

УДК 57.017(57)
ББК 28.08(253)

О. А. Белых

кандидат биологических наук, доцент,

Байкальский государственный университет экономики и права

Л. Н. Ежова

кандидат технических наук, доцент,

Байкальский государственный университет экономики и права

Н. В. Мамонова

кандидат физико-математических наук, доцент

Байкальский государственный университет экономики и права

В. И. Филиппов

кандидат экономических наук, доцент,

Байкальский государственный университет экономики и права

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ АДАПТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭКОБИОМОРФ ТРАВЯНИСТЫХ МНОГОЛЕТНИКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭКОЛОГО-ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ*

Рассмотрен методический аспект использования биометрической базы данных в эколого-фитоценологическом спектре модельного вида *Thalictrum minus* L. для задач оценки перспективности исходного материала для интродукции и задач экологического мониторинга состояния травянистого покрова. Исследована проблема прогнозирования формирования продуктивных признаков экобиоморф на основе количественных связей параметров особей с ведущими геоморфологическими факторами среды.

Ключевые слова: экологический оптимум; многофакторная регрессионная модель; экобиоморф; Южная Сибирь.

O. A. Belykh

PhD in Biology, Associate Professor

Baikal State University of Economics and Law

L. N. Ezhova

PhD in Technical, Associate Professor

Baikal State University of Economics and Law

N. V. Mamonova

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Baikal State University of Economics and Law

V. I. Filippov

PhD in Economics, Associate Professor

Baikal State University of Economics and Law

MODELLING ASSESSMENT OF PROSPECTS OF ECOBIOMORPH REDIVIVES' ADAPTATION POTENTIAL UNDER CERTAIN ECOPHYTOCENOLOGICAL CONDITIONS

The article examines methods of using the biometric data base in the ecological-phytocenological spectrum of *Thalictrum minus* L. range for assessment of base line prospects for plant introduction, and for eco-monitoring of herbal cover. The authors study the problem of forecasting

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФБ-130 «Экономический механизм компенсации ущерба здоровью населения от загрязнения окружающей среды в целях устойчивого развития Байкальского региона» (соглашение № 14.В37.27.0020).

formation of ecobiomorphs' performance traits based on quantitative connections between parameters of species with the best geomorphic environmental factors.

Keywords: ecological optimum; ecobiomorph; multifactor retrogressive model; Southern Siberia.

Для решения задач повышения эффективности управления мероприятиями по социально-экономическому развитию региона Южной Сибири, охране природных территорий, на основе составления интродукционного и селекционного прогноза эковиоморф травянистых многолетников, необходимы математические средства. Таковой является задача многофакторного прогнозирования показателей, характеризующих параметры развития особей, формирующихся в различных эколого-фитоценологических условиях существования видов, от состояния которых зависит устойчивость и продуктивность растительных сообществ.

Методический аппарат, используемый для решения задачи прогнозирования структуры эковиоморф по факторам среды, опирается на математическую теорию принятия решений, предоставляющую достаточно богатый спектр методов с учетом интенсивного современного развития вычислительных средств. Результатом работы является построение многофакторной регрессионной модели и вероятностные оценки точности решения задачи, характеризующие как степень взаимосвязи формирования продуктивных признаков растений и экологических факторов среды, так и информационную ценность биометрических баз данных.

Для построения модельной структуры эковиоморф, использовались геоботанические описания и база биометрических данных модельного вида *Thalictrum minus* L. из 17 пунктов, расположенных на территории Южной Сибири от $82^{\circ} 56'$ до $104^{\circ} 14'$ восточной долготы. В качестве данных для определения параметров абиотических факторов использовался свободно распространяемый архив высот SRTM¹, на основе которого в каждой точке исследуемой территории оценивались параметры: высота над уровнем моря (метры), крутизна склона (радианы), экспозиция склона (радианы), освещенность по сомкнутости крон, проективное покрытие травостоя.

В работе предлагается подход с позиций системного анализа, а именно многофакторное прогнозирование, основанное на том, что для оценки формирования продуктивных признаков предлагается многофакторная регрессионная модель (рис.).



y — значение прогнозируемого показателя; F — функция регрессии;
 ψ_i — прогнозные функции для факторов; α — набор параметров функции ψ_i ;
 x_i — значение i -го фактора; p — число факторов; t — время

Общая схема многофакторного прогнозирования потенциала эковиоморфа в зависимости от эколого-ценотических условий произрастания

¹ URL : <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (разрешение 3дюйма (около 90 м) по широте и долготе).

По каждому фактору были созданы прогнозные модели на основе временных рядов с применением баз данных. Использование базы данных возможно на одновременном использовании статистической и экспертной информации [2], когда используется информация, полученная от квалифицированных в рассматриваемой области специалистов-экспертов. По последним моделям делаются прогнозы, результаты которых используются в многофакторной модели.

Построение модели множественной регрессии включает в себя следующие этапы: отбор факторов, выбор формы уравнения регрессии и проверку адекватности построенной модели. При построении модели множественной регрессии отбор факторов, включаемых в уравнение регрессии, является одним из основных условий ее качества, заключающегося в соответствии формы модели теоретической концепции и в точности предсказания на рассматриваемом интервале времени наблюдаемых значений переменной уравнением регрессии [1; 3].

Отбор факторов при построении модели множественной регрессии обычно осуществляется на основе качественного теоретико-экологического и статистического анализа тенденций изменения рассматриваемых процессов. В ходе теоретического анализа решается вопрос о целесообразности включения в модель тех или иных факторов, исходя из сущности проблемы. При этом устанавливается факт наличия взаимосвязей между явлениями. Однако каждое из явлений может быть выражено разными факторами и их комбинациями. Поэтому на основании теоретического анализа однозначно состав независимых переменных определить невозможно. Кроме того, факторы, выражающие одну и ту же причину, могут быть тесно взаимосвязаны между собой (коррелированы). Поэтому одновременное включение таких факторов в модель нецелесообразно, поскольку таким образом одна и та же причина будет учтена дважды.

В результате на этапе обоснования модели регрессии возникает проблема выбора оптимального состава независимых факторов среди ряда альтернативных вариантов.

Существует два подхода для решения этой проблемы [3].

Первый подход предполагает исследование характера и силы взаимосвязей между рассматриваемыми переменными до построения модели, по результатам которого в модель включаются факторы, наиболее значимые по своему влиянию на независимую переменную. И, наоборот, из модели исключаются факторы, которые, либо малозначимы с точки зрения силы своего влияния на переменную y , либо их сильное влияние на нее можно трактовать как индуцированное взаимосвязями с другими экзогенными переменными. При этом сильное влияние фактора на зависимую переменную должно подтверждаться определенными количественными характеристиками, важнейшей из которых является их парный линейный коэффициент корреляции r_{yx_i} . Если значение $|r_{yx_i}| > \rho_1$ (на практике применяют $\rho_1 \approx 0,5-0,6$), то имеет место существенная линейная связь между переменными y и x_i [4].

Кроме этого, если два и более фактора выражают одно и то же явление, то между ними существует достаточно сильная взаимосвязь. На это может указать выборочное значение их парного коэффициента корреляции $r_{x_i x_j}$. На практике взаимосвязь между факторами считается существенной, если $|r_{x_i x_j}| > \rho_2$, где $\rho_2 \approx 0,7-0,8$ [5]. В таких случаях один из факторов рекомендуется исключить из регрессионной модели, чтобы одна и та же причина не учитывалась дважды.

Наш подход предполагает первоначально включить в модель все отобранные на этапе теоретического анализа факторы. Уточнение их состава производится на основе анализа характеристик качества построенной модели, одной из групп которых являются и показатели, выражающие силу влияния каждого из факторов на независимую переменную y . При этом в модель включаются все факторы, отобранные в ходе теоретического анализа проблемы. Для этого варианта модели рассчитываются значения оценок коэффициентов модели, их стандартные ошибки и значения t -критериев Стьюдента.

Затем из модели удаляется незначимый фактор, который характеризуется наименьшим значением t -критерия, и, таким образом, формируется новый вариант модели с числом факторов уменьшенным на один. При этом в модели может быть несколько незначимых факторов. Однако все их одновременно удалять не следует, так как незначимость большинства из них может быть обусловлена влиянием «наихудшего» из незначимых факторов, и на следующем шаге расчетов эти факторы окажутся значимыми.

Этап отбора факторов можно считать законченным, когда остающиеся в модели факторы являются значимыми. Если при этом полученная модель удовлетворяет критериям адекватности, то процесс построения модели считается завершенным в целом.

В настоящей работе для прогнозирования эволюционного потенциала биоморф были рассмотрены следующие регрессионные модели:

1. Модель множественной линейной регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p.$$

2. Нелинейные степенные регрессионные модели:

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_p^{b_p}.$$

Параметры уравнения множественной линейной регрессии, если факторы не коррелированы, оцениваются методом наименьших квадратов.

Для оценки экологических особенностей изучаемых видов первоначально были использованы разработанные ранее региональные экологические шкалы, на основе увязки показателей обилия растений и определенных экологических факторов. При этом основой для составления экологических показателей служит правило экологической индивидуальности растений Л. Г. Раменского, согласно которому растения каждого вида имеют свою определенную амплитуду по отношению к действию любого экологического фактора. К настоящему времени экологические шкалы по разным факторам среды разработаны как отечественными, так и зарубежными исследователями [6].

На первом этапе анализа влияния экологических факторов рассматривались следующие факторы 17 местообитаний модельного вида *Thalictrum minus* L.: x_1 — высота над уровнем моря; x_2 — общее проективное покрытие; x_3 — сомкнутость крон; x_4 — содержание гумуса в почве; влияющие на развитие следующих индикационных признаков: y_1 — высота растения, см; y_2 — длина листа, см; y_3 — ширина листа, см; y_4 — средняя длина междоузлий, см; y_5 — длина соцветия, см; y_6 — диаметр стебля, мм; y_7 — содержание сапонинов.

Были оценены показатели статистической связи между каждой из объясняемых (зависимых) переменных y_j и указанным набором объясняющих переменных — факторов или регрессоров x_i . В качестве таких показателей были выбраны парные коэффициенты корреляции, точеч-

ные оценки которых по двум регионам (Прибайкальскому и Западно-Саянскому) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения корреляции по Западно-Саянскому экотипу

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	x_1	x_2	x_3	x_4
y_1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
y_2	0,904 777	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
y_3	0,912 376	0,981 526	1	–	–	–	–	–	–	–	–
y_4	0,939 390	0,921 638	0,934 133	1	–	–	–	–	–	–	–
y_5	0,876 739	0,810 747	0,860 170	0,813 384	1	–	–	–	–	–	–
y_6	0,946 365	0,950 927	0,957 607	0,886 652	0,892 822	1	–	–	–	–	–
y_7	–0,058 120	–0,219 070	–0,104 730	–0,282 650	0,116 764	–0,038 760	1	–	–	–	–
x_1	0,081 948	0,257 989	0,086 232	–0,005 380	–0,170 050	0,151 386	–0,327 370	1	–	–	–
x_2	0,802 913	0,809 302	0,812 063	0,761 778	0,893 388	0,781 306	0,039 502	0,049 753	1	–	–
x_3	–0,139 900	0,002 627	–0,137 800	–0,003 300	–0,404 330	–0,124 050	–0,881 950	0,544 696	–0,370 130	1	–
x_4	0,844 582	0,916 477	0,922 106	0,865 237	0,887 956	0,855 691	–0,089 010	0,067 500	0,963 096	–0,248 560	1

Для проверки значимости коэффициентов корреляции по Прибайкальскому экотипу из таблиц Фишера-Йетса при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $d.f. = 10 - 2 = 8$ была выбрана точка $r_{kp} = 0,632$.

Если $|r_{набл}| > r_{kp}$ гипотеза о незначимости соответствующего коэффициента корреляции отвергается и результаты наблюдений не противоречат предположению о линейной функциональной связи между анализируемыми показателями. В случае, когда $|r_{набл}| < r_{kp}$ соответствующий показатель статистической связи несущественно отличается от нуля, т. е. незначим и между анализируемыми признаками нет линейной функциональной связи. Такая связь может существовать и быть более сложной, нелинейной.

Данные корреляционного анализа по Западно-Саянскому экотипу (табл. 2) дают хорошую картину. Высокие значения коэффициентов корреляции между всеми показателями развития растений y_j и x_2 , x_4 свидетельствуют о прямой связи анализируемых характеристик с общим проективным покрытием и содержанием гумуса. Именно эту связь можно описывать линейными регрессионными моделями. Такие факторы, как местоположение и освещенность дают устойчивую линейную связь со всеми характеристиками растений.

Таблица 2

Результаты наблюдений по Западно-Саянскому экотипу

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	x_1	x_2	x_3	x_4
Танзыбейская	193	43	62	32	59	1,56	1,06	850	95	0,6	14,3
Онинская	160	32	48	22	54	1,38	1,22	520	74	0,3	9,1
Бегрядинская	111	26	31	13	20	0,83	1,15	1 200	68	0,6	7,1
Абазинская	100	20	25	15	26	0,58	1,08	450	64	0,6	6,3
Канжувская	106	23	33	16	18	0,64	1,20	475	62	0,3	6,8
Кошелохинская	151	29	42	20	57	1,08	1,26	500	95	0	11,8
Капказская	134	21	26	17	22	0,73	1,17	700	62	0,5	5,2

Этап моделирования влияния экологических факторов местообитаний: x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , на характеристики растений: y_1 , y_2 , y_3 , y_4 , y_5 , y_6 , y_7 , состоял в построении эконометрических моделей линейной парной и

множественной регрессий с анализом и обсуждением полученных результатов.

Линейные модели, построенные по методу наименьших квадратов (МНК), по Западно-Саянскому экотипу имеют вид:

$$\hat{y}_1 = 56,46 - 0,031x_2 + 10,86x_3 + 8,98x_4, \quad R^2 = 0,72;$$

$$\hat{y}_2 = 20,97 - 0,41x_2 + 4,92x_3 + 4,07x_4, \quad R^2 = 0,92;$$

$$\hat{y}_3 = 47,11 - 1,06x_2 - 3,85x_3 + 8,25x_4, \quad R^2 = 0,93;$$

$$\hat{y}_4 = 15,34 - 0,33x_2 + 3,31x_3 + 3,17x_4, \quad R^2 = 0,82;$$

$$\hat{y}_5 = -11,12 + 0,29x_2 - 13,68x_3 + 3,59x_4, \quad R^2 = 0,82;$$

$$\hat{y}_6 = 0,63 - 0,01x_2 + 0,03x_3 + 0,16x_4, \quad R^2 = 0,75;$$

$$\hat{y}_7 = 1,35 - 6,89x_2 - 0,309x_3 - 0,01x_4, \quad R^2 = 0,87.$$

Здесь коэффициенты оцененных регрессий характеризуют среднее абсолютное изменение y , когда соответствующий регрессор меняет свои значения на одну единицу (в единицах измерения x и y). Показатели степени пригодности построенных моделей — коэффициенты детерминации R^2 свидетельствуют о хорошей подгонке данных. Так, если содержание гумуса (x_4) увеличить на 1 %, то ширина листа (y_3) увеличится на 8,25 %.

Таким образом, данная модель позволяет прогнозировать поведение травянистых многолетников в условиях интродукции при увеличении освещения и технологических способах регулирования агроэкологических условий.

Построение по Западно-Саянскому экотипу нелинейной степенной модели для факторов, имеющих большую связь с результирующими показателями, привело к следующим результатам:

$$\hat{y}_1 = 3,66x_2^{0,76}x_4^{0,14}, \quad R^2 = 0,81;$$

$$\hat{y}_2 = 77,66x_2^{-0,77}x_4^{1,06}, \quad R^2 = 0,87;$$

$$\hat{y}_3 = 431,22x_2^{-1,32}x_4^{1,52}, \quad R^2 = 0,92;$$

$$\hat{y}_4 = 11,33x_2^{-0,28}x_4^{0,81}, \quad R^2 = 0,74;$$

$$\hat{y}_5 = 0,006x_2^{1,84}x_4^{0,36}, \quad R^2 = 0,97;$$

$$\hat{y}_6 = 0,16x_2^{-0,04}x_4^{0,92}, \quad R^2 = 0,86;$$

$$\hat{y}_7 = 0,63x_2^{0,24}x_4^{-0,13}, \quad R^2 = 0,21.$$

Степень подгонки данных достаточно высока, о чем свидетельствует коэффициент детерминации R^2 . В этих моделях показатели степени представляют собой эластичности параметров растений по факторам x_2 — общего проективного покрытия и x_4 — содержания гумуса. Так, при увеличении общего проективного покрытия на 1 % от своего среднего значения, высота растения y_1 увеличивается на 0,76 % от своего среднего значения, а при увеличении содержания гумуса на 1 % — эта высота увеличится лишь на 0,14 %, и т. д.

Соотношение между содержанием сапонинов (y_7) и общим проективным покрытием (x_2) и содержанием гумуса (x_4) слабо выражено, так как степень подгонки данных нелинейной моделью составляет лишь 21 %.

Данная модель позволяет также прогнозировать поведение травянистых многолетников в условиях изреживания древостоя при загрязнении

аэропромышленными выбросами. Индикационная роль травянистых растений на поллютанты проявляется в понижении жизненности растений и уменьшении показателей развития продуктивных признаков (высоты растения, размеров листа, диаметра стебля) под пологом лесных пород. При деградации древостоя, его изреживании, будет наблюдаться увеличение параметров листьев особей, вследствие увеличения фотосинтетической активности при изменении условий освещения. Описанные закономерности могут служить надежным критерием для экологического мониторинга природных территорий.

Подводя итоги проделанной работы, выделим ее основные результаты.

Для прогнозирования адаптационного потенциала биоморф травянистых многолетников в градиенте эколого-фитоценологических условий предложено многофакторное прогнозирование, основанное на том, что для оценки, развития продуктивных признаков формирующихся под влиянием эколого-ценотических факторов местообитаний, предлагается многофакторная регрессионная модель.

Методический аппарат позволяет по каждому фактору создавать прогнозные модели на основе временных рядов с применением информации экспертной базы данных. Исходные статистические данные содержатся в файле MS Excel, а затем экспортируются в MatLab. Пользователь при этом имеет возможность изменять информацию, формировать различные выборки данных, производить их аналитический и статистический анализ.

Созданная многофакторная модель оценки перспективности адаптационного потенциала биоморф травянистых многолетников, исходя из решаемой задачи, выбранных моделей и сведений экспертов, позволяет прогнозировать формирование продуктивных признаков в зависимости от местоположения площади, условий освещенности, густоты стояния травостоя и богатства почвы.

Качество прогнозирования при $R^2 = 0,8$ позволит повысить эффективность мониторинга состояния территории с помощью травянистых многолетников и обеспечить достоверность интродукционного прогноза.

В работе показано, что для прогнозирования формирования продуктивных признаков достаточно учитывать небольшое количество факторов (сомкнутость крон, густота травостоя и содержание гумуса), обеспечивая при этом необходимую точность прогноза.

Список использованной литературы

1. Антонов А. В. Системный анализ / А. В. Антонов. — М. : Высш. шк., 2004. — 454 с.
2. Бельх О. А. Экология и интродукция василисников Южной Сибири / О. А. Бельх. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2012. — 150 с.
3. Блауберг И. В. Проблема целостности и системный подход / И. В. Блауберг. — М. : Эдиториал УРСС, 1997. — 448 с.
4. Елисеева И. И. Эконометрика / И. И. Елисеева. — М. : Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
5. Клиланд Д. Системный анализ и целевое управление : пер. с англ. / Д. Клиланд, В. Кинг. — М. : Сов. радио, 1974. — 280 с.
6. Цыганов Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Цыганов. — М. : Наука, 1983. — 197 с.

References

1. Antonov A. V. *Sistemnyi analiz* [Systemic analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 454 p.

2. Belykh O. A. *Ekologiya i introduktsiya vasilisnikov Yuzhnoi Sibiri* [Ecology and Southern Siberian meadowrue introduction]. Irkutsk, BGUEP Publ., 2012. 150 p.

3. Blauberg I. V. *Problema tselostnosti i sistemnyi podkhod* [Problem of integrity and systemic approach]. Moscow, Editorial URSS Publ., 1997. 448 p.

4. Eliseeva I. I. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p.

5. Cleland D. I., King W. R. *Systems analysis and project management*. New York, McGraw-Hill., 1968. 315 p. (Russ. ed.: Kliland D., King V. *Sistemnyi analiz i tselevoe upravlenie*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 280 p.).

6. Tsyganov D. N. *Fitoindikatsiya ekologicheskikh rezhimov v podzone khvoynoshirokolistvennykh lesov* [Phytoindication of eco-modes in the sub-zone of mixed coniferous-broad-leaved forest]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 197 p.

Информация об авторах

Бельх Ольга Александровна — кандидат биологических наук, доцент, кафедра налогов и таможенного дела, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: belykh-oa@isea.ru.

Ежова Людмила Николаевна — кандидат технических наук, доцент, кафедра математики, эконометрики и статистики, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: naamm@mail.ru.

Мамонова Наталья Вячеславовна — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математики, эконометрики и статистики, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: naamm@mail.ru.

Филиппов Владимир Иванович — кандидат экономических наук, доцент, кафедра налогов и таможенного дела, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: Filippov-vi@isea.ru.

Authors

Belykh Olga Alexandrovna — PhD in Biology, Associate Professor, Dep-t of Taxes and Customs Regulations, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin st., 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: belykh-oa@isea.ru

Ezhova Ludmila Nikolaevna — PhD in Technical, Associate Professor, Dep-t of Mathematics, Statistics and Econometrics, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin st., 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: naamm@mail.ru.

Mamonova Natalia Vjacheslavovna — PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dep-t of Mathematics, Statistics and Econometrics, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin st., 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: naamm@mail.ru.

Filippov Vladimir Ivanovich — PhD in Economics, Associate Professor, Dep-t of Taxes and Customs Regulations, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin st., 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: Filippov-vi@isea.ru.