

ДИНАМИКА СМЕНЫ ПЕРВОСТЕПЕННОГО МАХОВОГО ОПЕРЕНИЯ У ВОРОБЬИНЫХ ПТИЦ, ВОЗМОЖНЫЕ ФАКТОРЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

© 2020 г. М.Е. Диатропов*, В.А. Панчелюга**, А.А. Станкевич**

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 119071, Москва, Ленинский просп., 33

**Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
142290, Пущино Московской области, ул. Институтская, 3

E-mail: panvic333@list.ru

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.

После доработки 08.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Проведено исследование динамики смены первостепенных маховых перьев у нескольких видов воробьиных птиц в естественных условиях и в лабораторных при содержании на разных фотопериодах, а также при раннем начале послебрачной линьки, вызванном переводом птиц зимой на пятнадцатичасовой эффективный для роста гонад фотопериод. За пять лет наблюдений во все исследуемые периоды в динамике начала роста новых маховых перьев для группы птиц в целом установлен околотрехсуточный биоритм. При режимах освещения свет : темнота, составляющих (в часах) 20 : 4, 17 : 7, 14 : 10 и 12 : 12, временные интервалы между сменой смежных первостепенных маховых перьев кратны трем суткам. При сопоставлении фазы трехсуточного биоритма с динамикой внешних атмосферных и гелиогеофизических процессов установлена наиболее значимая ее связь с экстремумами изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси. Таким образом, внешние факторы, на которые влияют экстремальные значения изменения скорости вращения Земли, могут быть синхронизаторами исследуемого биоритма.

Ключевые слова: инфрадианные биоритмы, синхронизаторы, линька, гормоны.

DOI: 10.31857/S0006302920010172

В настоящее время изучение временной организации биологических систем остается актуальной медико-биологической проблемой. По сравнению с суточными и сезонными, биологические ритмы в инфрадианном диапазоне (более 28 ч) и механизмы их синхронизации внутри организма и между разными особями недостаточно изучены.

По мнению ряда исследователей фактором, синхронизирующим инфрадианные биоритмы, являются вариации естественных низкочастотных электромагнитных полей, сопровождающие гелиогеофизические процессы [1]. В пользу этого утверждения приводятся факты совпадения околонедельной и околосесячной периодики физиологических показателей и индексов геомагнитной активности. Установлена связь среднесуточных значений B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) с ежесуточным количеством вызовов скорой помощи по поводу инфаркта миокарда [2]. Выявлена реакция эпифиза к слабым переменным электромагнитным полям.

Сокращение: ММП – межпланетное магнитное поле.

Так, при экспериментальном воздействии электромагнитного поля частотой 50 Гц и магнитной индукцией 100 мкТл у самцов крыс Вистар снижается продукция мелатонина в эпифизе и уровень этого гормона в сыворотке крови [3]. При естественных геомагнитных бурях, сопровождающихся изменением магнитной индукции в 100–200 нТл, также наблюдается снижение уровня мелатонина как у животных, так и у человека [4, 5].

Для выявления закономерностей инфрадианных биоритмов может быть использована оценка ритмичности процесса линьки у птиц. Замена первостепенных маховых перьев у воробьиных птиц происходит последовательно – от десятого, самого внутреннего, к первому, дистальному перу. Согласованность моментов начала роста новых маховых перьев в пределах одного крыла, а также синхронизация роста соответствующих маховых перьев на обоих крыльях во время линьки необходима для сохранения способности птицы к слаженному полету, что имеет важное значение для выживания птицы в естественной среде обитания [6].

У скворцов, находящихся в процессе линьки, была установлена связь околотрехсуточной ритмичности выпадения первостепенных маховых перьев с динамикой концентрации тироксина в сыворотке крови [7]. Известно, что для обеспечения достаточного для синтеза нового оперения уровня метаболизма у птиц в период линьки в крови значительно повышается концентрация гормонов щитовидной железы [8]. Индивидуальное изучение динамики смены оперения показало, что между началом роста смежных первостепенных перьев проходило, в зависимости от интенсивности линьки, определяющей в основном фотопериодом, либо шесть либо девять суток. При этом начало роста нового пера приходилось на акрофазу (момент времени в цикле, в котором наблюдается максимум показателя) трехсуточного ритма концентрации тироксина. Однако нельзя исключить возможные влияния на периодичность смены оперения и других ритмически изменяющихся факторов внутренней среды организма. Так, глюкокортикоидные гормоны, в отличие от тиреоидных, напротив угнетают пролиферацию эпителиальных клеток и рост пера [9, 10].

Работы, посвященные исследованию инфраниантных биоритмов концентрации гормона щитовидной железы, немногочисленны. Так, в исследовании на крысах показана ритмичность процессов метаболизма алкоголя с периодом 6 сут, которая обусловлена уровнем тироксина [11]. Нами был установлен околотрехсуточный биоритм концентрации гормонов щитовидной железы, достоверно выявляющийся в период интенсивного роста у самцов крыс Вистар и кроликов породы «Шиншилла» и в период линьки у обыкновенных скворцов (*Sturnus vulgaris*) [12]. Одновременное исследование динамики тиреоидных гормонов у перечисленных видов животных с учетом формы их суточной активности выявило синфазное проявление околотрехсуточного биоритма, что указывает на существование внешнего синхронизатора. Было установлено, что максимальный уровень гормонов щитовидной железы совпадал с экстремумами ежесуточного изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси, что указывает на возможную роль этого фактора в синхронизации биоритма. Однако это исследование было кратковременным и выполнено на данных мониторинга в течение нескольких месяцев одного года.

Таким образом, целью исследования было установить возможные внешние синхронизаторы околотрехсуточного биоритма смены оперения у воробьиных птиц на основе продолжительных исследований, проведенных в разные годы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование динамики линьки проводили в течение пяти лет (с 2013 по 2017 гг.).

В 2013 г. изучали влияние продолжительности светового дня на динамику смены оперения в процессе послебрачной линьки у самцов обыкновенной зеленушки (*Chloris chloris*) (19 особей), отловленных 22.06.2013 г. — 24.06.2013 г., и 12 первогодков полевого воробья (*Passer montanus*), взятых 25.06.2013 г. — 26.06.2013 г. из четырех разных гнезд второй кладки. Зеленушек содержали в отдельных клетках (40 × 30 × 30 см). Были сформированы четыре экспериментальные группы с разными режимами свет : темнота (в часах): 12 : 12, 14 : 10, 17 : 7, 20 : 4. Полевых воробьев содержали группой по четыре особи в клетке (60 × 60 × 60 см) при различных режимах освещения (свет : темнота, в часах): 12 : 12, 14 : 10, 17 : 7. Птиц разных экспериментальных групп содержали в отдельных помещениях, но акустический канал связи между особями сохранялся.

Летом в течение 2014–2016 гг. проводили исследование динамики смены оперения у зеленушек, живущих в природе. В июне 2015–2016 гг. регистрировали динамику начала роста перьев у обыкновенных поползней (*Sitta europaea*). Отлов птиц проводили утром на прикормке. Датой начала роста пера считали момент появления пигментации и набухания в области перьевого зачатка, что наблюдается у воробьиных птиц за трое суток до выпадения старого первостепенного махового пера. Момент начала роста пера у пойманных птиц определяли после измерения длины трубочки нового пера, исходя из того, что выпадение махового пера наблюдается при достижении новым середины глубины перьевого сумки, после чего суточный прирост перьевого трубочки постоянен в течение последующих шести-восьми суток.

Данные по началу роста первостепенных маховых перьев за период с марта по май 2015 г. были получены от самцов зеленушек ($n = 9$) и щеглов *Carduelis carduelis* ($n = 10$), предварительно отловленных в природе, которые 3 января 2015 г. были переведены на пятнадцатичасовой искусственный световой режим, эффективный для развития гонад. Благодаря более раннему достижению готовности к размножению такие птицы также раньше положенного срока начинают послебрачную линьку [13]. На следующий год исследование было проведено на 22 самцах зеленушек, переведенных на пятнадцатичасовой фотопериод 22, 25, 26 и 28 декабря 2015 г. соответственно, в разной фазе двенадцатисуточного инфранианного биоритма. Динамику начала роста первостепенных маховых перьев весной 2017 г. исследовали у самцов зеленушек ($n = 24$), переведенных на пятнадцатичасовой фотопериод

22, 23 и 24 декабря 2016 г. (по восемь особей в день) соответственно в разные фазы трехсуточно-го биоритма.

Всех задействованных в эксперименте птиц содержали в условиях искусственного освещения интенсивностью около 1000 лк на уровне жердочек от источника с цветовой температурой 4200 К. Во всех схемах автоматического включения и выключения света середина темнового периода приходилась на полночь.

Выпадение первостепенных маховых перьев у птиц в неволе регистрировали ежедневно в конце светового периода. У особей, проявляющих высокую двигательную активность, старые перья, не задерживаясь, выпадали сразу после достижения нового перьевого зачатка длины 3–4 мм (середина глубины перьевого сумки). У малоподвижных особей, в основном полевых воробьев, старое перо иногда не выпадало дольше, поэтому для более точного определения момента начала роста нового пера птиц брали в руки и измеряли длину растущих перьевых трубочек.

Нужно учитывать, что изменение тренда показателя количества перьев, начавших рост в определенную календарную дату, при регистрации в лабораторных условиях определяется числом птиц, вступивших в линьку. При регистрации в природе от одной пойманной птицы полученные даты начала роста новых перьев распределяются на восемь-девять предыдущих дней, так как оценка начала роста пера осуществляется ретроспективно, по длине трубочки нового пера. Таким образом, число птиц, пойманных в один день, не определяет увеличение исследуемого показателя в какой-либо определенный день, а распределяется равномерно на окно в восемь-девять дней и определяет только увеличение тренда динамики количества перьев, начавших рост за предыдущую декаду. В 2014 г. и 2016 г. поимку птиц осуществляли более или менее равномерно, а в 2015 г. – сериями, что не привело к какому-либо изменению трехсуточной динамики исследуемого показателя, как будет описано в подразделе «Динамика смены первостепенных маховых перьев у разных видов воробьиных птиц».

Динамику двигательной активности регистрировали у находившихся в одной клетке трех самцов зеленушек и индивидуально содержавшегося в отдельном помещении самца поползня с помощью разработанной К.Л. Кравченко с соавторами системы [14], состоящей из камеры, персонального компьютера и программы анализа последовательных изображений на долю пикселей, изменивших свою интенсивность в интервале 10 с в выделенной области регистрации движения. Показатели суммарной суточной двигательной активности были получены путем суммации услов-

ных единиц двигательной активности за каждые 10 с.

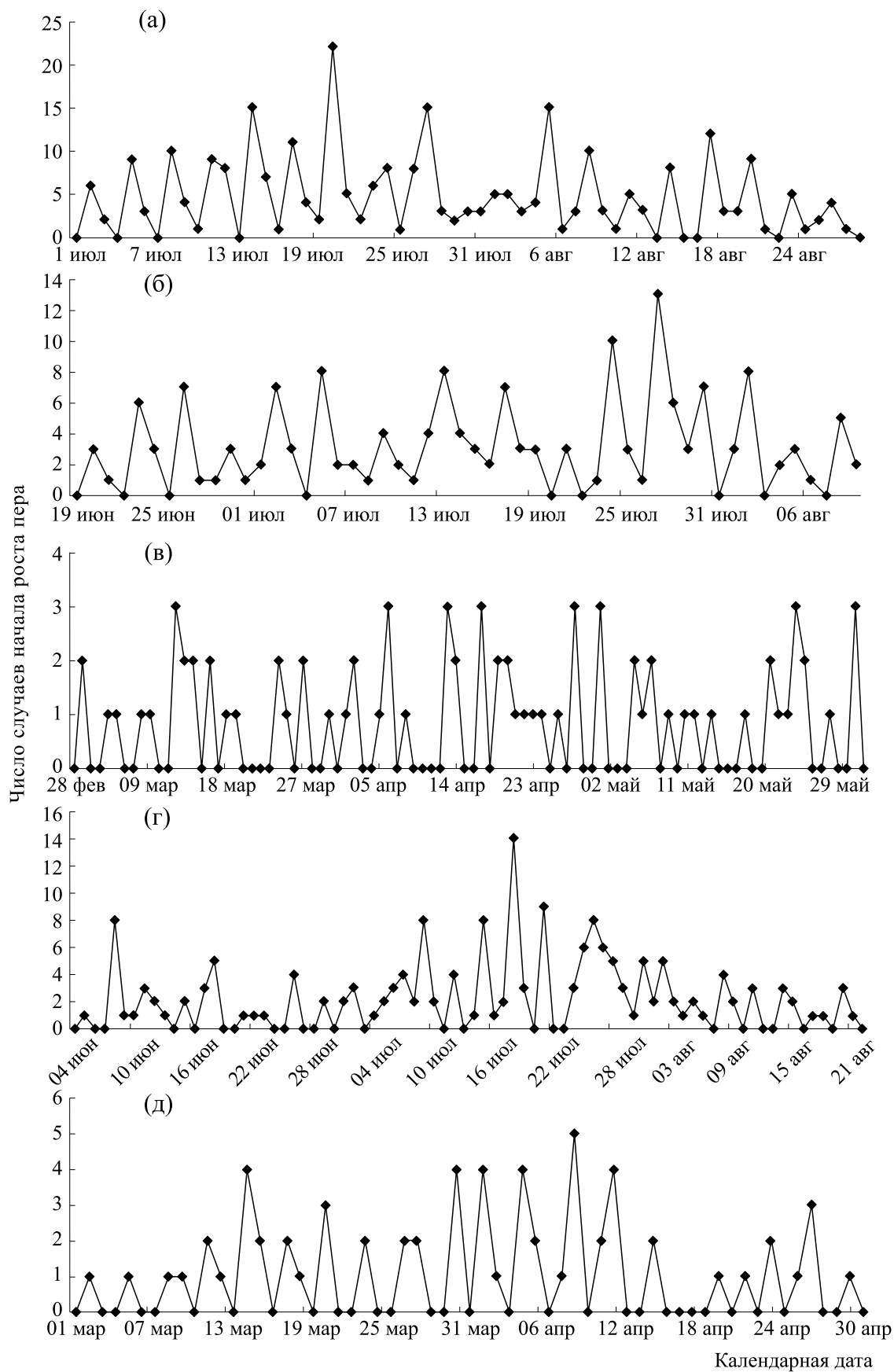
Данные о смене знака среднего магнитного поля Солнца, определяемого как суммарный магнитный поток с диска Солнца, и смены секторов межпланетного магнитного поля брали с сайта Wilcox Solar Observatory (<http://wso.stanford.edu>). Ежесуточные данные об атмосферном давлении и о среднесуточной температуре воздуха были взяты из базы данных Всемирной метеорологической организации (WMO) (<http://www.wmo.int>). Показатели скорости вращения Земли вокруг своей оси даны на сайте Международной службы вращения Земли (<http://www.iers.org>). Значения B_z -компоненты ММП и A_p -индекса геомагнитной активности взяты с сайтов <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> и <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc> соответственно.

Для выявления связи ритмичности смены оперения с динамикой факторов внешней среды проводили их спектральный анализ, а также строили распределение числа случаев начала роста перьев относительно экстремума физического параметра, так как внешний синхронизатор биоритмов не обязательно должен строго коррелировать с динамикой биологического параметра, достаточно лишь совпадение его экстремальных значений с определенной фазой биоритма. Нужно отметить, что скорость вращения Земли вокруг своей оси очень хорошо прогнозируется (<http://www.iers.org>), а реально измеренные значения иногда имеют «случайные» выбросы. Поэтому анализ проводили как относительно прогнозных дат экстремума изменения скорости вращения Земли, так и относительно реально зарегистрированных. В случае если два смежных дня имели одинаковые пиковые значения изменения скорости вращения Земли, экстремумом считали первый из них. Вероятность неслучайного совпадения экстремумов изменений скорости вращения Земли с максимумами динамики количества перьев, начавших рост, оценивали по χ -тесту для оценки двух выборочных долей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика смены первостепенных маховых перьев у разных видов воробьиных птиц. На рис. 1 представлены календарные даты начала роста первостепенных маховых перьев в процессе линьки у разных видов птиц.

На рис. 2 приведена гистограмма, построенная на основе представленных на рис. 1 данных и дающая представление о распределении амплитуд флуктуаций числа случаев начала роста пера, определяемых как $\Delta_i = |x_{i+1} - x_i|$, где x_i – i -е значение временного ряда.



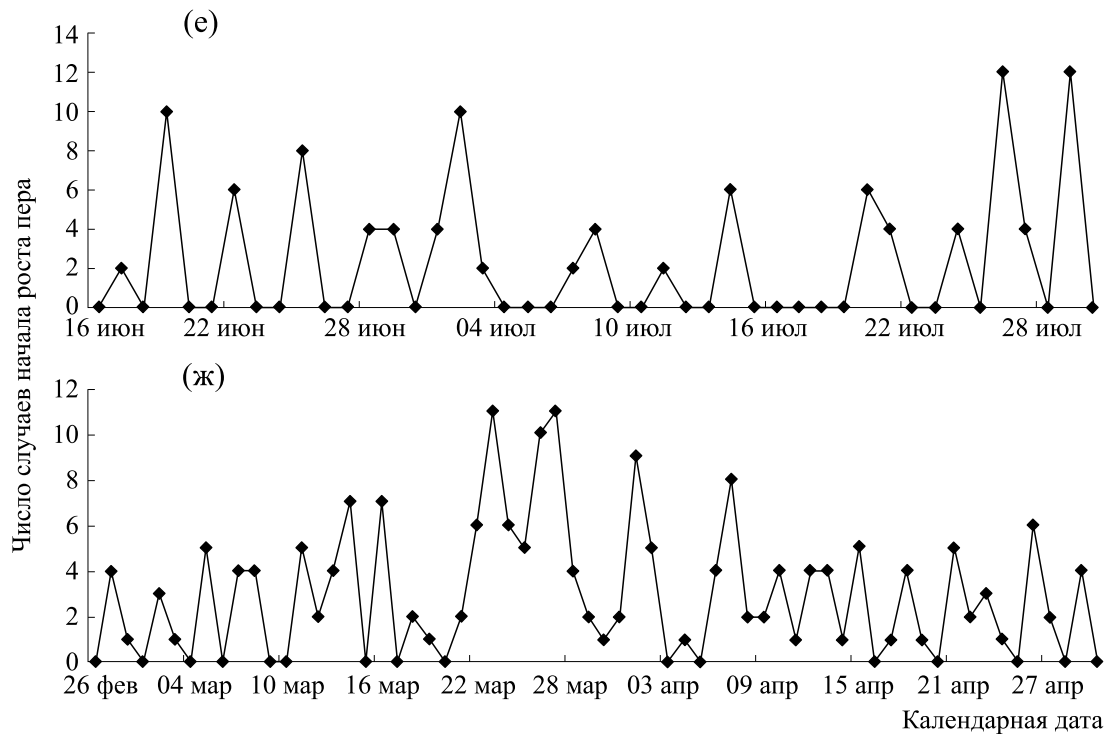


Рис. 1. Календарные даты начала роста первостепенных маховых перьев в процессе линьки у птиц разных видов. По оси абсцисс — календарная дата, по оси ординат — число случаев начала роста пера. (а) — Зеленушки и полевые воробьи в неволе, 2013; (б) — зеленушки в природе, 2014; (в) — зеленушки и щеглы в неволе, 2015; (г) — поползни в июне и зеленушки в июле-августе в природе, 2015; (д) — зеленушки в неволе, 2016; (е) — поползни в июне и зеленушки в июле в природе, 2016; (ж) — зеленушки в неволе, 2017.

Полученная зависимость хорошо аппроксимируется степенной функцией вида

$$N(x) = 243.2x^{-1.69}, \quad (1)$$

где x — амплитуда флуктуаций. Данная аппроксимирующая кривая на рис. 2 обозначена как $N(x)$. Там же для сравнения дана кривая, соответствующая распределению Пуассона с параметром, равным 1.3, которая наиболее близка к исходному распределению.

Для нахождения спектра динамики количества начал роста первостепенных маховых перьев для каждого из временных массивов (рис. 1а–ж) на основе быстрого преобразования Фурье были рассчитаны индивидуальные спектры, которые после этого почленно суммировали, в результате

был получен суммарный спектр, представленный на рис. 3.

Координаты пика спектра, представленного на рис. 3, равны 3.06 суток. Основываясь на том, что частотное разрешение по периоду примерно равно величине, обратной временному интервалу, на котором получены отсчеты сигнала и равному 40–60 суток, мы можем получить оценку точности определения представленного на рис. 1 периода как 3.06 ± 0.1 суток.

Динамика смены оперения у группы зеленушек и воробьев, содержащихся в разных помещениях, представлена на рис. 4. Для определения синхронности представленных на рис. 4 кривых использовали функцию

$$S(x_i, y_i | i = 1 \dots N) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \text{sgn} \{ (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i) \}, \quad (2)$$

где

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Данная функция в общем случае позволяет оценить степень сонаправленности двух кривых, а в случае, если x_i и y_i являются функциями времени, — синхронность изменений их динамики. В

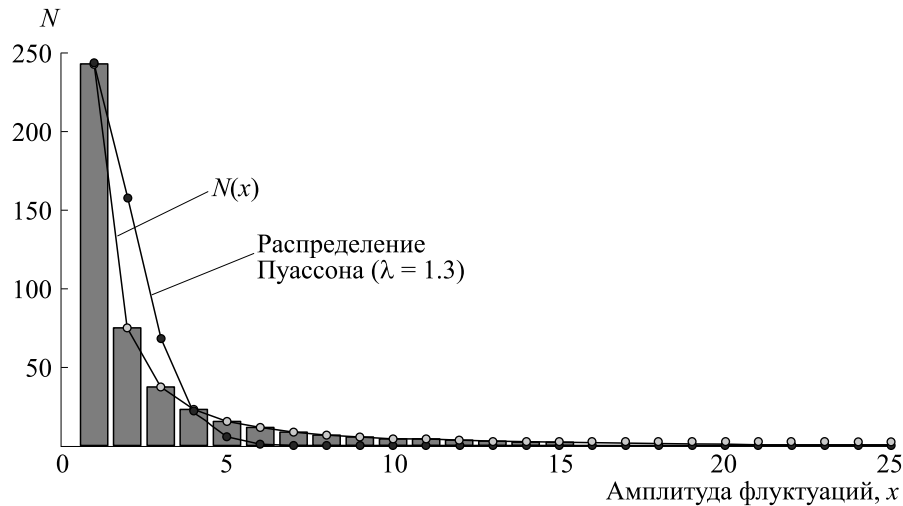


Рис. 2. Суммарное распределение амплитуд флуктуаций, построенное на основе временных рядов, представленных на рис. 1. По оси абсцисс даны значения величин амплитуд флуктуаций, определяемых как $\Delta_i = |x_{i+1} - x_i|$, где x_i – i -е значение временного ряда; по оси ординат – число случаев встречаемости данного значения амплитуды флуктуаций (Δ_i).

случае полной синхронности хода двух кривых $S = 1$. В случае полной асинхронности $S = 0$. Очевидно, что для реальных кривых полная синхронность и полная асинхронность реализуются достаточно редко. Для рассматриваемых нами кривых, показанных на рис. 4, $S = 0.9$, что говорит об очень высокой степени их синхронности. Таким образом, околотрехсуточный ритм, наблюдающийся в процессе смены первостепенных маховых перьев, у разных видов синхронен.

Известно, что темп смены оперения при линьке зависит от длины светового дня: чем короче фотопериод, тем интенсивней обновляется перьевой покров птицы. Этот феномен объясняется работой приспособительного механизма фотопе-

риодического контроля смены оперения у птицы, благодаря которому обеспечивается подстройка сроков окончания линьки до наступления осенних неблагоприятных условий [15]. В нашем исследовании у птиц, содержащихся на длинном фотопериоде (освещение 20 ч в сутки), медиана временного интервала между сменой смежных первостепенных маховых перьев составила 15 суток, а у особей, содержащихся при 14- и 17-часовом фотопериоде – 9 суток, тогда как при 12-часовом фотопериоде – 6 суток (рис. 5). Все эти временные интервалы кратны трем суткам, что указывает на общность регуляции ритма смены оперения в широком диапазоне фотопериодов, вероятно, связанной с трехсуточным биоритмом

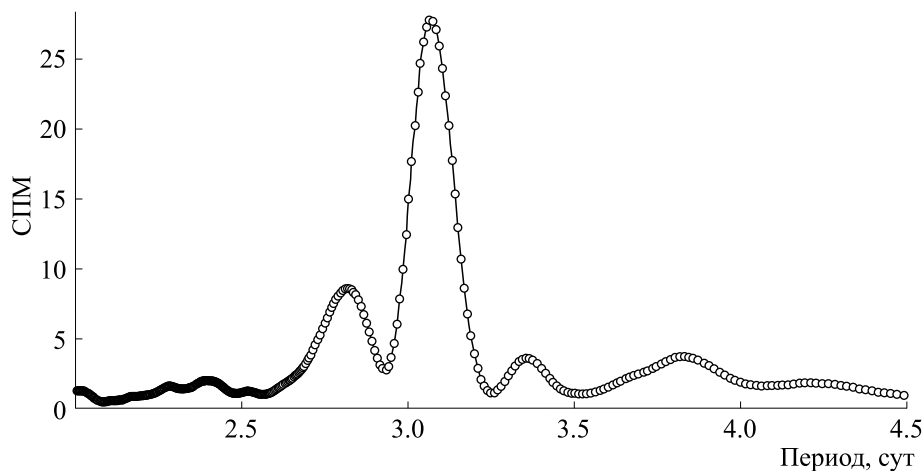


Рис. 3. Суммарный спектр, полученный суммированием индивидуальных спектров, построенных на основе временных рядов, представленных на рис. 1.

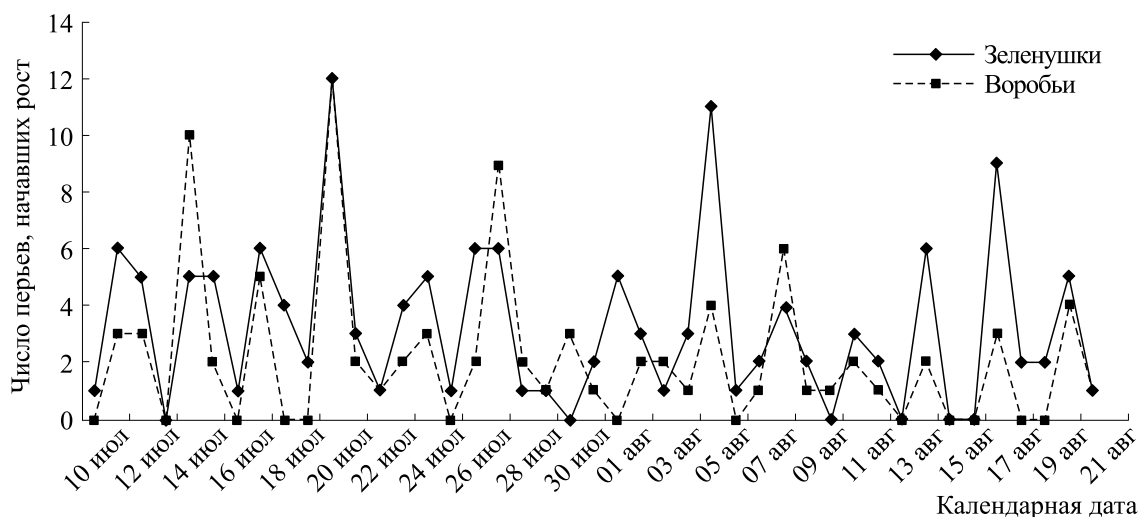


Рис. 4. Динамика смены первостепенных маховых перьев у группы зеленушек и воробьев, содержащихся в разных помещениях, в период с 10 июля по 21 августа 2013 г. По оси абсцисс – календарная дата, по оси ординат – число перьев начавших рост.

изменения концентрации гормонов щитовидной железы.

Однако нужно отметить, что после резкого сокращения светового дня (перевод птиц с постоянного освещения на 12-часовой фотопериод и с 17-часового на 8-часовой режим освещения) между сменой смежных первостепенных маховых перьев проходило либо 1.5–2, либо 4–4.5 суток. Полагаем, что этот факт поможет более глубоко разобраться в механизмах формирования и синхронизации инфрадианных биоритмов смены оперения и концентрации гормонов щитовидной железы.

Таким образом, установленный нами факт синхронного проявления околотрехсуточного ритма смены оперения у двух видов птиц и наблюдающаяся при разной интенсивности линьки кратность интервала между сменой последовательных первостепенных маховых перьев трем суткам могут указывать на существование у птиц очень точно поддерживаемого эндогенного ритма, который синхронизируется внутри популяции посредством взаимодействия отдельных особей между собой и даже между разными видами. Однако исследованные виды птиц отличаются по образу жизни, кормовой базе, а также срокам и продолжительности периода размножения, поэтому трудно предположить возможную целесо-

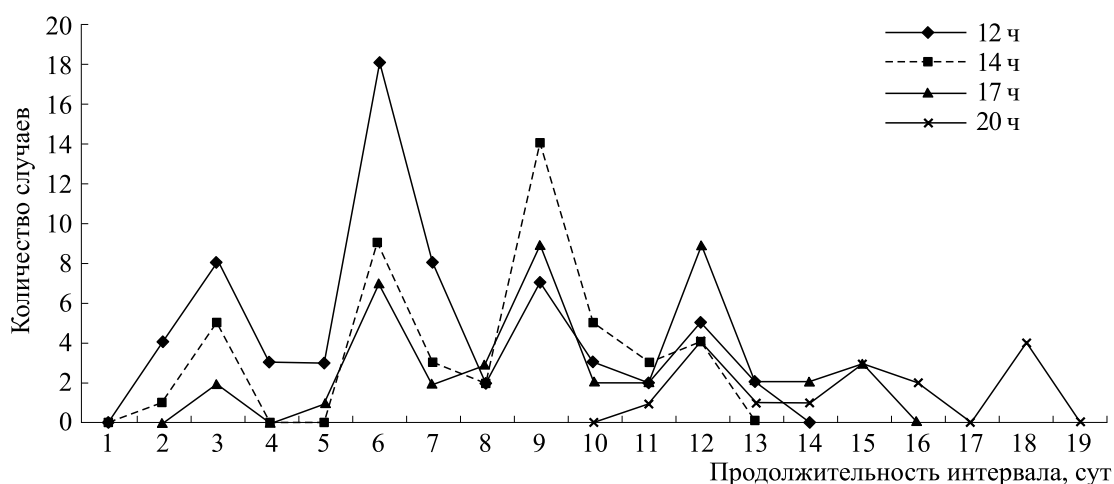


Рис. 5. Продолжительность временных интервалов между сменой смежных первостепенных маховых перьев при содержании птиц в условиях разного фотопериода. По оси абсцисс – продолжительность интервала (в сутках), по оси ординат – количество случаев.

образность синхронизации эндогенного ритма между этими видами. Более того, нами был показан синфазный характер околотрехсуточного ритма концентрации гормонов щитовидной железы у кроликов и скворцов [12]. Эволюционно класс млекопитающих разошелся с классом птиц 310 млн лет назад [16], поэтому крайне маловероятно, что синфазность этого ритма у кроликов и скворцов сохранилась только на основе эндогенных механизмов. С большой степенью вероятности можно утверждать, что существуют один или несколько внешних синхронизаторов этого биоритма. В настоящей работе мы предприняли попытку установить эти внешние синхронизаторы.

Связь фазы околотрехсуточного биоритма смены оперения с экстремумами скорости вращения Земли и сменой знака межпланетного магнитного поля. Для всех серий наблюдений, среди рассмотренных внешних факторов, нами установлена связь моментов начала роста первостепенных маховых перьев с расчетными прогнозируемыми экстремумами изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси (рис. 6а). Представленные на данном рисунке графики получены путем распределения методом наложенных эпох количества случаев начала роста новых перьев относительно прогнозируемых дат экстремумов изменения скорости вращения Земли.

Максимальное количество зарегистрированных моментов начала роста первостепенных перьев наблюдается за трое суток, в момент и через трое суток относительно прогнозируемого экстремума изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси. На рис. 6б (кривая 2) приведен график, полученный суммированием кривых, представленных на рис. 6а. Так, в нулевой день получено 219 случаев начала роста новых перьев, а в среднем на каждый день полученного распределения приходится 129 событий. Так как при подсчете суммировали данные и по отловленным в природе птицам, мы представляем распределение числа отловленных птиц относительно дат экстремума изменения скорости вращения Земли (рис. 6в).

Также мы выполнили распределение методом наложенных эпох количества случаев начала роста новых перьев относительно реальных дат экстремумов изменения скорости вращения Земли (рис. 6б, кривая 1). Можно заметить, что численные различия между максимумами и минимумами сократились, но характер распределения сохранился: на нулевой день приходится 205 случаев начала роста новых перьев, а в среднем на каждый день полученного распределения приходится 150 событий.

Мы выполнили оценку вероятности совпадения экстремумов изменения скорости вращения Земли с максимумами динамики количества на-

чавших рост перьев, имеющей околотрехсуточный ритм. Методом наложенных эпох выполнено распределение максимумов динамики числа начавших рост перьев относительно экстремума изменения скорости вращения Земли. Оказалось, что за сутки до прогнозного экстремума изменения скорости вращения Земли зарегистрировано 11 максимумов, в день экстремума — 35 максимумов, а через сутки после дня экстремума — 8 максимумов динамики числа начавших рост перьев. Таким образом, совпадения прогнозируемых экстремумов изменений скорости вращения Земли с максимумами динамики количества начавших рост перьев зарегистрированы в 35 случаях (65%) при средней вероятности совпадения 33%; по z -тесту для оценки двух выборочных долей, эти доли статистически значимо различаются между собой с $p = 0.002$. Совпадения реально измеренных экстремумов скорости вращения Земли с максимумами в динамике количества начавших роста перьев отмечены в 55% случаев. По z -тесту для оценки долей эта доля статистически значимо отличается от средней с $p = 0.03$. Таким образом, нами установлены совпадения максимумов в динамике числа перьев, начавших рост, как с прогнозными, так и с реальными экстремумами изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси, однако для прогнозных эта закономерность более выражена и имеет большую степень достоверности.

Также для всех серий наблюдений с использованием метода наложенных эпох установлена связь моментов начала роста нового пера с моментами смены знака с минуса на плюс среднего магнитного поля Солнца (рис. 7а). Максимальное число случаев начала роста новых перьев, равное 98 случаям, отмечено через сутки после смены знака этого физического параметра (рис. 7б, кривая 1) при среднем уровне в 61 случай и общем количестве случаев 606.

Аналогичная связь динамики начала роста первостепенных маховых перьев выявлена с моментами смены границ секторной структуры ММП с минуса на плюс (рис. 7б, кривая 2). Так, максимальное число случаев начала роста перьев (53 случая) отмечено через сутки после смены знака ММП с минуса на плюс при среднем уровне 33 случая в сутки и общем количестве случаев, равном 333.

Тем не менее использование методики, которая привела к результатам, представленным на рис. 6 и 7, для исследования околотрехсуточной ритмичности в динамике атмосферного давления, температуры воздуха, A_p -индекса геомагнитной активности и B_z -компоненты ММП не выявило связи моментов начала роста первостепенных маховых перьев с перечисленными параметрами.

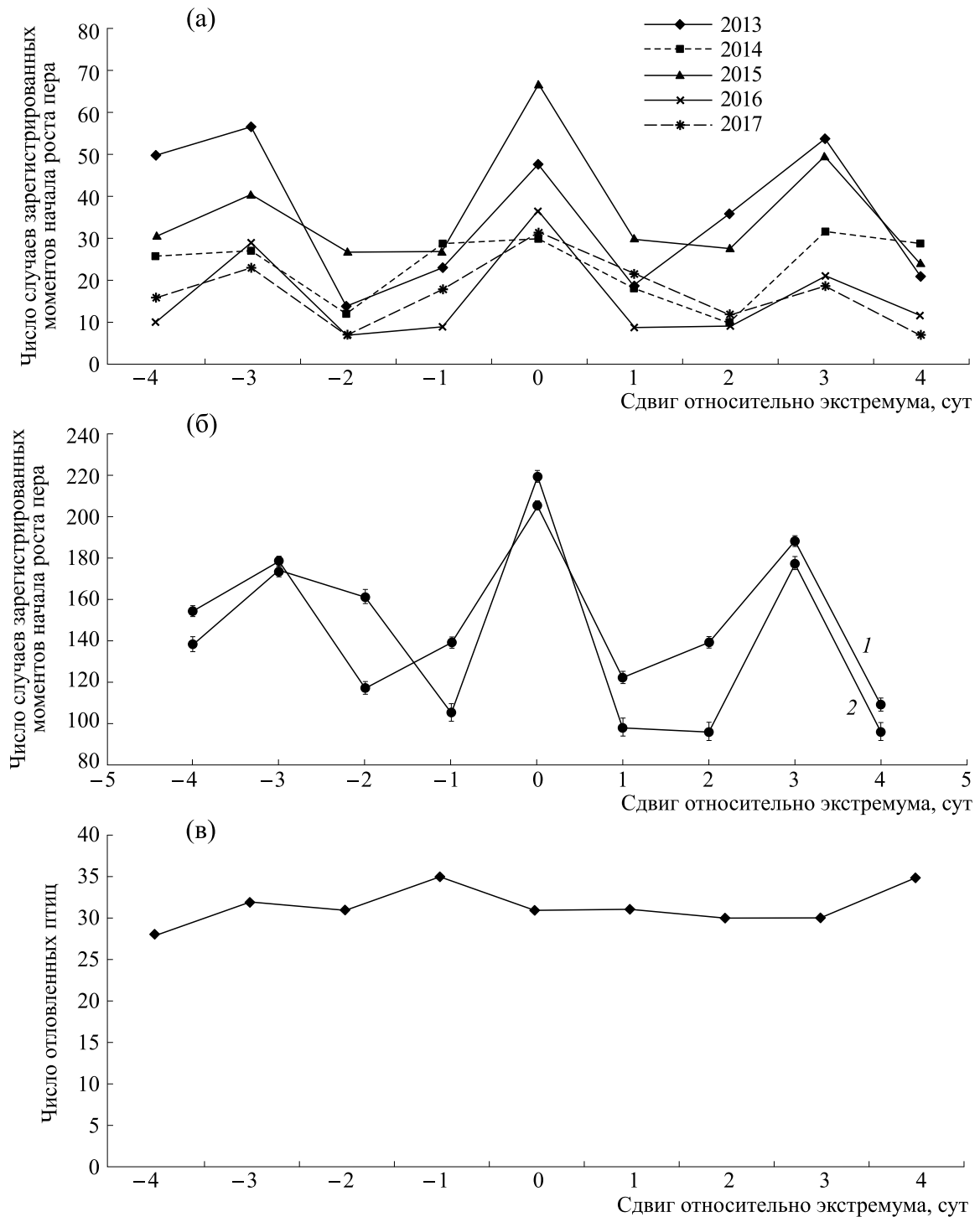


Рис. 6. Распределение методом наложенных эпох количества случаев начала роста первостепенных маховых перьев относительно прогнозных дат экстремума изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси в разные годы (а), суммарно за 2013 – 2017 гг. (б, кривая 2) и числа отловленных птиц (в), а также количества случаев начала роста первостепенных маховых перьев относительно реальных дат экстремума изменения скорости вращения Земли вокруг своей оси; по оси ординат: (а) и (б) – число случаев зарегистрированных моментов начала роста пера, (в) – число отловленных птиц. Указаны стандартные ошибки.

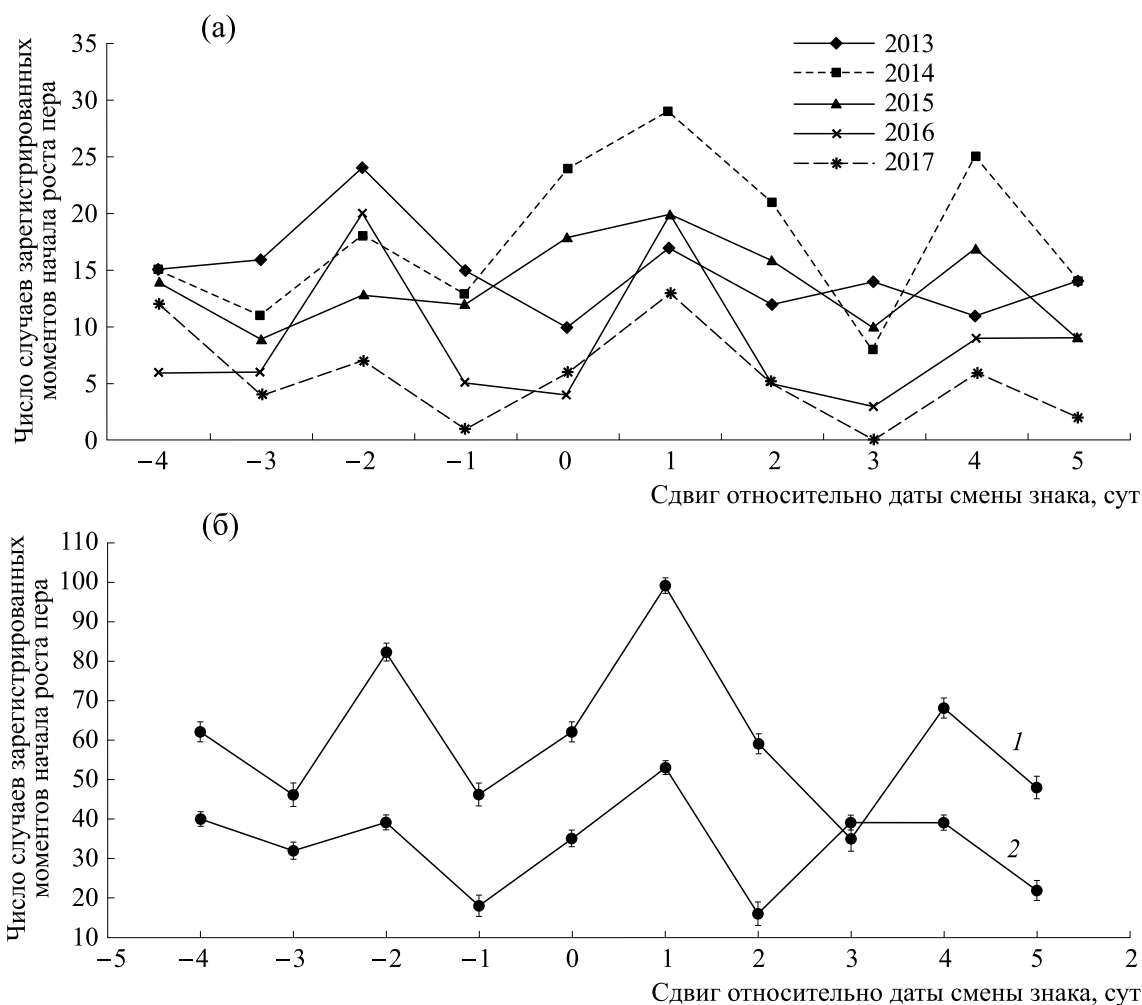


Рис. 7. Распределение методом наложенных эпох количества случаев начала роста первостепенных маховых перьев относительно даты смены знака среднего магнитного поля Солнца с минуса на плюс за разные годы (а), суммарно за 2013 – 2017 гг. (б, кривая 1) и относительно даты смены границы секторной структуры ММП с минуса на плюс (б, кривая 2). По оси абсцисс – сдвиг (в сутках) относительно даты смены знака; по оси ординат – число случаев зарегистрированных моментов начала роста пера. Указаны стандартные ошибки.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе нами установлено, что динамика смены первостепенных маховых перьев у особей разных видов как в природных условиях, так и содержащихся в широком диапазоне фотопериодов (от 20 до 12 часов) имеет период, равный 3.06 ± 0.1 суток. Применение метода наложенных эпох позволило выявить связь около-трехсуточного биоритма смены первостепенных маховых перьев с экстремумами скорости вращения Земли вокруг своей оси и с изменением знака с минуса на плюс среднего магнитного поля Солнца и межпланетного магнитного поля.

Нужно отметить, что экстремумы изменения скорости вращения Земли наблюдаются примерно каждые пять-девять суток, тогда как смена знака ММП с минуса на плюс происходит реже, один-два раза в месяц. Таким образом, более ве-

роятно, что синхронизатором этого биоритма является физический фактор, тесно связанный с изменением скорости вращения Земли вокруг своей оси.

Ранее установлена система 12.175- и 4.058-суточных биоритмов митотической активности эпителия пищевода и концентрации глюкокортикоидных гормонов и связанной с ней локомоторной активности у млекопитающих и птиц [17, 18]. Также 12.175- и 4.058-суточная периодичность установлена в ряде гелиогеофизических и погодных факторов [19]. С целью установления общности природы синхронизатора инфрадианных ритмов представляется важным сопоставить фазы 4.058-суточных и околотрехсуточных биоритмов.

Исследование взаимосвязи этих инфрадианных биоритмов проводили с 26 февраля по 30 ап-

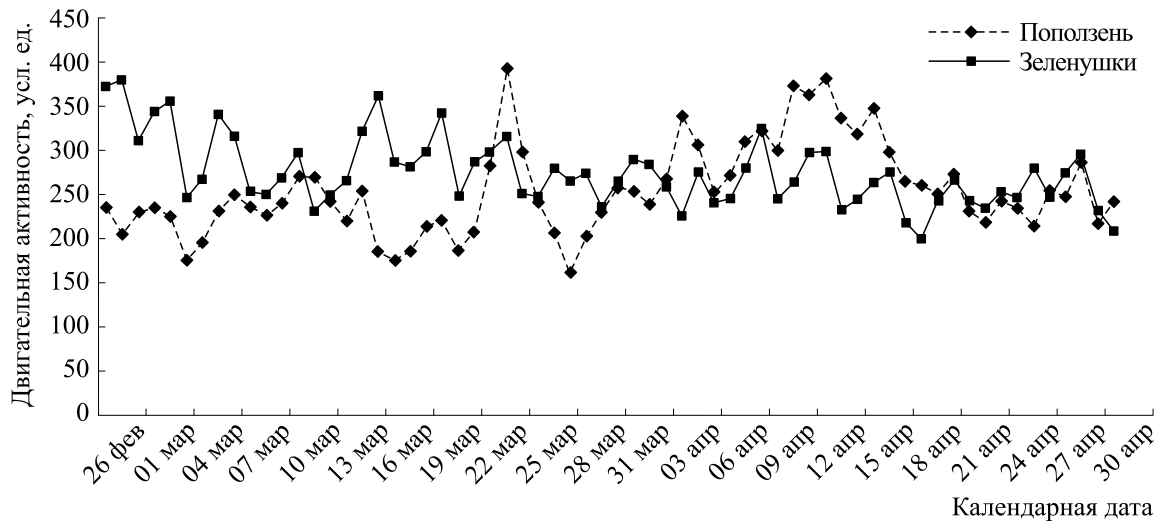


Рис. 8. Динамика суммарной суточной двигательной активности самца поползня и трех самцов зеленушек. По оси абсцисс — календарные даты; по оси ординат — двигательная активность, усл. ед.

реля 2017 г. Фазу околотырёхсуточных биоритмов определяли по динамике интенсивности суточной двигательной активности птиц. Подходящими объектами оказались содержащийся в индивидуальной клетке самец поползня и три совместно живущих самца зеленушки. Вероятно, у зеленушек социальные контакты с проявлением доминирующего поведения одних особей над другими благоприятствуют проявлению околотырёхсуточной ритмичности суммарной двигательной активности. Динамики интенсивности суточной двигательной активности у группы зеленушек и одного поползня, содержащихся в разных помещениях, имели четырёхсуточную периодичность, синхронную между собой — коэффициент сонаправленности равен $S = 0.7$ (рис. 8). Максимумы активности отмечались 1–2, 5–6, 10, 15, 19, 23, 26–28 и 31 марта, 4, 8, 11–12, 16, 20, 25 и 28 апреля 2017 г. В период 14–15 марта наблюдалось смещение акрофазы околотырёхсуточного биоритма на сутки вперед, а с 19 марта по 30 апреля четырёхсуточный ритм двигательной активности сохранял свою фазу. При этом параллельно регистрируемый у группы зеленушек ($n = 24$) околотрёхсуточный биоритм смены первостепенных маховых перьев (рис. 1ж) в период с 26 февраля по 13 апреля, напротив, не изменял своей фазы. Таким образом, фазовая взаимосвязь околотрёхсуточного и околотырёхсуточного ритмов отсутствует, что указывает на разную природу синхронизаторов инфрадианных ритмов двигательной активности и смены оперения. Аналогичный вывод был получен при исследовании взаимосвязи инфрадианных биоритмов глюкокортикоидных и тиреоидных гормонов у кроликов [12].

Следует отметить, что при раздельном содержании в индивидуальных клетках после помещения на эффективный для развития гонад 15-часовой фотопериод молодые тусклоокрашенные самцы зеленушек начали линять через 77–83 суток, средние через 89–93 суток, а яркие доминантные особи — через 101–102 суток. Однако при содержании по три особи в клетке наиболее супрессированные особи начали линьку через 65–68 суток, средние через 78–80 суток, а доминантные — через 89–93 суток, что в среднем на 12 суток раньше соответствующих сроков для птиц, содержащихся в индивидуальных клетках [20]. Таким образом, в разности индивидуальных продолжительностей репродуктивного периода четко прослеживается кратность 12 суткам. Вероятно, данный факт указывает на то, что отсчет продолжительности репродуктивного периода в организме птиц осуществляется 12-суточными временными интервалами, механизм которого пока неизвестен.

В рамках настоящего исследования прямая связь между ежесуточным изменением скорости вращения Земли и количеством первостепенных перьев, начавших рост, отсутствует. Связь этих показателей определяется через совпадение экстремумов изменения скорости вращения Земли с отдельными акрофазами околотрёхсуточного биоритма смены оперения. На графике распределения количества перьев, начавших рост относительно экстремума изменения скорости вращения Земли (рис. 6), максимальное значение отмечается не только в данный день, но и за трое суток до и после этого события, что указывает именно на явление синхронизации околотрёхсуточного биоритма этим внешним фактором, а не на прямую зависимость количества перьев, начавших

рост от изменения скорости вращения Земли. Подобно тому, как циркадианная система биоритмов синхронизируется режимом смены дня и ночи, околотрехсуточные биоритмы синхронизированы внешним фактором, сопряженным с изменением скорости вращения Земли вокруг своей оси.

Как отмечалось выше, в качестве основного ритмозадающего периода мы рассматриваем околотрехсуточный ритм. Обнаружение связи данного периода с экстремумами флуктуаций скорости вращения Земли ставит задачу рассмотрения спектра периодов таких флуктуаций для анализируемого в настоящей работе инфрадианного диапазона. Эта задача была изучена в работе [21], где было показано существование набора периодов 9.1, 13.7 и 27.3 суток. Первые два из них можно рассматривать, как третьемесечную и полумесечную гармоники периода 27.3 суток. Найденный нами период, как легко видеть, в пределах точности близок к девятой гармонике периода 27.3 суток, составляющей 3.03 суток. В то же время в исследованных нами спектрах периоды 9.1 и 13.7 суток как правило отсутствуют. Изредка встречаются близкие к ним периоды, но их амплитуда как минимум на порядок меньше периода 3.06 ± 0.1 суток.

Несмотря на то что околотрехсуточный период хорошо вписывается в рассматриваемый спектр, предположение о прямом воздействии лунно-солнечных приливных сил, обуславливающих неравномерное вращение Земли и ответственных за появление рассматриваемого спектра периодов, кажется маловероятным в силу их чрезвычайной малости. Рассмотрим возможный механизм опосредованного действия околотрехсуточного периода на биосистемы.

Как отмечается в работе [22], неравномерность скорости вращения Земли является механизмом, который поддерживает и служит энергетической «подпиткой» собственных колебаний Земли. В свою очередь, как показано в ряде работ [23–28], собственные колебания Земли модулируют практически все параметры биосферы: микрофлуктуации электрического и магнитного полей Земли, атмосферного давления, уровня грунтовых вод и т.д. Спектры периодов, совпадающие со спектральными составляющими спектра собственных колебаний Земли, найдены во временных рядах флуктуаций скорости α -распада [29], шумов в электронных приборах [30]. Частоты, принадлежащие спектру собственных колебаний Земли, обнаружены также при исследованиях различных биологических систем [31].

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что предполагаемый механизм проявления рассматриваемого околотрехсуточного периода, связан с периодическим влиянием неравномерно-

стей в скорости вращения Земли на амплитуды спектральных компонент ее собственных колебаний, которые, в свою очередь, через параметры среды обитания воздействует на динамику исследуемых биосистем. Однако выявить, какой именно внешний фактор является синхронизатором исследуемого биоритма, можно только путем постановки эксперимента с экранированием от возможных вторичных физических посредников, влияющих на биологические системы.

ВЫВОДЫ

1. В динамике смены оперения у особей разных видов, как в природных условиях, так и при содержании в широком диапазоне фотопериодов (от 20 до 12 часов), проявляется период, равный 3.06 ± 0.1 суток.

2. Методом наложенных эпох выявлена связь околотрехсуточного биоритма смены первостепенных маховых перьев с экстремумами скорости вращения Земли вокруг своей оси и с изменением знака с минуса на плюс среднего магнитного поля Солнца и межпланетного магнитного поля.

3. Фазовая взаимосвязь околотрехсуточного биоритма двигательной активности и околотрехсуточной ритмичности смены оперения отсутствует, что указывает на то, что внешние синхронизаторы этих биоритмов различны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИПЭЭ РАН АААА-А18-118042690110-1.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. С. Мартынюк и Н. А. Темуриянц, Геофизические процессы и биосфера **8** (1), 36 (2009).
2. Т. К. Бреус, Ф. Халберг и С. Ж. Корнелиссен, Биофизика **40** (4), 737 (1995).
3. B. Selmaoui and Y. Touitou, Life Sci. **64** (24), 2291 (1999).
4. С. И. Рапопорт, Н. Д. Большакова, Н. К. Малиновская и Т. К. Бреус, Биофизика **43** (4), 632 (1998).

5. A. Weydah, R. B. Sothorn, G. Cornelissen, and L. Wetterberg, *Biomed. Pharmacotherapy* **55**, 57 (2001).
6. В. Д. Ильичев, Н. Н. Карташев и И. А. Шилов. *Общая орнитология* (Высш. шк., М., 1982)
7. М. Е. Диатроптов, *Журн. общей биологии* **74** (5), 379 (2013).
8. N. E. Sуг, M. Wikelski, and L. M. Romero, *Physiol. Biochem. Zool.* **81** (4), 452 (2008).
9. И. А. Алов, *Очерки физиологии митотического деления клеток.* (Медицина, М., 1964)
10. L. M. Romero, D. Stochlic, and J. C. Wingfield, *Comp. Biochem. Physiol. Mol. Integr. Physiol.* **142** (1), 65 (2005).
11. J. Li, V. Nguyen, B. A. French, et al., *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.* **279** (1), 118 (2000).
12. М. Е. Диатроптов и М. А. Диатроптова, *Бюл. эксперим. биологии и медицины* **162** (12), 770 (2016).
13. В. Р. Дольник, *Миграционное состояние птиц* (Наука, М., 1975).
14. К. Л. Кравченко, А. А. Баженов, В. А. Воронов и М. В. Прикоп, в сб. *Космос и биосфера: тезисы докладов X Международной крымской конференции* (АРИАЛ, Симферополь, 2013).
15. В. Р. Дольник, Н. В. Виноградова и В. М. Гаврилов, *Популяционная экология зяблика* (Наука, Л., 1982).
16. S. Kumar and S. V. Hedges, *Nature* **392**, 917 (1998).
17. М. Е. Диатроптов, О. В. Макарова и М. А. Диатроптова, *Геофизич. процессы и биосфера* **13** (4), 82 (2014).
18. М. Е. Диатроптов, Дис. ... д-ра биол. наук (М., 2015).
19. А. А. Станкевич, Д. Ш. Джалилова и М. Е. Диатроптов, *Биофизика*, **63** (2), 392 (2018).
20. М. Е. Диатроптов, *Рус. орнитол. журн.* **25** (1345), 3699 (2016).
21. Н. С. Сидоренков, *Физика неустойчивостей вращения Земли* (Наука, М., 2001).
22. Е. И. Селюков и Л. Т. Стигнева, *Краткие очерки практической микрогеодинамики* (Питер, СПб., 2010).
23. Е. М. Линьков. *Сейсмические явления* (Изд-во ЛГУ, Л., 1987).
24. Е. М. Линьков, Л. Н. Петрова, Н. Г. Савина и Т. Б. Яновская, *ДАН СССР* **262** (2) 321 (1982).
25. Е. М. Линьков, Л. Н. Петрова и Д. Д. Зурошвили, *ДАН СССР* **306** (2) 314 (1989).
26. Л. Н. Петрова, *Биофизика* **37** (3), 508 (1992).
27. В. В. Александров, *Экологическая роль электромагнетизма* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2006).
28. Ю. В. Баркин, *Нелинейный мир* **5** (1–2), 101 (2007).
29. В. А. Панчелюга и М. С. Панчелюга, *Биофизика* **60** (2), 395 (2015).
30. Б. М. Владимирский и А. А. Конрадов, *Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В.И. Вернадского, сер. «Биология, химия»* **20** (59), № 1, 92 (2007).
31. Ю. П. Малышков и С. Ю. Малышков, *Биофизика* **60** (3), 589 (2015).

Dynamics of the Replacement of the Primary Flight Feathers of Passerine Birds, Possible Factors in Synchronization

M.E. Diatropov*, V.A. Panchelyuga**, and A.A. Stankevich**

*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 33, Moscow, 119071 Russia

**Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences,
ul. Institutskaya 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

The study to be reported here was undertaken to investigate the dynamics of the replacement of the primary flight feathers in several passerine bird species under natural and laboratory conditions. Birds were kept under different photoperiods in early stages of molting after breeding. The early onset of molting occurred when birds were moved in winter to the chamber with a 15-hour photoperiod, which was effective for gonadal development. Based on observations over five-year period of the birds subjected to all photoperiods under study, it was shown that in general, periodicity in the beginning of new flight feather development during passerine bird molting was about 3 days. Under a light-dark schedule (hrs), 20 light (L) : 4 dark (D), 17L : 7D, 14L : 10D and 12L : 12D, the time intervals between the replacement of adjacent primary flight feathers were multiples of 3 days. After a comparison of the phase of a 3-day biorhythm and the dynamics of external atmospheric and heliogeophysical processes, it was found that there is more significant relation between the extremums of changing the rotational speed of the Earth around its axis. Thus, these external factors, influenced by the extremums of changing the rotational speed of the Earth, can be considered synchronizers of the biorhythm of interest.

Keywords: infradian biorhythms, synchronizers, molting, hormones