

УДК 577.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ БЕНТОФАУНЫ ОЗЕР РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ МЕТОДОМ РАНГОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ БИОИНДИКАЦИИ КАЧЕСТВА ВОД

Е.А. Забурдаева¹, П.В. Бедова¹, В.Н. Максимов

(кафедра общей экологии; e-mail: Saburdaeva@yandex.ru)

Исследована возможность использования количественных характеристик видового разнообразия бентофауны для целей биоиндикации, полученных в ходе экологического мониторинга озер Республики Марий Эл. Проведен анализ влияния на характеристики разнообразия: 1) погрешностей в подсчете численностей видов зообентоса; 2) метода оценки параметров ранговых распределений; 3) степени адекватности формальной модели распределения; 4) зависимости между характеристикой выравненности разнообразия и видовым богатством; 5) гидрохимического статуса водоема; 6) принадлежности мест проб к особо охраняемым природным территориям. Предложены характеристики разнообразия, адекватные имеющимся данным. Найдена граница между значениями используемых параметров, соответствующих благополучным и неблагополучным состояниям сообществ зообентоса. Сформулированы рекомендации применения характеристик разнообразия для биоиндикации качества вод озер Республики Марий Эл.

Ключевые слова: биоиндикация, индексы разнообразия, параметры ранговых распределений.

Обязательным этапом любой природоохранной деятельности является оценка биоразнообразия. Одним из путей в обосновании выбора тех или иных числовых индексов разнообразия является анализ ранговых распределений численностей видов [1–7]. Ранговое распределение представляет собой преобразованный набор численностей: наиболее обильной группе присваивается первый номер, следующей по численности группе — второй и так далее до наименее обильной группы, которая имеет номер w , совпадающий с общим числом групп в сообществе. Модель рангового распределения представляет собой математическую зависимость численности вида от его ранга. Параметры рангового распределения могут служить числовым выражением наличия или отсутствия нарушений в структуре изучаемых сообществ, так как известно, что распределение видов в сообществе по обилию отражает изменения характера их экологических взаимодействий, которые в свою очередь являются следствием загрязнений и других антропогенных и природных нагрузок [6]. Параметры ранговых распределений обычно менее лабильны, чем иные целостные характеристики сообщества, например общая численность или количество видов. Кроме того, ни общая численность, ни число видов не определяют степени неравномерности распределения.

В данной статье проведен расчет параметров ранговых распределений численностей видов зообентоса на основе данных гидробиологического мониторинга озер Республики Марий Эл.

Материалы и методы

Сбор гидробиологического материала проводился на 19 озерах Республики Марий Эл с мая по сентябрь 2002–2006 гг. по стандартным методикам [7]. Исследуемые озера относятся к двум различным географическим группам — озера Марийского Полесья и озера Вятского Увала. По итогам полевых исследований сформирована база, содержащая данные по видовому составу, абсолютной численности и биомассе зообентоса, а также по характеристикам грунта и растительности (всего 258 проб) [8]. Для 60 створов были измерены температура, прозрачность и глубина. Используемые данные расположены в базе данных информационной системы “Экология пресных вод России и сопредельных стран” (<http://ecograde.belozersky.msu.ru>).

Анализировали экспоненциальную ($n_i = n_1 z^{i-1}$) и гиперболическую ($n_i = n_1 / i^3$) модели рангового распределения, а также индекс разнообразия по доминирующему виду, выраженному через индекс Бергера—Паркера [10] и равному $z_i = 1 - n_1/n$, где n_i — численность вида i -го ранга, n_1 — численность вида первого ранга, $n = \sum_{i=1}^w n_i$ — суммарная численность организмов в сообществе, z и β — параметры моделей.

Расчет параметров осуществляли посредством табличного редактора Microsoft Excel 2000. Для статистической обработки данных использован статистический пакет STATISTICA 6.

¹ Кафедра зоологии и прикладной экологии биолого-химического факультета МарГУ, г. Йошкар-Ола.

Результаты

Предыдущие исследования [10, 11] показали, что этапу приложения характеристик разнообразия к оценке состояния экосистем должна предшествовать многосторонняя методическая проработка инструментов биоиндикации. Необходим выбор: модели ранговых распределений, метода оценки адекватности модели, метода оценки ее параметров. Логика применения параметров ранговых распределений и других индексов разнообразия в качестве биоиндикаторов состоит в интерпретации различий в величине параметров как различий в степени экологического благополучия или неблагополучия природной системы. Однако значения параметров и индексов могут зависеть не только (а может быть, и не столько) от качества среды, но и от целого ряда факторов, не имеющих отношения к экологическому состоянию. Среди них, например: 1) погрешности в подсчете бентосных организмов, особенно редких видов; 2) влияние количества учтенных в пробе видов на параметры ранговых распределений; 3) особенности гидрогеологического и гидрохимического статуса водоема.

Снижение влияния погрешностей, возникающих при подсчете численностей организмов зообентоса. Анализ ранговых распределений с точки зрения статистики [6] показывает, что виды, представленные в пробе менее чем 10 особями, распределены случайно и не могут быть описаны какой-либо закономерной моделью ранговых распределений. Исходя из приведенных соображений, мы решили исключить из каждой пробы виды, представленные менее чем 10 особями. После исключения таких видов для дальнейшего анализа сохранено 237 проб.

О методах оценки параметров модели. В предшествующих работах оценки параметров были проведены методом регрессии для экспоненциальной и гиперболической моделей в линеаризованной с помощью логарифмирования форме $\ln n_i = \ln n_1 + (i - 1) \ln z$; $\ln n_i = \ln n_1 - \beta \ln i$ [10, 11]. Эти предварительные проработки показали, что операция логарифмирования в линеаризованных моделях искажает истинные значения параметров, поэтому дальнейший анализ мы проводили, опираясь на результаты их нелинейного оценивания.

Исследование адекватности модели. Адекватность исследуемых моделей оценена при помощи коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{SS}{D},$$

где SS — сумма квадратов отклонений предсказанных моделью значений от экспериментальных; D — дисперсия экспериментальных численностей.

Далее рассчитывали долю преобладаний случаев, где $R_z^2 - R_\beta^2 > 0$, где $R_z^2 - R_\beta^2 < 0$ и где оба

коэффициента имеют одинаковые значения $R_z^2 - R_\beta^2 = 0$:

$$K_z = \frac{\sum_{i \in M_+} |R_{iz}^2 - R_{i\beta}^2|}{\sum_{i \in M} |R_{iz}^2 - R_{i\beta}^2|},$$

$$K_\beta = \frac{\sum_{i \in M_-} |R_{iz}^2 - R_{i\beta}^2|}{\sum_{i \in M} |R_{iz}^2 - R_{i\beta}^2|},$$

$$K_{R_z^2 - R_\beta^2} = \frac{\tilde{M}_0}{\tilde{M}},$$

Здесь M — множество всех наблюдений, M_+ — множество случаев, где $R_z^2 - R_\beta^2 > 0$, M_- — множество случаев, где $R_z^2 - R_\beta^2 < 0$, M_0 — множество случаев, где $R_z^2 - R_\beta^2 = 0$, $\tilde{M}_0$ и $\tilde{M}$ — количества соответствующих наблюдений.

Обе модели оказались достаточно адекватны имеющимся данным: среднее значение коэффициента детерминации для всего массива данных для гиперболической модели составило 0,90, для экспоненциальной — 0,88. Таким образом, более высокий коэффициент детерминации характерен для параметра β гиперболической модели: доля случаев, где $R_\beta^2 - R_z^2 > 0$ составила 63%. Заметим, что по степени адекватности гиперболическая и экспоненциальная модели различаются незначительно, поэтому применение каждой из этих моделей одинаково допустимо.

Исключение влияния зависимости выравнинности распределений от видового богатства. Выбор характеристик разнообразия. Анализ типичных проб зообентоса озер Республики Марий Эл показал, что параметры ранговых распределений зависят от числа представленных в пробе видов. В интервале числа сохраненных в пробе видов от 2 до 5 наблюдается самая сильная зависимость параметров от этого числа (другими словами, зависимость выравнинности видового разнообразия от видового богатства). Рис. 1 демонстрирует зависимость параметров гиперболической модели от количества сохраненных в пробе видов при последовательном исключении последнего вида в одной из типичных проб зообентоса исследуемых озер. Одна из возможностей исключения указанной зависимости состоит в сохранении в анализируемом массиве тех проб, которые представлены одинаковым количеством видов, например не более чем 3 доминирующими видами, и получены исключением всех последующих видов.

Таким образом, выравнинность сообщества была проанализирована при помощи нелинейных параметров рангового распределения, рассчитанных по

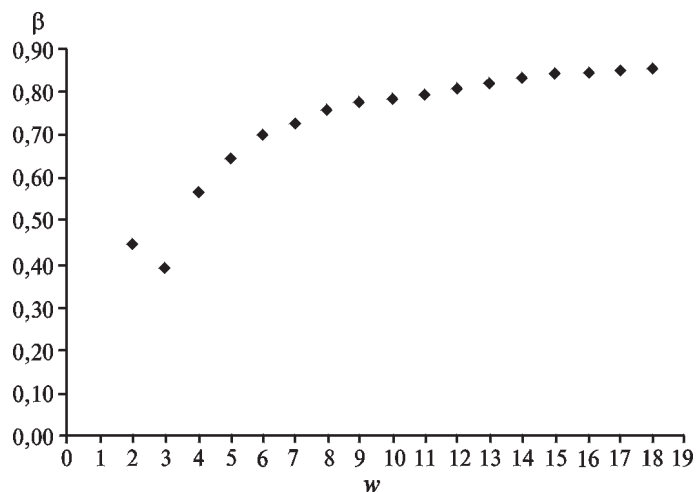


Рис. 1. Зависимость параметра гиперболического (β) рангового распределения от количества (w) сохраненных в пробе видов при последовательном отбрасывании последнего вида

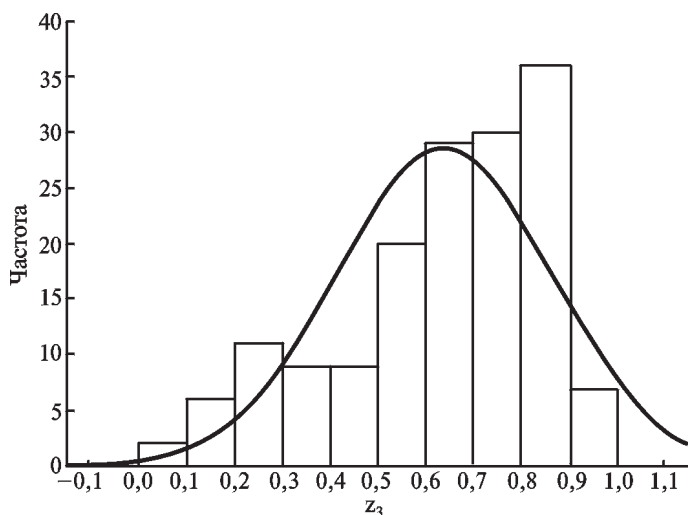


Рис. 2. Гистограмма распределения значений параметра z_3 экспоненциальной модели ранговых распределений

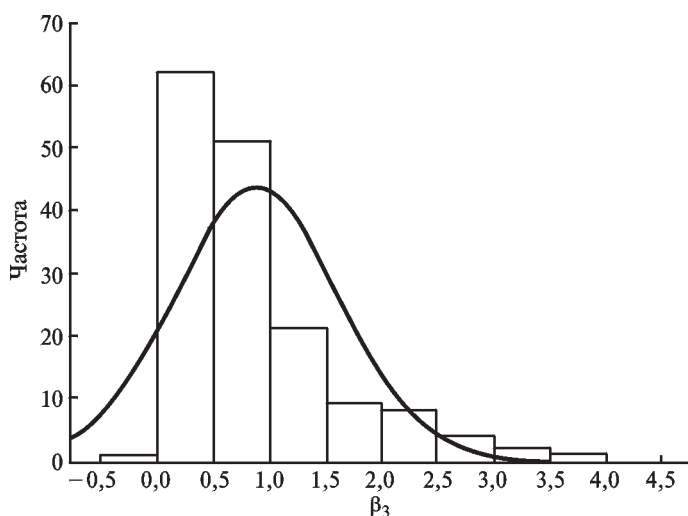


Рис. 3. Гистограмма распределения значений параметра β_3 гиперболической модели ранговых распределений

трем доминирующим видам всех проб — z_3 и β_3 (рис. 2, 3). Применение предложенных индексов, кроме исключения зависимости параметров от количества представленных видов, позволяет сохранить для анализа как можно больше имеющихся в базе данных наблюдений, что является необходимым условием проведения эффективного экологического контроля (биоиндикации, статистических оценок, диагностики вредных воздействий и их нормирования).

Кроме перечисленных индексов для анализа сообществ мы использовали индекс разнообразия по доминирующему виду z_1 .

Анализ коэффициентов корреляции показал, что все параметры между собой достаточно высоко и статистически достоверно скоррелированы (табл. 1), поэтому для анализа видового разнообразия достаточно использовать любой из предложенных индексов.

Таблица 1

Значение коэффициентов корреляции используемых параметров

Параметры ранговых распределений			
Значение коэффициента корреляции	z_1	z_3	β_3
z_1	1,00	0,99	-0,99
z_3		1,00	-0,97
β_3			1,00

Анализ влияния гидрохимического режима озера на биотические индексы. Для того чтобы соотнести различия индексов с влиянием антропогенных воздействий на зообентос, необходимо предварительно проанализировать различия в их значениях, вызванные иными причинами, например зависимостью от гидрохимического режима озера.

Исследуемые нами озера относятся к двум различным геогеологическим провинциям. К первой группе (так называемого Марийского Полесья) относятся 13 озер. Марийским Полесьем называют западную и центральную часть Марийского Заволжья, которая представляет собой залесенную низменную территорию. Это зона избыточного увлажнения (до 497 мм в год атмосферных осадков) [13].

Вторая группа, представленная в нашем исследовании 6 озерами, относится к восточной части Марийского Заволжья и занимает возвышенность, известную под названием Вятские Увалы. Несмотря на то, что осадков выпадает до 500 мм в год, трещиноватые и закарстованные породы значительную их часть уводят в глубь водораздельных массивов. Зонами разгрузки являются обширные карстовые озера.

В Марийском Полесье преобладают озера с водой темного цвета, что связано с их расположением на заболоченных территориях и поступлением болотных вод. Озера, имеющие подпитку болотными водами, как правило, отличаются низкими значениями прозрачности. Озера Вятского Увала отличаются в целом большими значениями прозрачности. По химическому составу воды большая часть озер Марийского Полесья относится к двум гидрохимическим фациям — гидрокарбонатно-кальциево-сульфатной и гидрокарбонатно-кальциево-хлоридной и имеет малую минерализацию (от 19,53 мг/л до 150 мг/л). Воды озер Вятского Увала в основном относятся к гидрокарбонатно-кальциево-магниево-й фации и отличаются повышенной минерализацией (более 150 мг/л) [13].

Такие существенные различия в геологии и гидрохимии озер могли отразиться и на сообществах макрозообентоса. Например, видовые списки беднее в озерах Марийского Полесья по сравнению с озерами Вятского Увала из-за выпадения крупных форм раковинных моллюсков вследствие слабой минерализации вод.

В то же время дисперсионный анализ параметров ранговых распределений и индекса разнообразия по доминирующему виду не показал статистически достоверных отличий этих показателей в исследуемых группах. Это говорит о том, что за длительный период существования озер сообщества зообентоса приспособились к естественному гидрохимическому фону. Таким образом, параметры ранговых распределений оказались более точным инструментом анализа стрессовых воздействий, так как не зависят от естественного фона абиотических факторов.

Анализ распределения значений биотических индексов в зависимости от принадлежности озера к особо охраняемым природным территориям (ООПТ). Зависимость параметров от степени антропогенной нагрузки можно проследить, анализируя распределение их значений в двух группах — в озерах,

Таблица 2

Основные статистические показатели используемых параметров в группах: 1 — озера, относящиеся к ООПТ, 2 — озера, не относящиеся к ООПТ

Группы	Параметры ранговых распределений								
	z_3			β_3			z_1		
	$\bar{n}$	N	σ	$\bar{n}$	N	σ	$\bar{n}$	N	σ
1	0,66	127	0,21	0,79	127	0,66	0,58	158	0,15
2	0,53	32	0,25	1,20	32	0,90	0,50	49	0,18
Все группы	0,63	159	0,22	0,88	159	0,73	0,44	207	0,16

Примечание. Сокращения: N — количество наблюдений, $\bar{n}$ — среднее значение, σ — стандартное отклонение.

Таблица 3

Значение критерия Фишера и уровня значимости в сравниваемых группах

Параметр	Критерий Фишера	Уровень значимости, %
z_3	8,67	0,00372
β_3	8,46	0,00415
z_1	11,77	0,00072

относящихся к ООПТ, и в озерах, не подлежащих какой-либо природоохранной деятельности. Результаты дисперсионного анализа показали, что более высокое разнообразие по всем трем параметрам характерно для зообентоса озер, расположенных на территориях ООПТ (табл. 2, 3). Это озера национального парка Марий Чодра (Шутьер, Кужьер, Ергежьер, Кичиер), а также памятники природы — озера Светлое, Гусинец, Средние, Нижние и Верхние Кумьяры. В то же время результаты дисперсионного анализа показали, что такой показатель, как количество видов w не зависит от принадлежности водоема к ООПТ.

Поиск границы между значениями используемых параметров, соответствующих благополучным и неблагоприятным состояниям сообществ зообентоса. Дальнейшим этапом методических работ по использованию индекса разнообразия по доминирующему виду и параметров ранговых распределений должен быть поиск границы, позволяющей разделить их значения на две группы, соответствующие экологическому благополучию и неблагоприятию водоема. Мы исходим из той предпосылки, что экологическому благополучию соответствует более высокая степень биологического разнообразия, нежели неблагоприятию. Параметр z_3 экспоненциального рангового распределения и индекс z_1 могут изменяться в пределах от 0 до 1. Параметр β_3 гиперболического рангового распределения изменяется в диапазоне от 0 до 5 и выше. Низкие значения индексов z_1 и z_3 соответствуют низкой выравненности видов в сообществе, а высокие значения — высокой выравненности. Для параметра гиперболического рангового распределения соответствие противоположное. В простейшем случае совокупность значений индикаторной характеристики должна содержать два класса: благополучные значения, соответствующие нормальному состоянию биоты, и неблагоприятные — соответствующие нарушенному состоянию. Задача градуировки — указать границу между этими состояниями.

Можно предложить несколько подходов к выбору границы:

- наиболее вероятное значение характеристики (мода распределения);

- значение, разделяющее всю совокупность значений характеристики на два равновеликих класса (медиана распределения);
- значение, выбираемое согласно экспертным оценкам;
- значение, обеспечивающее наилучшую корреляцию распределения индикаторной характеристики с распределением некоторой независимой от нее величины, для которой разделение на благополучный и неблагоприятный классы известно и признано приемлемым.
- среднее значение характеристик для сообщества, функционирующего в эталонных условиях, например в заповедной зоне или в период с отсутствием антропогенного загрязнения и т.п.

Согласно приведенным выше результатам дисперсионного анализа, средние значения используемых параметров достоверно различаются для наблюдений в озерах, находящихся в статусе особо охраняемых, и в озерах, не подлежащих охране. Поэтому границу нормы характеристик можно искать, опираясь на средние значения параметров, рассчитанных для зообентоса охраняемых озера, условия которых можно отнести к эталонным. Тогда для индекса z_1 этой границей будет значение 0,50, для z_3 — 0,53. Для параметра гиперболической модели β_3 граница равна 1,20 (табл. 2). Если значения индексов, в случае z_1 и z_3 , ниже предложенной границы, то качество воды можно отнести к классу неблагоприятной. При расчете индекса β_3 к классу

неблагополучных вод относятся пробы со значениями выше предложенной границы.

Заключение

Проведенное исследование позволяет рекомендовать к использованию для целей биоиндикации качества вод озер Республики Марий Эл такие характеристики видового разнообразия, как параметры ранговых распределений и индекс разнообразия по доминирующему виду. При этом достаточно использовать любой среди предложенных индексов, так как все они высоко скоррелированы. Из анализа рекомендуется исключить виды, представленные менее чем 10 особями. Для исследованных в данной работе макрозообентосных сообществ озер Республики Марий Эл граница между благополучными и неблагоприятными состояниями составляет: для z_1 — 0,50, для z_3 — 0,53, для параметра β_3 — 1,20.

Авторы глубоко признательны своим коллегам: А.П. Левичу — за постоянные консультации и помощь в разрешении методических трудностей при анализе разнообразия сообществ зообентоса; Н.Г. Булгакову — одному из авторов информационной системы “Экология пресных вод России и сопредельных стран”.

* * *

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-04-00541а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левич А.П. Структура экологических сообществ. М., 1980.
2. Frontier S. Diversity and structure in aquatic ecosystems // Oceanogr. and Mar. Biol. Ann. Rev. 1985. Vol. 23. P. 253—278.
3. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М., 1992.
4. Пузаченко Ю.Г., Пузаченко А.Ю. Семантические аспекты биоразнообразия // Журн. общ. биол. 1996. Т. 57. № 1. С. 1—43.
5. Максимов В.Н., Булгаков Н.Г., Левич А.П. Индикация экологического неблагоприятия как основа количественных методов экологического контроля рек // Малые реки: современное экологическое состояние, актуальные проблемы: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Тольятти. 23—27 апреля. 2001. С. 131.
6. Максимов В.Н. О ранговых распределениях в экологии сообществ с точки зрения статистики // Изв. РАН. Сер. биол. 2004. № 3. 352—361.
7. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М., 2004.
8. Методические разработки для Большого практикума “Методы определения качества вод” / Сост. Р.П. Мелантьева. Казань, 1987.
9. Бедова П.В., Забурдаева Е.А. Экологическое состояние озер особо охраняемых территорий Республики Марий Эл // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Мат-лы 2-й Междунар. науч. конф. Минск, 2003. С. 104—106.
10. Berger W.H., Parker F.L. Diversity of planktonic Euvaminifera in deepsea sediments // Science. 1970. Vol. 168. N 3937. P. 1345—1347.
11. Забурдаева Е.А. Ранговые распределения численности клеток фитопланктона как инструмент биоиндикации качества вод (на примере водных объектов бассейна р. Дон) // Общая и прикладная ценология. 2007. № 6. С. 27—33.
12. Забурдаева Е.А., Левич А.П. Методические аспекты использования данных биологического мониторинга по фитопланктону для биоиндикации качества вод бассейна Волги // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2007. Вып. 9. № 1. С. 195—211.
13. Озера Среднего Поволжья. Л., 1976.

Поступила в редакции
17.04.08

INVESTIGATION DIVERSITY OF BENTHOS FAUNA OF LAKES IN THE MARI EL REPUBLIC BY RANK DISTRIBUTIONS METHOD FOR WATER QUALITY BIOINDICATION

E.A. Zaburdaeva, P.V. Bedova, V.N. Maksimov

The possibility of using the quantitative characteristics of species variety of zoobenthos for bioindication, obtained by ecological monitoring lakes in the Mari El Republic, is investigated. The analysis of following influences on the characteristics of variety is carried out: 1) errors in calculation of zoobenthos species numbers; 2) the method of evaluating the parameters of rank distributions; 3) the adequacy degree of model of distribution; 4) relationship between the characteristic of evenness of variety and species diversity; 5) the hydrochemical status of lake; 6) belonging samples to reserve nature territory. The characteristics of variety are proposed, which are adequate to data of monitoring. Evaluation of border between well-being and trouble values of these characteristics is made. The recommendations regarding the application of the variety zoobenthos characteristic for bioindication the water quality of the lakes in the Mari El Republic are formulated.

Key words: *bioindication, index of variety, parameters of rank distributions.*

Сведения об авторах

Максимов Виктор Николаевич — докт. биол. наук, проф., зав. кафедрой общей экологии биологического факультета МГУ. Тел. 495-55-60; e-mail: v_maximovv@rambler.ru

Бедова Прасковья Владимировна — доцент кафедры зоологии и прикладной экологии Марийского государственного университета.

Забурдаева Евгения Александровна — аспирантка кафедры общей экологии МГУ.