

## СИЛЬНОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ УВЕЛИЧИВАЕТ β-РАЗНООБРАЗИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

© 2012 г. М. Р. Трубина, Е. Л. Воробейчик

Представлено академиком В.Н. Большаковым 24.05.2011 г.

Поступило 07.06.2011 г.

Снижение разнообразия биоты из-за деятельности человека может нарушать экосистемные функции не только в локальном, но и глобальном масштабе [1]. Основными причинами современного увеличения скорости вымирания видов считают утрату, фрагментацию и снижение качества местообитаний [2]. Загрязнение — один из факторов, приводящих к появлению участков, частично или полностью непригодных для многих видов, соответственно снижающих биологическое разнообразие. Влияние загрязнения на разнообразие сообществ чаще всего анализируют с использованием небольшого количества пробных площадей (ПП), из-за чего оперируют оценками только α-разнообразия [3]. Изменение другой важнейшей характеристики — β-разнообразия, отражающего дифференциацию видового состава, практически не изучено. Лишь в отдельных работах при приближении к источнику эмиссии поллютантов отмечали либо отсутствие изменения β-разнообразия (в мезомасштабе), либо его увеличение (в микромасштабе) [4]. Есть косвенные свидетельства возрастания β-разнообразия на техногенных пустошах [5, 6], однако количественные оценки отсутствуют.

β-Разнообразие могло бы быть оценено на основе материалов картирования растительности загрязненных территорий. Однако при этом возникает принципиальная трудность, связанная с неизбежной разницей сравниваемых площадей, из-за чего прямые оценки разнообразия могут быть сильно смещены. Преодоление этой трудности возможно методами интерполяции и экстраполяции разнообразия [7]. Однако такой подход не был реализован для районов промышленного загрязнения.

Цель данной работы — охарактеризовать изменение β-разнообразия растительных сообществ в градиенте промышленного загрязнения от точечного источника выбросов. Мы проверяли гипотезу о том,

что под действием загрязнения происходит конвергенция сообществ: логично предположить, что из-за ограниченности набора толерантных видов изначально разные сообщества в условиях загрязнения становятся более сходными [8]. Акцент сделан на рассмотрении макромасштаба (единицы километров) и мезомасштаба (сотни метров), поскольку техногенное увеличение β-разнообразия в микромасштабе (единицы метров) в какой-то степени тривиально (связано с появлением большого количества пустых проб [4]).

Работа выполнена в районе действия Среднеуральского медеплавильного завода, расположенного около г. Ревды Свердловской обл. и функционирующего с 1940 г. На участке 45 × 40 км, в центре которого расположен завод, в 1995–1998 гг. были заложены 202 ПП размером 25 × 25 м, различающиеся положением в рельефе (элювиальные, транзитные, аккумулятивные ландшафты), типом почвы (серые лесные, бурые горно-лесные, дерново-подзолистые) и растительностью (березовые, сосново-березовые, сосновые, еловые леса разных ассоциаций). Критерии подбора ПП: отсутствие свежих пожаров и сильных антропогенных нарушений, не связанных с загрязнением; удаленность от автомобильных дорог не менее 100 м; возраст эдификаторов древесного яруса не менее 80 лет. На каждой ПП определяли обилие (по шкале Друде) видов травяно-кустарничкового яруса, отбирали по 3 сборных образца лесной подстилки для измерения концентраций подвижных форм Cu, Pb и Cd. На основе пространственной интерполяции (ARC/INFO) индекса загрязнения (среднее по элементам превышение фонового содержания) территория была разбита на пять зон: фоновую (I), слабого (II), среднего (III), сильного (IV) и очень сильного загрязнений, включая техногенную пустошь (V).

Для оценки β-разнообразия использовали три показателя: 1) отношение γ-разнообразия к α-разнообразию (индекс Уиттекера); 2) среднее сходство сообществ (с учетом обилия видов) по всем сочетаниям; 3) скорость выхода на плато кумуляционных кривых, описывающих рост видового богатства с увеличением количества ПП. Для по-

Таблица 1. Значения исследованных параметров в разных зонах загрязнения

| Параметр                  | Зона загрязнения |                  |                  |                   |                     |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                           | I                | II               | III              | IV                | V                   |
| Количество ПП             | 13               | 97               | 39               | 30                | 23                  |
| Площадь, км <sup>2</sup>  | 44               | 1146             | 359              | 248               | 55                  |
| <i>D1</i> , км            | 21.0 (15–31)     | 18.5 (7–31)      | 16.0 (6–26)      | 11.0 (3–16)       | 3.0 (0.6–8)         |
| <i>D2</i> , км            | 24.8 (0.9–49)    | 23.6 (0.3–52)    | 15.4 (1–37)      | 10.1 (0.7–22)     | 5.1 (0.4–16)        |
| Концентрация<br>Cu, мкг/г | 68.6 (52–108)    | 167.2 (64–315)   | 451.6 (170–1015) | 1555.1 (729–2549) | 4398.9 (2467–9585)  |
| $\alpha$ -Разнообразие    | 35.1 (21–50)     | 35.6 (13–62)     | 38.1 (20–54)     | 27.2 (10–57)      | 8.5 (0–22)          |
| $\gamma$ -Разнообразие:   |                  |                  |                  |                   |                     |
| $\gamma^1$                | 117              | 176              | 152              | 125               | 74                  |
| $\gamma^2$                | 109 [99–124]     | 108 [99–121]     | 110 [97–123]     | 91 [79–104]       | 50 [36–60]          |
| $\beta$ -Разнообразие:    |                  |                  |                  |                   |                     |
| $\beta^1$                 | 3.3              | 4.9              | 4.0              | 4.6               | 8.7                 |
| $\beta^2$                 | 3.1 [2.8–3.3]    | 3.0 [2.7–3.5]    | 2.9 [2.6–3.3]    | 3.4 [2.9–3.9]     | 5.9 [4.9–6.9]       |
| <i>CS</i>                 | 0.33 [0.30–0.36] | 0.34 [0.28–0.42] | 0.39 [0.31–0.48] | 0.35 [0.27–0.43]  | 0.09 [0.05–0.14]    |
| <i>R</i>                  | –0.52*           | –0.42*           | –0.29*           | –0.36*            | –0.02 <sup>ns</sup> |
| <i>K<sub>MM</sub></i>     | 3.5 ± 0.1        | 3.9 ± 0.2        | 3.5 ± 0.1        | 4.9 ± 0.2         | 12.8 ± 0.1          |
| <i>ST</i> :               |                  |                  |                  |                   |                     |
| исчезнувших               | –                | 26 [14–37]       | 23 [13–34]       | 33 [22–48]        | 53 [37–71]          |
| появившихся               | –                | 24 [15–33]       | 25 [14–37]       | 15 [7–25]         | 11 [5–18]           |

Примечание. Приведены средние; в круглых скобках – минимум–максимум, в квадратных – 95%-й доверительный интервал. *D1* – расстояние до завода, *D2* – расстояние между ПП;  $\gamma$  – разнообразие:  $\gamma^1$  – наблюдаемое,  $\gamma^2$  – интерполированное;  $\beta$ -разнообразие:  $\beta^1 = \gamma^1/\alpha$ ,  $\beta^2 = \gamma^2/\alpha$ ; *CS* – индекс Чекановского–Сьеренсена; *R* – коэффициент линейной корреляции *CS* и *D2* (\*  $p < 0.001$ , <sup>ns</sup>  $p > 0.05$ ); *K<sub>MM</sub>* – константа уравнения Михаэлиса–Ментен ( $\pm$  ошибка), *ST* – количество видов (медиана) при переходе к следующей зоне.

лучения несмещенных оценок  $\gamma$ -разнообразия применили интерполяцию по кумуляционной кривой (для 10 ПП); расчеты выполнены в программе EstimateS 7.5. Кроме того, кумуляционные кривые аппроксимировали уравнением Михаэлиса–Ментен (для 20 ПП, в зоне I для 13 ПП); константа скорости интерпретируется как такое количество ПП, при котором выявляется половина всех видов (т.е. чем она выше, тем больше  $\beta$ -разнообразие). Для получения несмещенных оценок индекса Уиттекера, количества исчезнувших/появившихся видов и индекса сходства использовали ресамплинг (для каждой зоны 10 случайно безвозвратно изъятых ПП, 1000 повторений; программа RSXL 4.0).

Среднее содержание металлов между сопряженными зонами нагрузки различалось в 2–3 раза (табл. 1), а в пределах каждой зоны был велик размах концентраций, что свидетельствует об очень неравномерном распределении токсикантов. При переходе от зоны I к зонам II и III разнообразие не менялось, а количество исчезнувших видов было равно количеству вновь появившихся.

Существенное снижение  $\alpha$ - и  $\gamma$ -разнообразия отмечено только в IV и V зонах, что связано с некомпенсированным исчезновением видов. При этом  $\alpha$ -разнообразие в пределах этих зон варьировалось в очень широких пределах (от 0 до 57 видов), что свидетельствует о крайне высокой пространственной неравномерности проявления процесса элиминации видов.

Независимо от способа оценки, при увеличении загрязнения  $\beta$ -разнообразие возрастало в 2–4 раза. Отдельные сообщества в зоне V не имели ни одного общего вида, несмотря на небольшие расстояния между ними. Корреляция индекса сходства с расстоянием между сообществами внутри зоны при увеличении загрязнения ослаблялась, а в зоне V полностью отсутствовала, что подтверждает мозаичный характер трансформации растительности и свидетельствует об усилении пространственной изоляции локальных популяций. Мертвопокровных ПП в зоне V было всего две из 23, и они не вносили существенного вклада в оценку  $\beta$ -разнообразия: при их исключении средний индекс сходства увеличивался лишь

до 0.11 (0.08–0.16). Следовательно, наличие пустых проб как одна из причин увеличения  $\beta$ -разнообразия в микромасштабе [4] в нашем случае не играло заметной роли.

Увеличение  $\beta$ -разнообразия в градиенте загрязнения было обусловлено неравномерностью элиминации видов в пространстве, а именно более быстрым снижением видового богатства в мезомасштабе, чем в макромасштабе. Сходная тенденция наблюдается и при сравнении микромасштаба и мезомасштаба [6, 9]. Это связано с тем, что при увеличении загрязнения часто наблюдается не собственно элиминация видов, а снижение численности локальных популяций [6]. Даже при экстремально сильном загрязнении часть особей сохраняется в “осколках местообитаний”, где в силу разных причин условия могут оставаться относительно благоприятными. Увеличение  $\beta$ -разнообразия из-за возрастания пространственной неравномерности условий среды происходит и в других градиентах, например, высотном [10].

Таким образом, исходная гипотеза о конвергенции растительных сообществ в градиенте загрязнения не подтвердилась: снижение  $\alpha$ -разнообразия сообществ сопровождается дивергенцией их видового состава. Полученные данные свидетельствуют, что промышленное загрязнение приводит к резкому усилению пространственной изоляции локальных популяций и практически полной потере целостности растительности в макромасштабе. Это может ускорять вымирание оставшихся видов как в результате стохастических процессов, так и действия других антропо-

генных факторов [2]. Возможным следствием этого будет продолжение деградации экосистем вблизи промышленных предприятий даже при снижении объемов выбросов.

Работа проведена при поддержке программы развития научно-образовательных центров (контракт 02.740.11.0279) и Президиума УрО РАН (проекты 09–П–4–1031 и 09–Т–4–1005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букварева Е.Н. Роль наземных экосистем в регуляции климата и место России в постклиотском процессе. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2010. 97 с.
2. Хански И. Ускользящий мир: экологические последствия утраты местообитаний. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2010. 340 с.
3. Zvereva E.L., Toivonen E., Kozlov M.V. // *Global Ecol. Biogeogr.* 2008. V. 17. P. 305–319.
4. Desrochers R.E., Anand M. // *Biodiv. Conserv.* 2005. V. 14. P. 3437–3455.
5. Winterhalder K. // *Environ. Rev.* 1996. V. 4. P. 185–224.
6. Kozlov M.V., Zvereva E.L. // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2007. V. 6. P. 231–259.
7. Colwell R.K., Chang X.M., Chang J. // *Ecology.* 2004. V. 85. P. 2717–2727.
8. Воробейчик Е.Л. Материалы VI Всерос. популяц. семинара. Нижний Тагил, 2004. С. 36–45.
9. Трубина М.Р. Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования. Нижний Тагил, 2010. Ч. 2. С. 266–270.
10. Brockway D.G. // *For. Ecol. Manage.* 1998. V. 109. P. 323–341.