

Использование показателей видового разнообразия в прогнозе биомассы луговых экосистем

Т. В. РОГОВА, И. С. САУТКИН, Г. А. ШАЙХУТДИНОВА, Н. А. ЧИЖИКОВА

Казанский федеральный университет
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18
E-mail: Tatiana.Rogova@kpfu.ru

Статья поступила 08.12.2020

После доработки 21.12.2020

Принята к печати 23.12.2020

АННОТАЦИЯ

Оценка и достоверный прогноз продуктивности луговых сообществ во многом определяются подходами и применяемыми методами. Использование информации о видовом составе растительного сообщества и его функциональной структуре при определении производимой первичной продукции расширяет возможности применения современных информационных баз геоботанических данных. Выделение в составе луговых сообществ сенокосов и пастбищ практически значимых функциональных групп видов (граминоиды, разнотравье, бобовые) и определение видов доминантов позволяют включать показатели биологического разнообразия в процедуру оценки продуктивности сельскохозяйственных угодий. Обсуждается опыт прогнозирования величины надземной фитомассы луговых экосистем с использованием данных о функциональном составе и проективном покрытии видов. Проведенный кластерный анализ подтверждает предположение о наличии связи между биоразнообразием сообщества и его продуктивностью. Опираясь на основные положения гипотезы доминирования, 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. Прогнозная статистическая модель построена на основе обработки экспериментальных данных, полученных с 32 пробных геоботанических площадей. Модель показывает связь величины прогнозируемой для сообщества биомассы с обилием основных функциональных групп растений, характером использования и результатом отнесения сообщества к классификационным категориям систем EVC и EUNIS. Примененные классификации, опирающиеся на видовые списки и показатели проективного покрытия видов, приносят компоненту биоразнообразия в дальнейшую оценку продуктивности сообществ. Использование разработанной линейной регрессионной модели дает возможность 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. Модель позволяет учитывать вклад видового состава растений в предоставление продукционных экосистемных услуг, обеспечивая разработку доступного приема их оценки.

Ключевые слова: луговые экосистемы, функциональное разнообразие, надземная фитомасса, статистическая модель, EUNIS, EVC, ординация сообществ, продукционные экосистемные услуги.

Характер связи показателей видового и функционального богатства растений и продуктивности экосистем является предметом оживленных дискуссий [Gross, Cardinale, 2007; Fraser et al., 2015; Sonkoly et al., 2019]. Обсуждается, что снижение уровня биоразнообразия может вызвать нарушение экосистемных процессов и уменьшить производство

растительной биомассы, что негативно влияет на функционирование экосистем и их способность предоставлять экологические услуги [Loreau, Hector, 2001].

Среди гипотез, объясняющих взаимоотношения видового разнообразия и свойств экосистем, наиболее популярна “гипотеза доминирования”, которая утверждает, что свойства доминирующих видов определяют свойства экосистем, в том числе и скорость производства биомассы, проявляя так называемый “эффект отношения масс” (“mass ratio effect”) [Grime, 1998]. Согласно гипотезе доминирования функциональные признаки локально обильных видов определяют экосистемные процессы в масштабе времени, когда состав сообщества не изменяется. Способы группирования видов, показывающих сходный эффект влияния на экосистемные процессы, описывает концепция “функциональных групп” (“functional groups”) растений [Garnier et al., 2016]. Концепция подразумевает, что виды одной функциональной группы равны в их воздействии на экосистемные процессы, и даже если некоторые виды будут утрачены сообществом, это не окажет значительного влияния на экосистемные свойства, пока каждая функциональная группа остается представленной в фитоценозе. Функциональное разнообразие экосистем определяется как обилие и разнообразие функциональных групп, выделенных на основе различий между видами по жизненной форме, морфологии или стратегии получения ресурсов.

В большинстве исследований связей видового и функционального богатства растений с продуктивностью экосистем в качестве модельных объектов выбираются фитоценозы луговых экосистем. Все типы травянистых экосистем являются важнейшим источником получения кормовых ресурсов для отраслей животноводства, а также имеют высокую биосферную ценность, поскольку вносят значительный вклад в производство первичной биомассы и играют важную роль в биохимических циклах [Guo et al., 2005]. Луговые экосистемы умеренного климата, обязанные своим происхождением хозяйственной деятельностью человека, постоянно испытывают быстрые и значительные изменения в составе, характере, структуре и размере занимаемой площади при использовании в качестве сенокосно-паст-

бищных угодий. Наряду с климатическими изменениями это сильно влияет на устойчивость их функционирования.

Значимой экосистемной услугой, предоставляемой лугами, является продукционная, обеспечивающая потребности людей материальными благами и ресурсами [МЕА, 2005]. Качество предоставления услуг оценивается величиной чистой первичной продукции экосистем. При этом одним из наиболее важных оцениваемых показателей является величина надземной биомассы [Todd et al., 1998; Cho et al., 2007; Shen et al., 2008; Mundava et al., 2014]. Мониторинг надземной биомассы проводят двумя основными способами: наземными полевыми учетами и при помощи дистанционного зондирования. Наземные методы традиционно связаны с укосами биомассы на репрезентативном количестве пробных площадей, сушкой и взвешиванием в лаборатории. Этот подход требует много времени и затрат, от чего подходит только для крупномасштабного мониторинга. Методы дистанционного зондирования становятся в настоящее время все более доступными. Обладая преимуществом покрытия крупных площадей, они, однако, не позволяют оценить видовое разнообразие, что ограничивает возможности оценки экосистемных услуг.

Опираясь на основные положения гипотезы доминирования, 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.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные геоботанических описаний 32 пробных площадей площадью 100 м² (табл. 1). Описания выполнены по стандартной методике [Воронов, 1973] с указанием видового состава и характеристики обилия видов по шкале Друде. Для формирования эмпирической обучающей выборки на десяти из исследованных пробных площадей в пике вегетационных сезонов 2017–2019 гг. проведен учет надземной фитомассы – на каждой заложено по 10 площадок площадью 0,25 м²

Т а б л и ц а 1
Характеристика экспериментальных данных и результаты прогноза биомассы

№ п/п	Код описания	Муниципальный район	Характер и интенсивность использования	Категория EUNIS	Класс EVC	Средняя фактическая биомасса, г/м ²	Диапазон значений биомассы, г/м ²	Прогнозное значение биомассы, г/м ²
1	Ra_1	Зеленодольский	Неиспользуемый	E22	MOL	103,57	34–142	99,73
2	Kaz_1		Умеренное сенокосное	E22	MOL	59,71	34–142	63,56
3	Kaz_2		Интенсивное пастбищное	E	MOL	27,84	4–48	26,81
4	Kaz_3		»	E	MOL	16,64	4–48	20,2
5	Kaz_4		»	E22	FES	23,22	13–67	23,46
6	Kaz_5		Неиспользуемый	IE51	ART	26,81	12–65	24,28
7	RybSI_1	Рыбно-Слободский	Умеренное пастбищное	IE51	FES	76,09	45–115	74,94
8	RybSI_2		»	IE51	FES	70,66	45–115	71,82
9	RybSI_3		Интенсивное пастбищное	E22	FES	33,16	13–67	32,92
10	RybSI_4		»	IE51	ART	39,73	12–65	38,91
11	Ra_2	Зеленодольский	Неиспользуемый	E22	MOL	–	34–142	105,54
12	Ra_3		Умеренное сенокосное	E22	MOL	–	34–142	76,58
13	Ra_4		»	E22	MOL	–	34–142	76,30
14	Ra_5		»	E22	MOL	–	34–142	91,67
15	Ra_6		»	E22	MOL	–	34–142	118,25
16	NKam_1	Елабужский	Неиспользуемый	IE51	MOL	–	–	109,89
17	NKam_2		»	IE51	FES	–	45–115	108,17
18	NKam_3		»	IE51	FES	–	45–115	114,64
19	NKam_4		»	IE51	ART	–	12–65	40,80
20	NKam_5		»	IE51	ART	–	12–65	75,35
21	NKam_6		Интенсивное пастбищное	E22	FES	–	13–67	96,80
22	Kaz_6	Зеленодольский	Умеренное сенокосное	E22	MOL	–	34–142	80,72
23	Kaz_7		»	E22	MOL	–	34–142	80,28
24	Kaz_8		»	E22	MOL	–	34–142	75,11
25	Kaz_9		»	E22	MOL	–	34–142	84,37
26	Kaz_10		»	E22	MOL	–	34–142	68,69
27	Kaz_11		Интенсивное пастбищное	E	MOL	–	4–48	43,71
28	Kaz_12		»	IE51	FES	–	45–115	66,49
29	RybSI_5	Рыбно-Слободский	Умеренное пастбищное	IE51	FES	–	45–115	80,21
30	RybSI_6		Интенсивное пастбищное	IE51	FES	–	45–115	64,44
31	MelTa_1	Муслумовский	»	IE51	FES	–	45–115	52,12
32	MelTa_2		»	IE51	ART	–	12–65	34,91

Примечание. В колонке «Средняя фактическая биомасса» для первых 10 площадей показаны эмпирические значения биомассы, полученной с помощью укосов на пробных площадях. В колонке «Диапазон значений биомассы» приведены допустимые минимальные и максимальные значения биомассы, определенные по эмпирическим значениям схожих по классу растительности и типу местообитания сообществ; диапазоны используются для оценки качества прогноза биомассы.

каждая, где выполнены сплошные укосы и проведена оценка проективного покрытия видов в процентах. По величине проективного покрытия в собранной фитомассе выделены виды-доминанты и фракции, соответствующие основным функциональным группам луговых видов умеренного пояса: граминоиды (виды семейств Poaceae, Cyperaceae), бобовые (роды *Lathyrus*, *Lotus*, *Medicago*, *Trifolium*, *Vicia*) и разнотравье. В группу разнотравья вошли все виды, характеризующиеся невысоким индивидуальным вкладом в общую биомассу. Полученная биомасса была высушена и взвешена на лабораторных весах.

Местоположения пробных площадей охватывают широкий спектр природных и антропогенных условий функционирования луговых участков. Рассматриваются вторичные луга, сформировавшиеся на месте подтаежных хвойно-широколиственных лесов (Зеленодольский и Елабужский муниципальные районы Республики Татарстан), широколиственных лесов (Рыбно-Слободский район) и лесостепи (Муслюмовский район). В отношении антропогенной нагрузки исследуемые луговые сообщества выстраиваются в градиент от не используемых в настоящее время, зарастающих сенокосов в границах Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ) и Национального парка «Нижняя Кама», к действующим сенокосам и пастбищным лугам. Для сенокосов и пастбищ экспертно определена степень интенсивности их использования: высокая – для пастбищ с заметным перевыпасом, средняя – для сенокосов и пастбищ с контролируемым выпасом (см. табл. 1).

Исследованные луговые сообщества были классифицированы при помощи программного обеспечения JUICE v7.0 [Tichý, 2002] и отнесены к синтаксонам уровня класса растительности системы Браун-Бланке (EVC), а также к типам местообитаний системы EUNIS Habitat Classification [Davies et al., 2004]. По итогам классификации все рассматриваемые луговые сообщества отнесены к трем 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). По типам местообитаний исследуемые луга разделились на категории:

E22 – сенокосные луга на низких и средних высотах; IE51 – антропогенные травяные сообщества. Местообитания трех площадей не удалось классифицировать далее основного типа E – травяные сообщества.

Статистическая обработка данных и построение модели выполнены в программной среде R [Team R, 2018].

Для выявления связи величины биомассы с типом местообитания, классом растительности и интенсивностью использования проведен кластерный анализ и выполнена ординация сообществ методом главных компонент (Principal component analysis). Кластерный анализ проводился по алгоритму Варда (Ward), в качестве метрики сходства использовалось евклидово расстояние [Murtagh et al., 2014].

Для прогнозирования биомассы использовался регрессионный анализ – построение линейной модели с использованием в качестве обучающей выборки данных, полученных эмпирически. В качестве скалярных независимых переменных использовались данные проективного покрытия видов-доминантов и видов функциональных групп, в качестве факторов – принадлежность сообщества к конкретному классу растительности и типу местообитания. Сходство между эмпирической и предсказанной биомассой определялось посредством *t*-критерия Стьюдента. Для оценки качества модель была подвергнута перекрестной проверке (leave-one-out cross-validation).

Построенная статистическая модель использована для прогноза надземной биомассы 22 пробных площадей, для которых известны только видовой состав и обилие видов. Результаты прогноза экспертно оценены путем сравнения с диапазоном значений фактической биомассы сходных по классу растительности и типу местообитания сообществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Усредненные эмпирические данные величины биомассы для площадей обучающей выборки представлены в десяти первых строках табл. 1. По характеру использования данные луговые сообщества варьируют от участков, бывших сенокосами и постепенно зарастающих лесом из-за изменения структуры землепользования в районе расположения Волжско-Камского заповедника (площадка Ra_1),

до интенсивно используемых пастбищ частных фермерских хозяйств Зеленодольского и Рыбно-Слободского районов республики. Распределение фактических значений величины надземной биомассы показано на рис. 1.

Наибольшая биомасса отмечается в условиях отсутствия сенокосной нагрузки на зарастающем лугу, расположенном на территории заповедника (площадка Ra_1). Высокая продуктивность обеспечивается видовым составом с высокой долей разнотравья, которое оказывает наиболее заметный вклад в величину общей биомассы (рис. 2).

В категорию наименее продуктивных предсказуемо попадают пастбищные луга с интенсивным выпасом (выгоны Kaz_3, Kaz_4, RybSl_3). Это полностью объясняется сценарием их использования, предусматривающим

постоянное изъятие биомассы в течение всего сезона вегетации. Наиболее показательна выборка площадей Рыбно-Слободского района, где относительно высокие значения биомассы получены для пастбищ, выпас на которых только начался и проходит умеренно (RybSl_1, RybSl_2), тогда как на пастбищах, где выпас идет интенсивно и в течение более длительного времени, биомасса значительно ниже (RybSl_3). По величине биомассы сенокосные луга примерно сопоставимы с умеренно эксплуатируемыми пастбищами. В целом, биомасса луговых сообществ выстраивается вдоль градиента антропогенной нагрузки: от зарастающих лугов к пастбищам (см. рис. 1).

Участки Рыбно-Слободского района, расположенные южнее других, также показывают вклад природных условий: доля грамино-

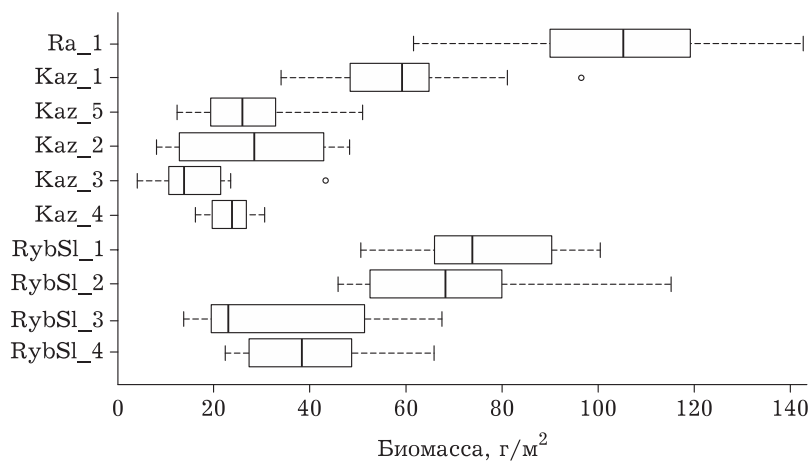


Рис. 1. Распределение величины общей сухой биомассы, учтенной на пробных площадях эмпирической выборки

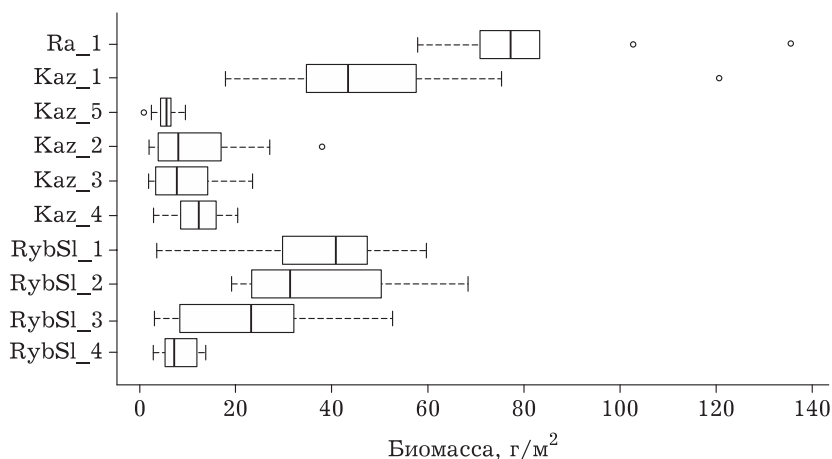


Рис. 2. Распределение величины сухой биомассы разнотравья на пробных площадях эмпирической выборки

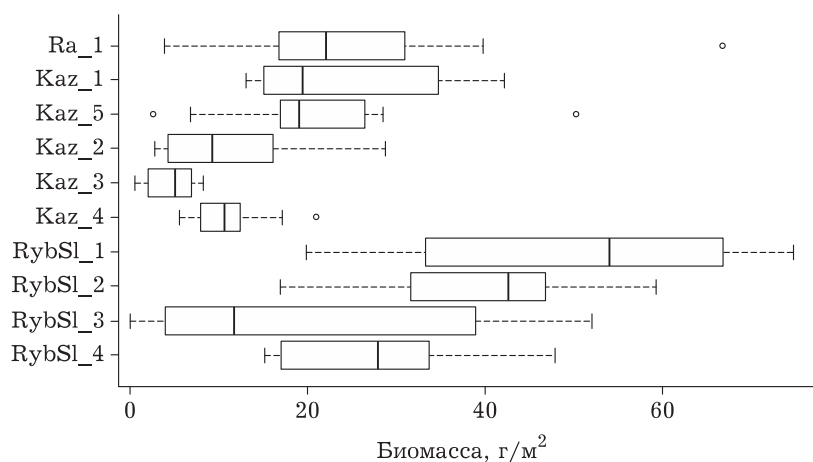


Рис. 3. Распределение величины сухой биомассы граминоидов на пробных площадях эмпирической выборки

идов в биомассе значительна в основном при всех вариантах использования, но при этом очень высока величина дисперсии значений (рис. 3).

Рисунок 4 показывает, как распределение биомассы связано с классификационным статусом сообществ эмпирической выборки, представленных тремя классами EVC и принадлежащих к местообитаниям E, E22 и IE51 типов системы EUNIS.

На рис. 5 приведены результаты кластерного анализа сообществ на ординационной плоскости. Ординация методом главных компонент проводилась по четырем осям: трем факторам и одной скалярной переменной. В качестве скалярной переменной выступила величина биомассы, а к факторам отнесены:

- сценарий использования площадей (Scen), т.е. ряд “неиспользуемые > умеренно используемые > интенсивно используемые” луга;

- класс растительности (EVC), ряд “MOL > FES > ART”;

- тип местообитания (EUNIS), ряд “E > E22 > IE51”.

Кластерный анализ выполнен для выявления связи продуктивности луговых сообществ с видовым и функциональным составом, определяющим принадлежность к определенным классам растительности и типам местообитаний. Определены три кластера, которые расположились в соответствии с величиной биомассы и сценарием использования сообществ. Кластеру, расположенному в левом верхнем углу ординационной плоскости, соответствуют наиболее продуктивные, зарастающие луга классов MOL и FES. Средний кластер – 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

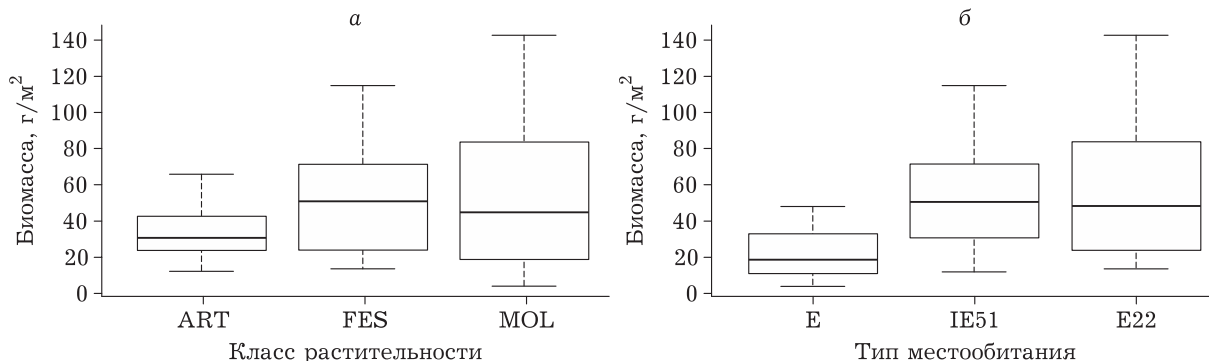


Рис. 4. Распределение биомассы по категориям классификаций EVC и EUNIS

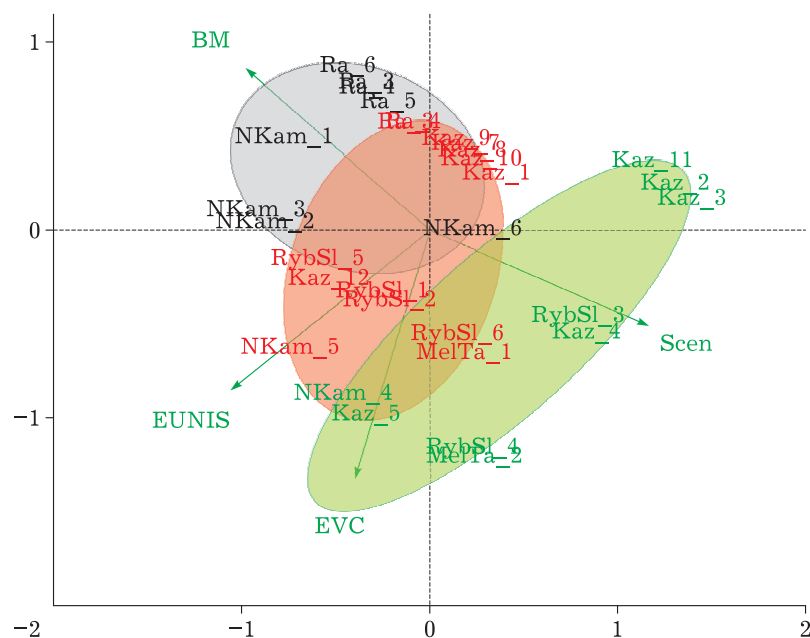


Рис. 5. Ординационная плоскость в осях двух главных компонент
Разным цветом выделены основные кластеры сообществ; кодировка площадей: Ra – Волжско-Камский заповедник, NKam – нацпарк “Нижняя Кама”, Kaz – окрестности г. Казани (Зеленодольский район), RybSl – окрестности пос. Рыбная Слобода, MelTa – окрестности н. п. Мелля-Тамак (Муслюмовский район)

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 (векторы BM и Scen).

Используя все полученные фактические данные площадей эмпирической выборки, разработана линейная регрессионная модель, позволяющая оценить биомассу BM (г/м^2) у схожих сообществ без необходимости ее сбора:

$$\text{BM} = \alpha + \beta_1 \text{A_Gram} + \beta_2 \text{A_Leg} + \beta_3 \text{A_Dom} + \beta_4 \text{I}(\text{EUNIS} = \text{“E22”}) + \beta_5 \text{I}(\text{EUNIS} = \text{“IE51”}) + \beta_6 \text{I}(\text{EVC} = \text{“FES”}) + \beta_7 \text{I}(\text{EVC} = \text{“MOL”}),$$

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_Leg и доминантных видов разнотравья A_Dom; I() – обозначение индикаторной функции, которая принимает значение 1 в случае, если условие выполняется, иначе имеет 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 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
Регрессионные коэффициенты модели оценки биомассы

Коэффициент	Значение	Наблюдаемый уровень значимости t -критерия
α	-58,5	<0,001
β_1	0,3	<0,001
β_2	0,3	<0,01
β_3	0,4	<0,001
β_4	34,1	<0,001
β_5	66,1	<0,001
β_6	29,1	<0,001
β_7	62,6	<0,001

ОБСУЖДЕНИЕ

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 – 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 22 пробных площадей с аналогичными типами местообитаний и классами растительности, для которых были установлены диапазоны значений исходных независимых переменных. Полученные результаты прогноза приводятся в табл. 1. Спрогнозированные значения оказались сравнимы с фактическими данными по биомассе схожих классов растительности и типов местообитаний. Предсказанные значения биомассы лишь для двух площадей, заложенных на территории национального парка “Нижняя Кама” (NKam_5,

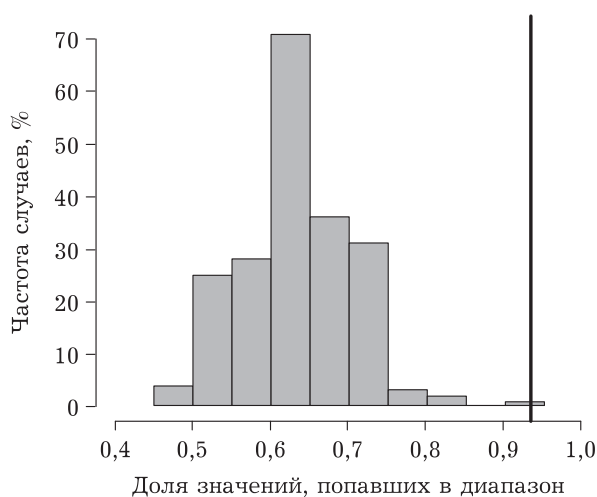


Рис 6. Гистограмма, показывающая частоту случаев и долю предсказанных моделью значений, попавших в искусственно созданные диапазоны.

Вертикальная линия обозначает долю предсказанных моделью значений (0,93), попавших в диапазоны фактически измеренных значений биомассы

NKam_6), не попали в диапазоны фактических значений. 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. Цель проверки заключается в установлении влияния фактора случайности, является ли такой высокий результат попаданий в интервалы случайным или нет? В качестве проверяемой гипотезы мы принимаем утверждение, что фактические диапазоны значений биомассы абсолютно не случайны и имеют под собой обоснование, заключающееся в том, что различные луга различаются между собой по видовому составу, типу местообитания, классу растительности, сценарию использования и продуктивности. Предсказанные значения биомассы в таком случае будут попадать именно в те диапазоны значений, которые соответствуют исходным данным модели. В том случае, если предсказанные данные попадают в искусственные интервалы с вероятностью, приближенной к результатам модели, считается, что модель в своем предсказании оперирует больше фактором случайности, чем взаимосвязями между фактически измеренными данными. На рис. 6 приводится результат проверки.

Проверка показала, что результат, приближенный к модели (больше 90 % предсказанных значений), получен в 1 % случаев генерации интервалов, тогда как в 70 % случаев в сгенерированные интервалы попадает 60 % предсказанных значений. Можно утверждать, что доля предсказанных значений, попавших в искусственные диапазоны, всегда меньше той, что получена с помощью модели. Соответственно, наша гипотеза подтверждает, что фактические диапазоны значений биомассы не случайны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка подходов к использованию показателей биоразнообразия в экспресс-оценке экосистемных услуг и, в частности, продукционных является одной из первостепенных

задач изучения луговых экосистем. Учитывая, что для оценки качества продукционных услуг необходимы данные о продуктивности и запасах биомассы, сбор которых сопряжен с различными трудностями и не всегда возможен, предложен алгоритм, в основе которого лежит информация, получаемая при геоботанических описаниях на пробных площадях стандартного размера, и статистическая модель, учитывающая видовой состав и функциональное разнообразие сообществ. Проведенный кластерный анализ подтверждает предположение о наличии связи между биоразнообразием сообщества и его продуктивностью.

Для оценки продукционных услуг луговых экосистем успешным и необходимым наряду с использованием показателей обилия функциональных групп растений и отдельных доминантных видов в сообществе является применение классификаций растительности EVC и местообитаний EUNIS. Классификации EVC и EUNIS, опирающиеся на видовые списки и показатели проективного покрытия видов, приносят компоненту биоразнообразия в дальнейшую оценку продуктивности сообществ. Разработанная линейная регрессионная модель 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. Знание о том, что классификационные характеристики EUNIS и EVC во многом определяют характер продуктивности луговых сообществ, позволяют более точно прогнозировать имеющиеся запасы биомассы во многих растительных сообществах, по которым имеются сведения об их видовом составе. Получаемые прогнозные значения достоверно сравнимы со значениями фактически собранной биомассы.

Таким образом, в исследовании найден способ учета показателей видового разнообразия как в оценке продукционных экосистемных услуг, так и в успешном прогнозе биомассы отдельных сообществ, опираясь 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 продукционного потенциала растительного покрова территорий при планировании сценариев природопользования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта 18-44-16002.

ЛИТЕРАТУРА

- Воронов А. Г. Геоботаника: учеб. пособие для биол. и геогр. специальностей ун-тов и педагогич. ин-тов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1973. 384 с.
- Cho M. A., Skidmore A., Corsi F., van Wieren S. E., Sobhan I. Estimation of green grass/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices and partial least squares regression // *Int. J. Appl. Earth Observat. and Geoinform.* 2007. T. 9, № 4. P. 414–424.
- Davies C. E., Moss D., Hill M. O. EUNIS habitat classification revised 2004 // Report to: European Environment Agency-European Topic Centre on Nature Protection and Biodiversity, 2004. P. 127–143.
- Fraser L. H., Pither J., Jentsch A., Sternberg M., Zobel M., Askarizadeh D., Bartha S., Beierkuhnlein C., Bennett J. A., Bittel A., Boldgiv B., Boldrini I. I., Bork E., Brown L., Cabido M., Cahill J., Carlyle C. N., Camptella G., Chelli S., Cohen O., Csergo A.-M., Díaz S., Enrico L., Ensing D., Fidelis A., Fridley J. D., Foster B., Garris H., Goheen J. R., Henry H. A. L., Hohn M., Jouri M. H., Klironomos J., Koorem K., Lawrence-Lodge R., Long R., Manning P., Mitchell R., Moora M., Müller S. C., Nabinger C., Naseri K., Overbeck G. E., Palmer T. M., Parsons S., Pesek M., Pillar V. D., Pringle R. M., Roccaforte K., Schmidt A., Shang Z., Stahlmann R., Stotz G. C., Sugiyama S., Szentes S., Thompson D., Tungalak R., Undrakhbold S., van Rooyen M., Wellstein C., Wilson J. B., Zupo T. Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness // *Science*. 2015. T. 349, N 6245. P. 302–305.
- Garnier E., Navas M.-L., Grigulis K. Plant Functional Diversity – Organism traits, community structure, and ecosystem properties. Oxford, UK: Oxford University Press, 2016. 256 p.
- Grime J.P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects // *J. Ecol.* 1998. Vol. 86, N 6. P. 902–910.
- Gross K., Cardinale B. J. Does species richness drive community production or vice versa? Reconciling historical and contemporary paradigms in competitive communities // *The American Naturalist*. 2007. Vol. 170, N 2. P. 207–220.
- Guo X., Zhang C., Wilmshurst J. F., Sissons R. Monitoring grassland health with remote sensing approaches // *Prairie Perspectives*. 2005. T. 8. P. 11–22.
- Loreau M., Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments // *Nature*. 2001. Vol. 412, N 6842. P. 72–76.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being // *Synthesis*. 2005. 155 p.
- Mundava C., Helmholtz P., Schut T., Corner R., McAtee B., Lamb D. Evaluation of vegetation indices for rangeland biomass estimation in the Kimberley area of Western Australia // *ISPRS Annals of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-7. P. 47–53.
- Murtagh F., Legendre P. Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement Ward's criterion? // *J. Classificat.* 2014. Vol. 31, N 3. P. 274–295.
- Shen M., Tang Y., Klein J., Zhang P., Gu S., Shimono A., Chen J. Estimation of aboveground biomass using in situ hyperspectral measurements in five major grassland ecosystems on the Tibetan Plateau // *J. Plant Ecol.* 2008. Vol. 1, N 4. P. 247–257.
- Sonkoly J., Kelemen A., Valkó O., Deák B., Kiss R., Tóth K., Miglécz T., Tythmérész B., Török P. Both mass ratio effects and community diversity drive biomass production in a grassland experiment // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9, N 1848. P. 1–10.
- Team R: A language and environment for statistical computing. 2018.
- Tichý L. JUICE, software for vegetation classification // *J. Vegetat. Sci.* 2002. T. 13, № 3. P. 451–453.
- Todd S. W., Hoćer R. M., Milchunas D. G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices // *Int. J. Remote Sensing.* 1998. Vol. 19, N 3. P. 427–438.

Use of species diversity data in meadow ecosystem biomass prediction

T. V. ROGOVA, I. S. SAUTKIN, G. A. SHAYKHUTDINOVA, N. A. CHIZHIKOVA

*Kazan Federal University
420008, Kazan, Kremlyovskaya str., 18
E-mail: Tatiana.Rogova@kpfu.ru*

The assessment and reliable prediction of the productivity of grassland communities are largely determined by the approaches and methods used. The use of information on the species composition of the plant community and its functional structure in determining the primary production expands the possibilities of using modern information databases of geobotanical data. Selection of practically significant functional groups of species (graminoids, motley grasses, legumes) in composition of grassland communities of hayfields and pastures and determination of dominant species allows to include indicators of biodiversity in the procedure of agricultural lands productivity estimation. The experience in predicting the amount of aboveground phytomass of grassland ecosystems using the data on the functional composition and projective cover of species is discussed. The conducted cluster analysis confirms the assumption of the relationship between community biodiversity and its productivity. Based on the main provisions of the dominance hypothesis, by building a statistical linear model, the possibility of predicting the value of aboveground biomass from the data on the species composition of communities and the abundance of the dominant functional groups of plants, which act as universal evaluation criteria, was tested. The predictive statistical model is constructed on the basis of processing of the experimental data received from 32 sample geobotanical areas. The model shows the relationship between the value of the predicted biomass for the community and the abundance of the main functional groups of plants, the way they are used and the result of assigning community to the classification categories of the EVC and EUNIS systems. The applied classifications, based on species lists and indicators of the projective cover of species, bring a component of biodiversity in the further evaluation of community productivity. The use of the developed linear regression model makes it possible to estimate the productivity of grassland communities similar in species composition and belonging to the same classification categories with a sufficiently high degree of reliability without direct collection of data on the produced biomass. The model makes it possible to take into account the contribution of plant species composition to the provision of productive ecosystem services, providing the development of an accessible technique for their evaluation.

Key words: grassland ecosystems, functional diversity, above-ground phytomass, statistical model, EUNIS, EVC, community ordination, productive ecosystem services.