсивности антропогенного воздействия. Минимальные значения биомассы отмечаются для злаково-разнотравных пастбищных лугов с интенсивным выпасом ($66 \text{ г}/\text{м}^2$), максимальные значения для разнотравных лугов, зарастающих лесом ($414 \text{ г}/\text{м}^2$).

5. Классификации, опирающиеся на видовые списки и показатели проективного покрытия видов, привносят компоненту биоразнообразия в дальнейшую оценку продуктивности сообществ. Для оценки производственных услуг луговых экосистем наряду с использованием показателей обилия функциональных групп растений и отдельных доминантных видов в сообществе успешным и необходимым является применение классификаций растительности и местообитаний.

6. Использование разработанной линейной регрессионной модели позволяет с достаточно высокой степенью достоверности оценить продуктивность луговых сообществ, сходных по видовому составу и принадлежащих к одним классификационным категориям, без непосредственного сбора данных о продукцируемой биомассе. Получаемые прогнозные значения достоверно сравнимы со значениями фактически собранной биомассы.

7. Способ учета показателей видового разнообразия в оценке производственных экосистемных услуг и успешного прогноза биомассы отдельных сообществ позволяет опираться только на данные об их видовом составе. При отнесении наблюдаемого сообщества к определенному классу растительности и типу местообитания и при наличии коэффициентов, отражающих обилие функциональных групп видов, образующих сообщество, возможна масштабная оценка производственного потенциала растительного покрова территорий при планировании сценариев природопользования.

8. Наибольший вклад в эстетические услуги оказывают красivoцветущие травы и кустарники с ранней фенологией, для кустарников также важна привлекательность плодов и листьев. На рекреационные услуги влияет жизненная форма растения и его высота. Для рекреационных услуг важна четко выраженная ярусность сообщества, в котором наибольший вклад будут иметь представители древесного и травяно-кустарничкового яруса.

9. Учет видового состава на обследованной территории Раифского лесничества ВКГПБЗ позволил провести объективную оценку оказываемых экосистемных услуг. Предложенный поправочный коэффициент включает данные о доле лесных и редких, охраняемых видов, повышающих, иrudеральных видов, понижающих качество оказываемых экосистемных услуг. Применение поправочного коэффициента, позволило получить более точные значения стоимости экосистемных услуг по сохранению биоразнообразия. Применение использованного метода поправочных коэффициентов может быть рекомендовано для использования в практике эколого-экономической оценки видового разнообразия лесных территорий.

Научные статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus/ Web of Science:

1. Sautkin I.S., Rogova T.V. Functional approach in estimation of cultural ecosystem services of recreational areas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V.107. №.1. – Номер статьи 012091 (5 с.). doi: 10.1088/1755-1315/107/1/012091

2. Sautkin I.S., Rogova T.V., Shaykhutdinova G.A. The use of functional plant leaves traits in the production ecosystem services assessment of grassland communities // Caspian Journal of Environmental Sciences. – 2021. - V.19 (4). - P.731–738. DOI: 10.22124/cjes.2021.5147

Научные статьи в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования (ВАК, Scopus / Web of Science):

3. Рогова Т.В., Сауткин И.С., Шайхутдинова Г.А., Чижикова Н.А. Использование показателей видового разнообразия в прогнозе биомассы луговых экосистем // Сибирский экологический журнал (*англ. Contemporary Problems of Ecology). – 2021. – Т.28. №5. – С.603-612. doi: 10.15372/SEJ20210509

4. Рогова Т.В., Сауткин И.С., Шайхутдинова Г.А. Проверка гипотез зависимости продуктивности растительных сообществ от видового и функционального разнообразия // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки / Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki. – 2022. – Т.164. Кн.1. – С.76-93. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.76-93

Научные статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (ВАК):

5. Сауткин И.С., Рогова Т.В. Вариабельность функциональных признаков листьев некоторых видов луговых растений // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – №1 (29). – С.4-14. doi: 10.24852/2411-7374.2022.1.4.14

В прочих научных изданиях:

6. Сауткин И.С., Рогова Т.В. Опыт оценки экосистемных услуг по показателям видового разнообразия и продуктивности на примере экосистем Раифского участка Волжско-Камского биосферного заповедника // Труды Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника: сборник научных статей. Вып. 7 / под общ.ред. О.В. Бакина и Ю.А. Горшкова. - Казань: Фолиант, 2016. - С.307-315.

7. Сауткин И.С., Рогова Т.В. Опыт оценки экосистемных услуг по показателям видового разнообразия и продуктивности экосистем Раифского лесничества // Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги: тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящ. 60-летию Института леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г.). - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. – С.264-266.

8. Sautkin I., Rogova T. Experience in evaluation of ecosystem services based on species diversity and ecosystem productivity of protected Raifa forest ecosystems // Vegetation patterns in natural and cultural landscapes: The 60th IA VS annual symposium (June 20-24, 2017, Palermo). Abstract books. – Palermo:Presso la ditta Fotographs.r.l, 2017. - P.308.

9. Сауткин И.С., Рогова Т.В. Функциональный подход в оценке социокультурных экосистемных услуг на примере лесопарка «Лебяжье» // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века. Труды III международной конференции

(27-29 сентября 2017 г., Казань) / под ред. С.Ю. Селивановской и М.В. Кожевниковой. — Казань: Изд-во АН РТ, 2017. — С. 555-558.

10. Сауткин И.С. Оценка первичной продукции и экосистемных услуг по функциональным признакам растений // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» / отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов [Электронный ресурс]. — М.: МАКС Пресс, 2018. - URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2018/data/12727/77850_uid251202_report.pdf (дата обращения: 27.12.2021)

11. Сауткин И.С., Миргалиева Л.Р. Вклад функционального разнообразия растений в чистую первичную продукцию сообщества // Материалы докладов III Всероссийской (XVIII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» (Сыктывкар, 12–16 марта 2018 г.). В 2 т. Т.1. Направление: биологические науки (XXV Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы биологии и экологии»). Направление: физиология человека и животных («Физиология человека и животных: от эксперимента к клинической практике»). Направление: медицина и здравоохранение («Здоровье человека на Севере»). Направление: фундаментальные науки – медицине («Механизмы функционирования висцеральных систем»). — Сыктывкар: Редакционно-издательский отдел ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2018. - С.54-56.

12. Карпов М.В., Сауткин И.С., Рогова Т.В. Удельная площадь листьев (SLA) как показатель функционального состояния экосистем // Информационные технологии в исследовании биоразнообразия: материалы III Национальной научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика РАН П.Л. Горчаковского (Екатеринбург, 5-10 октября 2020 г.). — Екатеринбург: Гуманитарный университет, 2020. – С.264–267.

13. Rogova T., Sautkin I., Shaykhutdinova G. Species and functional diversity dynamics of hay and pasture meadows in protected areas // 29th Conference of European Vegetation Survey: Revegetating Europe – Contributions of the EVS to the UN Decade on Ecosystem Restoration (Online conference, 6–7 September 2021). Abstracts. – Belgium: International Association for Vegetation Science, 2021. - P.53.