

УДК 639.111.14

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-91-95>Тип статьи: краткое сообщение
Type of article: brief report**Каледин А.П.,
Юлдашбаев Ю.А.*,
Филатов А.И.,
Остапчук А.М.**ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
127550, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49
E-mail: info@rgau-msha.ru**Ключевые слова:** матричная модель, верификация модели, охотничьи животные, прогноз динамики популяций и добычи, лось, кабан, Ленинградская область.**Для цитирования:** Каледин А.П., Юлдашбаев Ю.А., Филатов А.И., Остапчук А.М. Моделирование динамики популяций охотничьих животных в Ленинградской области: формирование и верификация модели, прогноз развития популяции. *Аграрная наука*. 2020; 336 (3): 91–95.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-91-95>**Конфликт интересов отсутствует****Anatolij P. Kaledin,
Yusup A. Yuldashbaev,
Anatolij I. Filatov,
Artem M. Ostapchuk**Russian state agrarian University – Moscow state agrarian University named after K.A. Timiryazev
49, Timiryazevskaya str., Moscow, 127550, Russia
E-mail: info@rgau-msha.ru**Key words:** matrix model, model verification, hunting animals, forecast of population dynamics and production, elk, wild boar, Leningrad region.**For citation:** Kaledin A.P., Yuldashbaev Y.A., Filatov A.I., Ostapchuk A.M. Modeling the dynamics of hunting animal populations in the Leningrad region: model formation and verification, population development forecast. *Agrarian Science*. 2020; 336 (3): 91–95. (In Russ.)<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-91-95>**There is no conflict of interests**

Моделирование динамики популяций охотничьих животных в Ленинградской области: формирование и верификация модели, прогноз развития популяции

РЕЗЮМЕ

В статье рассматриваются процессы формирования и верификации модифицированной матричной модели динамики популяций охотничьих животных в Ленинградской области, а также расчета прогнозных показателей динамики популяций и добычи лося и кабана в Ленинградской области до 2026 года. При верификации модели по лосю получены незначительные отклонения (от 1,8 до 6,7% по абсолютной величине) результатов решения модифицированной матричной модели от фактических ретроспективных данных, а по модели популяции кабана отклонения составили от 0,7 до 7,3%, что свидетельствуют об адекватности и точности отражения динамики популяции лося и кабана в Ленинградской области при модельных экспериментах.

Modeling the dynamics of hunting animal populations in the Leningrad region: model formation and verification, population development forecast

ABSTRACT

The article discusses the processes of formation and verification of a modified matrix model of the dynamics of hunting animal populations in the Leningrad region, as well as the calculation of forecast indicators of the dynamics of populations and production of elk and wild boar in the Leningrad region until 2026. When verifying the model for elk, minor deviations were obtained (from 1.8 to 6.7% in absolute value) of the results of solving the modified matrix model from the actual retrospective data, and for the wild boar population model the deviations were from 0.7 to 7.3%, which indicates the adequacy and accuracy of reflecting the dynamics of the elk and wild boar population in the Leningrad region during model experiments.

Поступила: 16 марта
После доработки: 17 марта
Принята к публикации: 20 мартаReceived: 16 march
Revised: 17 march
Accepted: 20 march

Использование математических моделей для прогнозирования развития биологических систем порождает проблему адекватности отражения в математической модели процессов, протекающих в биологических системах. Гомоморфизм математической модели предполагает, что в ней отражается достаточно полно исследуемые характерные свойства моделируемой системы, а несущественные и второстепенные, с точки зрения исследования, могут быть проигнорированы, т.е. математическая модель лишь приближенно отражает отдельные свойства моделируемой системы. Насколько близко данное приближение математической модели к оригинальной системе, должно выявить отдельное исследование модели, которое называется верификацией модели.

Моделирование динамики популяций животных с детализацией возрастной структуры приводит к определенному классу матричных моделей. За моделями динамики популяции с возрастной структурой закрепилось имя Лесли [4]. Классические матричные модели Лесли содержат в своей основе события воспроизведения популяции (рождение, возрастная зрелость, воспроизводственные характеристики, продолжительность жизни), но не учитывают факторы хозяйственной деятельности человека и их воздействие на воспроизведение и развитие популяции [4].

Методика

В алгоритм реализации классической модели Лесли

$$X(t_{n+1}) = LX(t_n),$$

где $X(t_n)$ — текущий вектор развития популяции в t_n -период; $X(t_{n+1})$ — последующий вектор развития популяции в t_{n+1} — период; L — переходная матрица.

На каждой итерации вводится корректирующие вектора, которые представлены в корректирующей матрице, что приводит к модифицированной матричной модели Лесли.

Модифицированные матричные модели Лесли широко используются для прогнозирования динамики популяций охотничьих животных [1, 2, 3].

В данной работе предлагается на примере развития популяции лося и кабана в Ленинградской области дополнить классическую модель Лесли корректирующей матрицей, в которой учитываются факторы хозяйственной деятельности человека, в частности добыча животных.

Алгоритм применения корректирующей матрицы в модифицированной модели динамики популяций охотничьих животных заключается в следующем.

$$1. \quad X'(t_1) = LX(t_0)$$

$$X''(t_1) = X'(t_1) - K(t_1)$$

$$2. \quad X'(t_2) = LX(t_1)$$

$$X''(t_2) = X'(t_2) - K(t_2)$$

...

$$n. \quad X'(t_n) = LX'(t_{n-1})$$

$$X''(t_n) = X'(t_n) - K(t_n)$$

где $X(t_0)$ — начальный вектор состояния популяции; $X'(t_n)$ — текущий вектор развития популяции в t_n -период;

$X''(t_n)$ — скорректированный вектор развития популяции в t_n -период; $K = \{K(t_1), K(t_2), \dots, K(t_n)\}$ — корректирующая матрица.

При использовании математических моделей для прогнозирования развития объекта, процесса или явления моделирования исследователь должен быть уверен в том, что математическая модель адекватно отражает моделируемые свойства биологической системы. Для проверки адекватности математической модели осуществляется ее верификация.

Для верификации модифицированной матричной модели динамики популяций охотничьих животных наилучшим образом подходит метод сопоставления результатов расчетов по модели с ретроспективными фактическими данными динамики популяции.

Исходной информацией для составления моделей динамики популяций лося и кабана послужила выписка из государственного охотхозяйственного реестра Ленинградской области за 2011–2014 годы и за 2015–2018 годы.

Результаты

Реализация модифицированной матричной модели по популяции лося в Ленинградской области

Верификация модифицированной матричной модели динамики популяции лося в Ленинградской области проводилась следующим образом. На основе ретроспективных данных задавался начальный вектор состояния популяции лося за 2011 год.

Поскольку структура начального поголовья лося в разрезе возрастных групп была неизвестна, то за основу была принята структура поголовья, полученная в результате предварительного прогона модели.

В результате решения модели получена следующая матрица ретроспективной динамики поголовья лося (табл. 3). Итоговая численность поголовья лося была

Таблица 1. Матрица перехода в модели по популяции лося в Ленинградской области

Table 1. The transition matrix in the elk population model in the Leningrad region

Возрастные группы лосей							
сеголетки 0–1 года	особы 2–3 лет	особы 4–5 лет	особы 6–7 лет	особы 8–9 лет	особы 10–11 лет	особы 12–13 лет	особы 14 лет и старше
0	0,4675	0,44	0,42	0,405	0,286	0	0
0,85	0	0	0	0	0	0	0
0	0,85	0	0	0	0	0	0
0	0	0,85	0	0	0	0	0
0	0	0	0,88	0	0	0	0
0	0	0	0	0,88	0	0	0
0	0	0	0	0	0,88	0	0
0	0	0	0	0	0	0,88	0

Таблица 2. Начальный вектор состояния популяции лося в Ленинградской области за 2011 год

Table 2. The initial state vector of the elk population in the Leningrad region in 2011

Структура начального поголовья, %	Возрастные группы	Популяция на начальный момент времени 2011 год
23,9	сеголетки 0–1 года	3003
19,0	особы 2–3 лет	2394
15,2	особы 4–5 лет	1909
12,1	особы 6–7 лет	1522
9,9	особы 8–9 лет	1241
8,0	особы 10–11 лет	1011
6,6	особы 12–13 лет	824
5,3	особы 14 лет и старше	671
100	Всего	12575

Таблица 3. Матрица динамики поголовья лося с учетом добычи

Table 3. The matrix of the dynamics of the elk population taking into account the hunting

Возр. группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
0-1	3353	3491	3716	3922	4149	4401	4668	4938
2-3	2445	2730	2843	3026	3193	3378	3583	3801
4-5	1950	1991	2223	2315	2464	2600	2751	2918
6-7	1646	1681	1717	1917	1996	2124	2242	2372
8-9	1312	1419	1449	1480	1653	1721	1831	1933
10-11	1070	1131	1223	1250	1276	1425	1484	1579
12-13	872	922	975	1055	1077	1100	1229	1279
14 и старше	710	752	795	841	910	929	949	1059
Всего	13358	14118	14942	15805	16718	17679	18737	19880
Факт	13602	14753	15225	16944	17693	17339	18143	н/д
% отклонений	-1,8	-4,3	-1,9	-6,7	-5,5	2,0	3,3	

Таблица 4. Начальный вектор состояния популяции лося в Ленинградской области за 2018 год

Table 4. The initial state vector of the elk population in the Leningrad region for 2018

Структура начального поголовья, %	Возрастные группы	Популяция на начальный момент времени 2018 год	
		2018	2019
23,9	сеголетки 0–1 года		4333
19,0	осоび 2–3 лет		3455
15,2	особи 4–5 лет		2754
12,1	особи 6–7 лет		2196
9,9	особи 8–9 лет		1790
8,0	особи 10–11 лет		1459
6,6	особи 12–13 лет		1189
5,3	особи 14 лет и старше		969
100	Всего		18143

Таблица 5. Матрица поголовья лося в Ленинградской области с учетом добычи на 2019–2026 годы

Table 5. The matrix of the elk population in the Leningrad region, taking into account hunting, for 2019–2026

Возрастные группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
0-1	4735	4693	4805	4873	4969	5073	5177	5267
2-3	3414	3731	3698	3786	3840	3915	3997	4079
4-5	2722	2690	2940	2914	2983	3025	3085	3150
6-7	2170	2145	2120	2316	2296	2350	2384	2431
8-9	1791	1770	1750	1729	1889	1873	1917	1945
10-11	1460	1461	1444	1427	1411	1541	1528	1564
12-13	1190	1191	1192	1178	1164	1151	1257	1246
14 и старше	970	971	972	972	961	950	939	1026
Всего	18452	18652	18919	19196	19513	19879	20284	20707

Таблица 6. Матрица добычи лося в Ленинградской области на 2019–2026 годы

Table 6. Elk hunting matrix in the Leningrad region for 2019–2026

Возрастные группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
0-1	157	155	159	161	164	168	171	174
2-3	269	294	291	298	302	308	315	321
4-5	214	212	231	229	235	238	243	248
6-7	171	169	167	182	181	185	188	191
8-9	141	139	138	136	149	147	151	153
10-11	115	115	114	112	111	121	120	123
12-13	94	94	94	93	92	91	99	98
14 и старше	76	76	77	77	76	75	74	81
Всего	1237	1254	1270	1289	1310	1334	1361	1390

сопоставлена с фактическими данными состояния поголовья лося за 2012–2018 годы.

Полученные незначительные отклонения (от 1,8 до 6,7% по абсолютной величине) результатов решения модифицированной матричной модели от фактических ретроспективных данных свидетельствуют об адекватности и точности отражения динамики популяции лося в Ленинградской области в модельных экспериментах. Следовательно, модифицированная матричная модель динамики популяции лося в Ленинградской области успешно прошла верификацию.

Прогноз динамики популяции лося в Ленинградской области

На основе верифицированной модели можно сделать прогноз динамики популяции лося в Ленинградской области на 2019–2026 годы. По имеющимся данным задавался начальный вектор состояния популяции лося за 2018 год (табл. 4).

В результате решения модифицированной матричной модели динамики популяции лося в Ленинградской области получена матрица поголовья и матрица добычи лося на 2019–2026 годы (табл. 5).

В результате сформированной модифицированной матричной модели динамики популяции лося в

Таблица 7. Матрица перехода в модели по кабану
Table 7. The transition matrix in the model for wild boar

Возрастные группы кабана					
поросята 0-1 года	особи 2-3 лет	особи 4-5 лет	особи 6-7 лет	особи 8-9 лет	особи 10 лет и старше
0	1,44	1,8	2,16	1,44	0,72
0,70	0	0	0	0	0
0	0,70	0	0	0	0
0	0	0,70	0	0	0
0	0	0	0,80	0	0
0	0	0	0	0,80	0

Таблица 8. Начальный вектор состояния популяции кабана в Ленинградской области за 2011 год
Table 8. The initial state vector of the wild boar population in the Leningrad region for 2011

Структура начального поголовья, %	Возрастные группы	Популяция на начальный момент времени 2011 год
57,4	поросята 0-1 года	5143
24,7	особи 2-3 лет	2214
10,6	особи 4-5 лет	948
4,6	особи 6-7 лет	409
1,9	особи 8-9 лет	174
0,8	10 лет и старше	76
100	Всего	8964,0

Таблица 9. Матрица динамики поголовья кабана с учетом добычи

Table 9. The matrix of the dynamics of the population of wild boar, taking into account hunting

Возр. группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
0-1	4259	4331	3971	3800	3553	3366	3167	2992
2-3	2232	1848	1879	1723	1649	1542	1461	1375
4-5	961	969	802	816	748	716	669	634
6-7	411	417	420	348	354	325	311	290
8-9	203	204	207	209	173	176	161	154
10 и старше	86	101	101	103	103	86	87	80
Всего	8152	7869	7381	6999	6580	6210	5856	5525
Факт	7683	7644	7771	7552	9039	6084	5817	н/д
% отклонений	6,1	2,9	-5,0	-7,3	-27,2	2,1	0,7	

Таблица 10. Начальный вектор состояния популяции кабана в Ленинградской области за 2018 год

Table 10. The initial state vector of the population of wild boar in the Leningrad region for 2018

Структура начального поголовья, %	Возрастные группы	Популяция на начальный момент времени 2018 год
55,3	поросята 0-1 года	3216
25,0	особи 2-3 лет	1453
11,3	особи 4-5 лет	656
5,1	особи 6-7 лет	297
2,3	особи 8-9 лет	134
1,0	10 лет и старше	61
100	Всего	5817,0

Таблица 11. Матрица поголовья кабана в Ленинградской области с учетом добычи на 2019–2026 годы

Table 11. Matrix of the number of wild boar in the Leningrad region, taking into account hunting, for 2019–2026

Возрастные группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
0-1	3986	3727	4102	4122	4373	4489	4700	4862
2-3	1351	1674	1565	1723	1731	1837	1885	1974
4-5	610	567	703	658	724	727	771	792
6-7	276	256	238	295	276	304	305	324
8-9	142	132	123	114	142	133	146	147
10 и старше	64	68	64	59	55	68	64	70
Всего	6430	6426	6795	6971	7301	7557	7871	8168

Таблица 12. Матрица добычи кабана в Ленинградской области на 2019–2026 годы

Table 12. Matrix of wild boar hunting in the Leningrad region for 2019–2026

Возрастные группы	Размер популяции по годам, гол.							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
0-1	1708	1597	1758	1767	1874	1924	2014	2084
2-3	901	1116	1044	1149	1154	1224	1257	1316
4-5	407	378	469	438	482	485	514	528
6-7	184	171	159	197	184	203	204	216
8-9	95	88	82	76	95	88	97	98
10 и старше	43	46	42	39	37	45	42	47
Всего	3337	3397	3554	3666	3826	3969	4129	4288

Ленинградской области, которая прошла верификацию, был рассчитан прогноз динамики численности популяции лося в Ленинградской области и оптимизирована матрица добычи лося до 2026 года.

По отложенной методике верификации модели и прогноза динамики популяции произведен расчет динамики популяции кабана в Ленинградской области. На динамику популяции кабана в значительной мере накладывает свое влияние профилактика АЧС.

Модифицированная матричная модель по популяции кабана в Ленинградской области (табл. 7).

Верификация модифицированной матричной модели динамики популяции кабана в Ленинградской области (табл. 8)

В результате решения модели получена следующая матрица ретроспективной динамики поголовья кабана (табл. 9). Итоговая численность поголовья была сопоставлена с фактическими данными состояния поголовья кабана за 2012–2018 годы.

В результате верификации модели по кабану наблюдаются незначительные отклонения результатов решения модели от фактических данных за 2012–2018 годы. Исключение составляет 2016 год по причине значительно фактического роста поголовья кабана по сравнению со средними значениями. Сформированную модифи-

цированную матричную модель динамики популяции кабана по Ленинградской области можно считать положительно прошедшей верификацию.

Прогноз динамики популяции кабана в Ленинградской области

На основе верифицированной модели можно сделать прогноз динамики популяции кабана в Ленинградской области на 2019–2026 годы.

По имеющимся данным (табл. 10) задавался начальный вектор состояния популяции кабана за 2018 год.

В результате решения модифицированной матричной модели динамики популяции кабана в Ленинградской области получена матрица поголовья и матрица добычи кабана на 2019–2026 годы (табл. 11, 12).

Выводы

Таким образом, на основе модифицированной матричной модели динамики популяций охотничьих животных сформированы модели по лосю и кабану в Ленинградской области, проведена их верификация, которая подтвердила адекватность отражения динамики популяций лося и кабана в предложенных моделях, и сделан прогноз динамики популяций и добычи лося и кабана в Ленинградской области до 2026 года.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Абдраимов С.А. Аридные пастбища Казахстана. Алма-Ата. Кайнар. 1988. 140 с. [Abdraimov S.A. Arid pastures of Kazakhstan. Alma-Ata. Kainar. 1988. 140 sec. (In Russ.)]
2. Баймukanов Д. К мерам по эффективному использованию пастбищных угодий Казахстана. 2019, 4. Режим доступа: https://inbusiness.kz/ru/author_news/k-meram-po-effektivnomu-ispolzovaniyu-pastbishnyh-ugodij-kazahstana. [дата обращения: 14 апреля 2019]. [Baimukanov D. On measures for the efficient use of pasture lands of Kazakhstan [Electronic resource]. 2019, 4. Access mode: https://inbusiness.kz/ru/author_news/k-meram-po-effektivnomu-ispolzovaniyu-pastbishnyh-ugodij-kazahstana [Accessed April 14 2019] (In Russ.)]
3. Karynbayev AK., Baimukanov DA., Bekenov DM., Yuldashev YuA., Chindaliev AE. Environmental monitoring of pastures and determination of carrying capacity under the influence of anthropogenic factors. News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series geology and technical sciences. Volume 6, Number 438 (2019): 104–111. Режим доступа: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.161>. ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print).
4. Бекмухамедов Н.Э. Методика определения продуктивности естественных кормовых угодий на подспутниковых по-
- лигонах Казахстана. Сельское, лесное и водное хозяйство. 2012, 7. Режим доступа: <http://agro.snauka.ru/2012/07/467>. [дата обращения: 14 апреля 2019]. [Bekmukhamedov NE. Methodology for determining the productivity of natural fodder land at sub-satellite ranges of Kazakhstan. Agriculture, forestry and water management. 2012, 6 Access mode: <http://agro.snauka.ru/2012/07/467>. [Accessed July 2012] (In Russ.)].
5. Методические рекомендации по изучению состава и питательности кормов СССР Москва. ВАСХНИЛ. Отделение животноводства. 1985. 42 с. [Guidelines for the study of the composition and nutrition of feed of the USSR. Moscow. VASKHNIL. Department of Livestock. 1985. 42 sec. (In Russ.).]
6. Муратова НР., Бекмухамедов Н.Э. Оценка экологического состояния естественных кормовых угодий Казахстана. Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013, 1. Режим доступа: <http://agro.snauka.ru/2013/01/864>. [дата обращения: 24.10.2013]. [Muratova NR., Bekmukhamedov NE. Assessment of the ecological status of Kazakhstan's natural forage lands. Agriculture, forestry and water management. January. 2013. No. 1. [Access mode: <http://agro.snauka.ru/2013/01/864>. [Accessed October 24 2013]. (In Russ.)].

ABOUT THE AUTHOR

- Anatolij P. Kaledin**, Doctor of Biological Sciences, Professor of Zoology Department
Yusup A. Yuldashev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the RAS
Anatolij I. Filatov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Artem Ostapchuk, PhD student

ОБ АВТОРАХ

- Каледин Анатолий Петрович**, доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии
Юлдашбаев Юсупжан Артыкович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН
Филатов Анатолий Иванович, кандидат экономических наук, доцент
Остапчук Артем Михайлович, аспирант