

Patterns of the reindeer (Taimyr-Evenk population) movement in dynamics during migration

V G Soukhovolsky, A P Savchenko, A V Kovalev, P A Savchenko, A N Muravyov

¹ Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

² Institute of Ecology and Geography, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russia

E-mail: soukhovolsky@yandex.ru; zom2006@list.ru; 09petro@mail.ru; sasha-mu@yandex.ru

Abstract. Несмотря на пристальный интерес к северному оленю, целый ряд вопросов его экологии по-прежнему остается слабо изученным. Сложности оценки состояния популяций оленей связаны с техническими трудностями, необходимостью слежения за особями в условиях дикой природы. Кроме того, большую часть года они находятся в движении, проходя от 6,5 до 9 тыс. км. Для оценки и прогноза состояния популяций необходима информация не только о численности, но и о физиологическом состоянии особей. Настоящая работа посвящена разработке косвенных методов оценки состояния северных оленей по показателям миграционной активности отдельных особей. Использование ошейников с радиопередатчиками позволяет детально оценить особенности режимов движения животных с помощью многочисленных показателей, описывающих связи между скоростью движения в разные дни. Это открывает возможности использования данных для понимания состояния особей, что, в конечном счёте, позволяет оценивать динамику численности и устойчивость популяций дикого северного оленя, в целом.

1. Introduction

Северный олень *R. tarandus* L., 1758 – один из основных представителей животного мира Арктической зоны. Существовая в обширном ареале, составляющим более 1,5 млн. км², животные большую часть года находятся в движении, проходя до 6,5 тыс. км, а в отдельные годы – до 9 тыс. км [1, 2]. Несмотря на пристальный интерес к северному оленю, целый ряд вопросов его экологии по-прежнему остается слабо изученным. Данные по численности разнятся, крайне противоречивы и прогнозные оценки: от полной утраты промыслового значения вида, до вполне оптимистичного сценария [3, 1]. Для сохранения популяций этого вида необходима детальная информация о численности и состоянии особей в популяции, а также о текущем состоянии природной среды. Изменения погодных характеристик, объемы доступного кормового ресурса, воздействие паразитов и хищников, техногенные и антропогенные воздействия, изъятие оленей охотниками будут вести к изменению состояния особей и определять будущее популяции. Сложности оценки численностей популяций оленей связаны с техническими трудностями слежения за особями в условиях тундры: расстояния, на которые перемещаются олени в ходе миграции, достигают сотен километров, изменяются маршруты их движения, варьируют характеристики природной среды, в которой перемещаются олени, измерить достаточно трудно.

Для оценки и прогноза состояния популяции необходима информация о физиологическом состоянии особей. Ясно, что чем лучше их физиологическое состояние, тем будет выше плодовитость самок и выживаемость сеголеток, тем меньше будет риск гибели от нападения хищников. Однако непосредственное измерение физиологического состояния особей дикого северного оленя в условиях природной среды остаётся технически сложно выполнимым. Настоящая работа посвящена разработке косвенных методов оценки состояния северных

олений по показателям миграционной активности особей.

Информацию о миграции оленей можно получить, используя радиоошейники, передающие через спутниковые каналы связи периодические данные о текущем местоположении оленя. На основе этих данных, можно определить направление миграции и ее темпы – пройденные расстояния и среднюю скорость движения. Однако при расчете средней скорости движения по данным радиоошейников необходимо иметь в виду, что движение оленей неравномерно – кроме перемещения по тундре, олени тратят время на поиск корма и питание, а также на отдых.

2. Objects and methods

Для дистанционного наблюдения за животными и оценки текущей скорости их движения применяли специализированные ошейники, с радиомаяками спутниковой системы Argos производства ООО «ЭС-ПАС» (г. Москва). Отлов оленей в 2015-2019 гг. проводили в районе оз. Ессей (оз. Тисэ-Суох, 68°15'42" N; 103°51'32.33" E), у оз. Талах (68°46'27" N; 103°47'49" E), у оз. Хэптарак, 68°40'29" N; 103°9'38" E) и в окрестностях оз. Дюпкун (68°7'50" N; 99°9'30" E). Данные за 2020 г. взяты из общей базы данных Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края. Мечение оленей было выполнено сотрудниками Заповедников Таймыра в местах переправы оленей на реках Хета-Хатанга (72°22'17" N; 103°13'2.38" E и 70°57'57" N; 94°36'55" E) (рис. 1).

Для каждого оленя с ошейником один раз в сутки (в 0. 00 ч.) с использованием радиомаяка производилась регистрация местоположения особи. По координатам особи в течение двух смежных дней вычислялось расстояние между текущими местоположениями оленя и азимут направления движения. Для расчета расстояния между двумя точками и направления вектора движения по поверхности Земли использовали формулы сферической геометрии [4].

Расстояние между двумя точками по данным радиомаяков трактовалось как средняя скорость движения оленя в сутки. Средняя скорость движения может зависеть от состояния особи, наличия кормовых ресурсов, ландшафта местности, по которой проходит маршрут. Также следует иметь в виду, что олени – стадные животные и средняя скорость движения отдельной особи может зависеть от состояния других особей в стаде (точно так же, как скорость движения эскадры как единого целого зависит от наличия судов с минимальной скоростью движения).

3. Methods for indirect assessment of the reindeer state

Для оценки процессов движения особей в каждый из этих периодов, рассмотрим гипотезу использования стратегии, которая заключается в чередовании стадий бега, кормления и отдыха. При использовании такой стратегии должна существовать корреляция между скоростями движения оленя в отдельные дни. Так, если используется стратегия «день бежим – день отдыхаем», то должна существовать отрицательная корреляция между скоростями движения особи в смежные дни, что в модели движения может быть выражено порядком авторегрессии $k = 1$ (марковский процесс). Более сложные варианты такой стратегии, выражающиеся в менее частом чередовании движения и отдыха, могут описываться авторегрессионными функциями более высоких порядков $k > 1$, характеризующими зависимость расстояния $L(i)$, пройденного в день i , (фактически это среднесуточная скорость движения) от расстояний $L(i-j)$, пройденных в предыдущие k дней:

$$L(i) = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j L(i-j) \quad (1),$$

где $a_0 - a_k$ – коэффициенты, k – порядок авторегрессии, характеризующий значимость связи текущего и k предыдущих значений временного ряда $\{L(i)\}$. Заметим, что при $k > 1$ спектр временного ряда среднесуточных скоростей движения будет циклическим с периодом, зависящим от значений коэффициентов (1) [5].

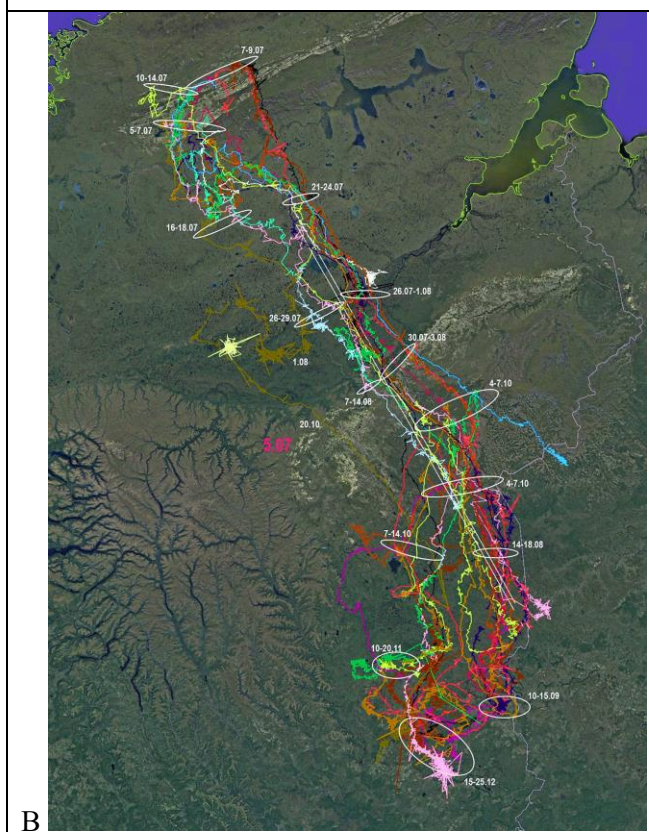
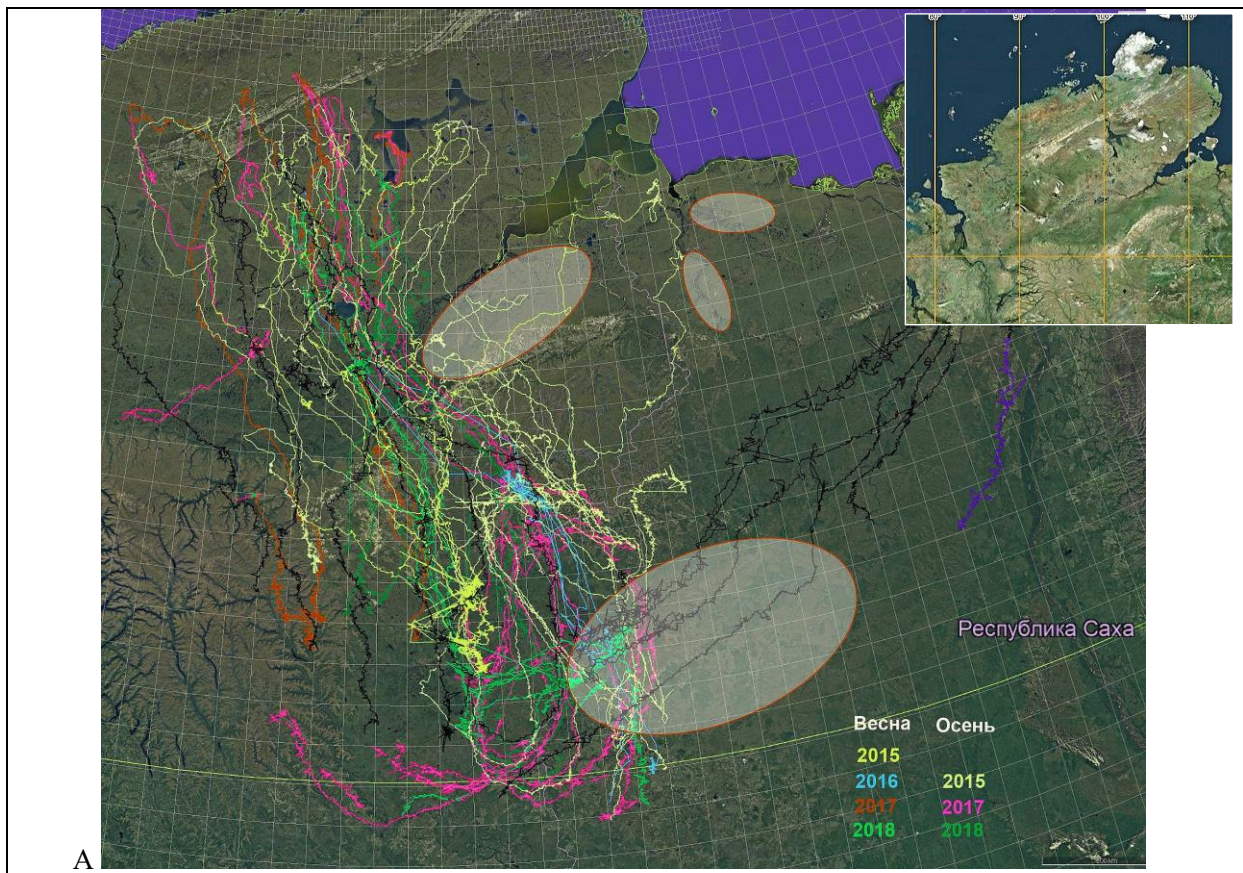


Figure 1. Migration routes of reindeer from calving and summering areas to wintering ground, according to the results of tagging with collars with radio transmitters: A – 2015-2019; B – 2020 г.; Color of the tracks in fig. A – years, in fig. B – individual reindeer tracks

Если по данным радиомаяков известен временной ряд скоростей движения оленя, то в уравнении (1) будут известны значения $L(i-j)$, но неизвестен порядок авторегрессии k и значения коэффициентов $a_0 - a_k$. Для оценки порядка авторегрессии возможно использовать парциальную авторегрессионную функцию (ПАКФ) [6-8]. Порядок авторегрессии будет равен числу коэффициентов ПАКФ, значения которых, превышают значения стандартных ошибок ПАКФ. При известном порядке авторегрессии уравнение (1) можно рассматривать как линейное регрессионное уравнение относительно неизвестных коэффициентов $a_0 - a_k$. Задача нахождения таких коэффициентов хорошо известна [9, 10].

Корректность уравнения (1) можно оценить по значению коэффициента детерминации R^2 , характеризующего долю дисперсии переменных $L(i)$, описываемую уравнением (1), и значимостью согласно t -тесту коэффициентов $a_0 - a_k$.

4. Results and discussion

На рис. 1 в качестве примера приведем парциальную авторегрессионную функцию (ПАКФ) для оленя с ошейником 33340, мигрирующего на север в 2019 г. Из рис. 2 видно, что порядок авторегрессии для периода миграции на север составляет $k = 4$ дня. Используя значение k и ряд данных о среднесуточной скорости движения, можно вычислить коэффициенты авторегрессионных уравнений, связывающих скорости движения в соседние дни.

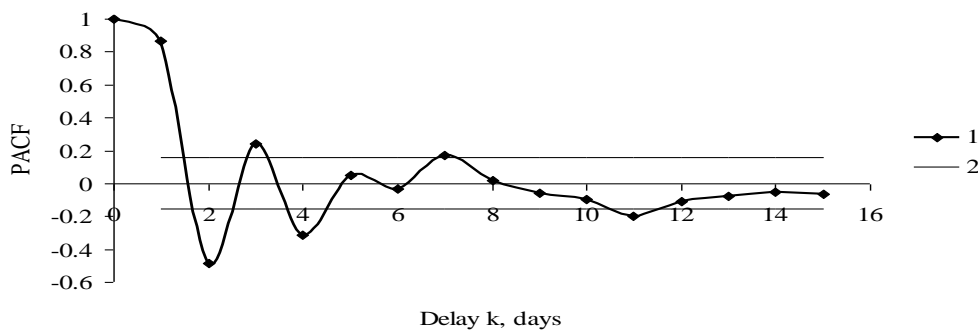


Figure 2. ПАКФ для периода миграции на север оленя с ошейником 33340 в 2019 г.:
1 – значение ПАКФ, 2 – доверительный интервал ошибки ПАКФ.

В табл. 1 приведены коэффициенты AR-уравнения движения оленя № 34340 при его миграции на север.

Table 1. Коэффициенты уравнения AR(4) движения особи № 34340 на север в 2019 г.

Variables	Coefficients	Std.Err.	t-test	p-level
L_0	2.294	0.967	2.37	0.0239
$L(i-4)$	-0.675	0.185	-3.65	0.00092
$L(i-3)$	1.509	0.354	4.27	0.000164
$L(i-2)$	-1.832	0.344	-5.33	0.000008
$L(i-1)$	1.796	0.173	10.41	0.000000
R^2	0.89			
F	63.2			

Как видно из табл.1, все коэффициенты уравнения (1) значимы на уровне не ниже $p = 0.024$. Уравнение (1) для движения оленя № 34340 объясняет почти 90 % дисперсии, рассматриваемой переменной. Коэффициент при переменной $L(i-1)$ имеет положительное значение и чем больше расстояние, пройденное за день $(i-1)$, тем больше олень пройдет за день i . Коэффициент при

переменной $L(i-2)$ имеет отрицательный знак, то есть, чем больше расстояние, пройденное за день ($i-2$), тем меньше расстояние $L(i)$, пройденное за день i . Таким образом, для этого оленя характерно чередование скоростей движения. На рис. 3 сопоставлены ряды данных: среднесуточных скоростей, полученных с использованием радиоошейника, и модельный ряд по AR(4)-уравнению для движения оленя № 34300 на север.

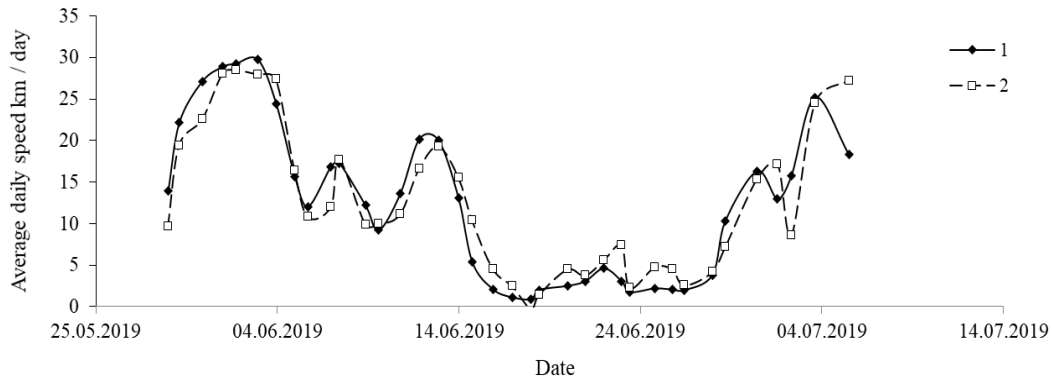


Figure 3. Натурный ряд данных среднесуточных скоростей (1) и модельный ряд (2) для движения оленя № 34300 на север

Для более длинных рядов миграции (с февраля по декабрь 2019 г.) оленя с ошейником № 61941 г. можно выделить три стадии миграционных процессов: случайное блуждание в зимне-весенний период без чёткого направления движения; миграция на север и случайное блуждание в осенне-зимний сезон (рис. 4).

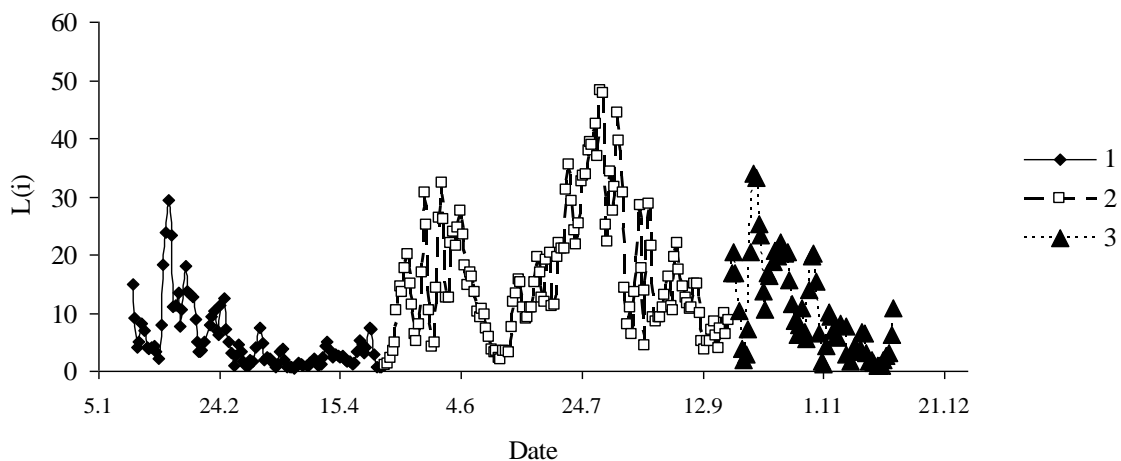


Figure 4. Скорости движения особи в период наблюдений 2019 г.: 1 – случайное блуждание весной, 2 – миграция на север, 3 – случайное блуждание осенью

Для каждого из этапов перемещения особи, рассматривалась индивидуальная AR(k)-авторегрессионная модель. Для этого по значениям парциальной авторегрессионной функции определялся порядок авторегрессии весенних случайных (трофических) перемещений (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что уравнение движения имеет порядок 5. В табл. 2 приведены результаты расчетов AR-уравнения для этого периода.

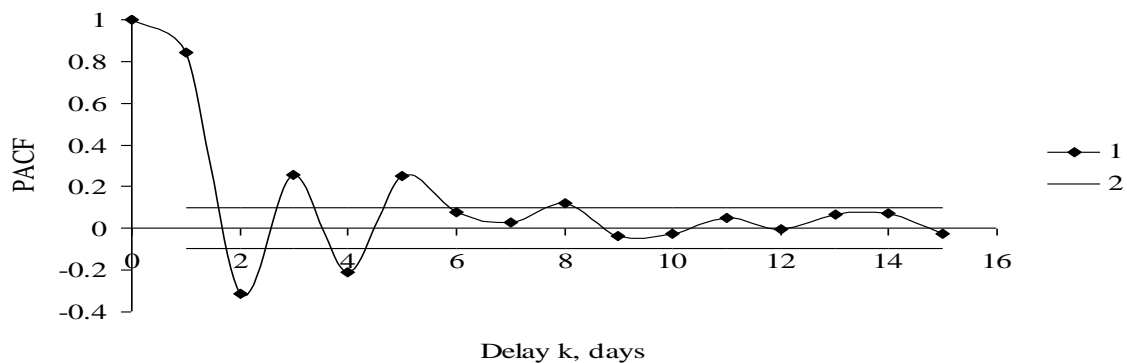


Figure 5. ПАКФ для движения оленя с ошейником № 61941 весной

Table 2. Расчет AR-уравнения для перемещения оленя с ошейником № 61941 в весенний период

Variables	Coefficients	Std.Err.	t-test	p-level
L_0	0.442	0.332	1.34	0.185100
$L(i-5)$	0.417	0.091	4.61	0.000013
$L(i-4)$	-0.885	0.156	-5.68	0.000000
$L(i-3)$	1.089	0.169	6.44	0.000000
$L(i-2)$	-1.245	0.158	-7.86	0.000000
$L(i-1)$	1.522	0.093	16.33	0.000000
R^2	0.86			
F-test	109.7			

На рис. 6 приведены графики изменения ряда натуральных данных и модельного ряда для оленя с ошейником № 61941.

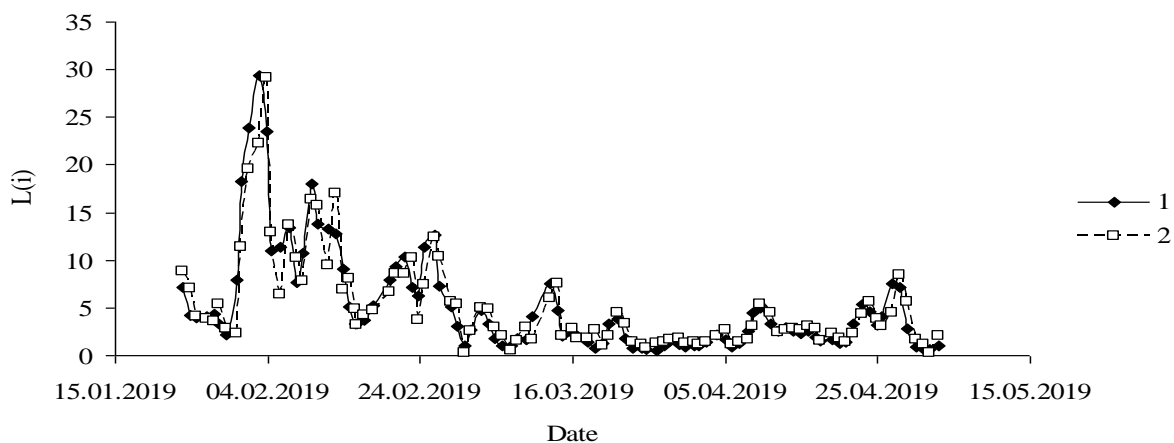


Figure 6. Динамика скоростей движения ряда натуральных данных (1) и модельного ряда (2) для оленя с ошейником № 61941 в весенний период

Как видно из табл. 2, чередование знаков коэффициентов AR-уравнения в этом случае такое же, как и в табл. 1. Коэффициент детерминации для модели этого этапа также весьма высок ($R^2 = 0.86$), а коэффициенты уравнения значимы.

Можно сопоставить характеристики движения оленей в весенний период с ошейниками под №№ 34340 и 61941. Как видно из табл. 4 и 5, для оленя с ошейником № 61941 все коэффициенты значимо больше, чем для оленя с № 34340. Так, характеристика коэффициента $a(i-1)$, отвечающая за влияние на текущую скорость движения скорости движения в предыдущий день составляет 1.52, тогда как для оленя с ошейником № 34340 эта величина равна 1.25. Это значение можно трактовать как возможность увеличения скорости в смежные дни, которая может зависеть от физиологического состояния и доступности корма для оленя.

Для этапа миграции оленя № 61941 на север (к месту отёла) ПАКФ описывает авторегрессию порядка 5 (рис. 7).

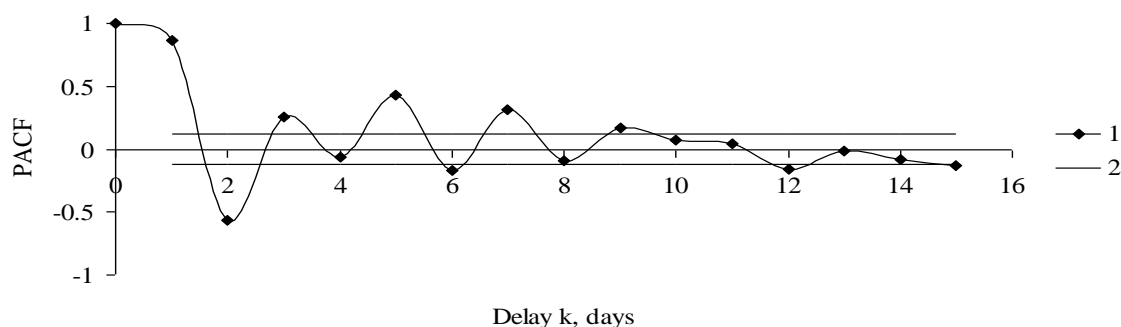


Figure 7. ПАКФ для временного ряда скоростей движения оленя № 61941 при миграции на север

В табл. 3 приведены характеристики AR(5)-уравнения для оленя № 61941.

Table 3. Расчет AR-уравнения для перемещения оленя с ошейником № 61941 при миграции на север

Variables	Coefficients	Std.Err.	t-test	p-level
L_0	0.890	0.735	1.21	0.231001
$L(i-5)$	0.453	0.116	3.89	0.000265
$L(i-4)$	-0.765	0.211	-3.62	0.000638
$L(i-3)$	0.804	0.238	3.38	0.001310
$L(i-2)$	-1.109	0.213	-5.20	0.000003
$L(i-1)$	1.529	0.118	12.97	0.000000
R^2	0.88			
F-test	80.5			

На рис. 8 сопоставлены натурные и модельные значения рядов среднесуточных скоростей движения оленя с ошейником № 61941 при движении на север.

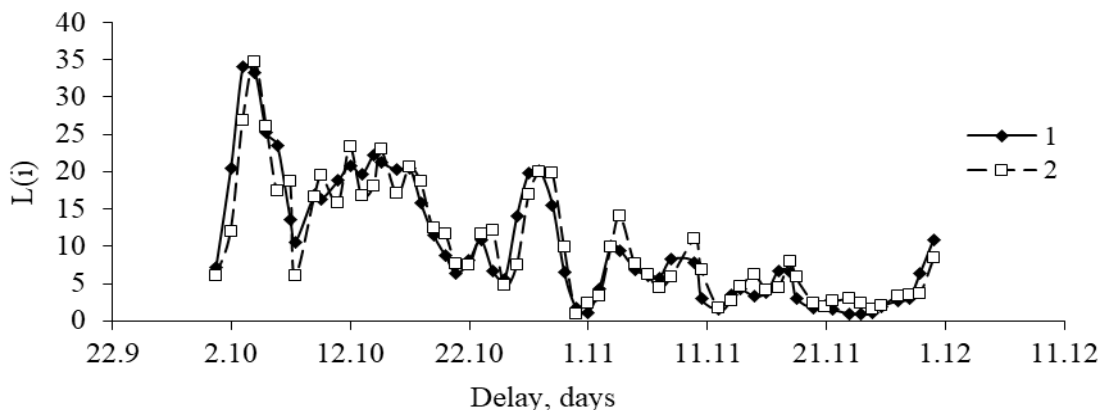


Figure 8. Динамика скоростей движения ряда натуральных данных (1) и модельного ряда (2) для оленя № 61941 в 2019 г. при движении на юг в область зимовки

ПАКФ временного ряда скоростей при возвращении оленя № 61941 на юг приведена на рис. 9.

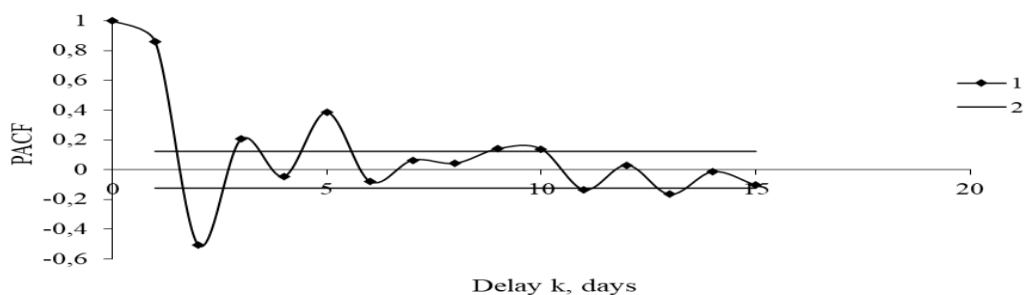


Figure 9. ПАКФ временного ряда возвращения оленя № 61941 на юг

В табл. 4 приведены коэффициенты AR(5)-уравнения для этого временного ряда среднесуточных скоростей.

Таблица 4. Коэффициенты AR(5)-уравнения для временного ряда среднесуточных скоростей движения оленя 61941 на юг

variables	coefficients	Std.Err.	t-test	p-level
L_0	0.887	0.750	1.18	0.241
$L(i-5)$	0.461	0.119	3.87	0.000300
$L(i-4)$	-0.773	0.216	-3.57	0.000761
$L(i-3)$	0.810	0.242	3.35	0.001468
$L(i-2)$	-1.118	0.217	-5.18	0.000004
$L(i-1)$	1.533	0.121	12.71	0.000000
R^2	0.88			
F - test	75.9			

Сопоставим коэффициенты AR-уравнений для разных особей в один период миграции. Олень № 61941 в период миграции на север движется со скоростью, в два раза большей по сравнению со скоростью перемещений (блужданий), а олень № 34340 при миграции на север –

со скоростью, в пять раз большей по сравнению со скоростью при весеннем блуждании. Коэффициенты $L(i-1)$ и $L(i-2)$ AR-уравнений для оленя № 61941 при блуждании и миграции, оценивающие влияние скоростей двух предыдущих дней на текущую скорость особи, близки по значениям. Различия при этом средних скоростей движения могут быть связаны со случайным или трофическим перемещением особи в весенний период. Для коэффициентов AR-уравнения для оленя № 34340 в разные периоды сезонных перемещений характерны большие различия для разных периодов движения. Так влияние скорости предыдущего дня при миграции на север в полтора раза сильнее, чем при весенних трофических перемещениях. В этом случае изменения скорости движения весной и средняя скорость движения будут меньше, чем при направленной миграции на север.

Как показывают исследования, даже в зимние месяцы олени находятся в движении, но они отличаются от перемещений, связанных с миграцией. Однако и в этот период, растянутый во времени, например, осенний цикл начинается в третьей декаде июля и заканчивается в ноябре, могут участвовать животные (стада, группы), находящиеся в различном физиологическом состоянии, что, естественно, накладывает отпечаток на довольно сложную картину сезонных перемещений диких северных оленей.

5. Conclusion

Проведенный анализ показал, что использование радиоошейников позволяет детально оценить особенности режимов движения оленей с помощью многочисленных показателей, описывающих связи между скоростью движения в разные дни, и открывает возможности использовать эти показатели для оценки состояния особей, а через эти показатели оценить динамику численности и устойчивость популяций и субпопуляций северного оленя.

Работа выполнена при поддержке ООО «Арктический Научный Центр» в рамках исследований по договору между ПАО «НК «Роснефть» и ООО «Арктический Научный Центр» по теме «Оценка устойчивости арктических экосистем на основании исследования динамики состояния ключевых видов».

References

- [1]. Savchenko A P, Sukhovolskiy V G, Savchenko P A, Muravyov A N, Dubintsov S A, Karpova N V and Tarasova O V 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **421** 052004
- [2]. Salman A L, Savchenko A P, Grebel G, Okhlopov I M, Savchenko P A, Dubintsov S A, Soukhovolsky V G and Muravyov A N 2019 IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering **734** (2020) 012011 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/734/1/012011
- [3]. Bonadar M G and Kolpashchikov L A 2018 Estimation of the abundance and summer distribution of the Taimyr wild reindeer population in 2017 Scientific works of the Federal State Budgetary Institution "Taimyr United Directorate of Nature Reserves", Norilsk APEK vol 2 pp 29-45
- [4]. Vincenty Th. 1975 Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations // Survey Review. XXIII (176) pp 88–93
- [5]. Anderson T W 1971. Statistical Analysis of Time Series. N.Y.: Wiley
- [6]. Box G E P, Jenkins G M. 1970 Time series analysis: forecasting and control. San Francisco: Holden-Day p 784
- [7]. Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C, Ljung G M. 2015 Time Series Analysis: Forecasting and Control, N.Y.: Wiley p 712
- [8]. Brockwell P J, Davis R A. 2016 Introduction to Time Series and Forecasting (Springer Texts in Statistics) (Berlin: Springer) p 439
- [9]. Wei W. 2006 Time series analysis: univariate and multivariate methods (Boston: Pearson) p 614

- [10]. Shumway R H, Stoffer D S 2017 Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples. Berlin: Springer (Springer Texts in Statistics)