

Обзорная статья / Review article

УДК 598.2 – 578.4

DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-92-100

Современное использование и перспективы метода стабильных изотопов для изучения циркуляции вируса гриппа птиц А с мигрирующими птицами

Ольга Р. Друзяка¹, Алексей В. Друзяка², Марина А. Гуляева^{3,4} , Фальк Хюттманн⁵,
Александр М. Шестопапов⁴

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт систематики и экологии животных, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, Новосибирск, Россия

⁵Университет Аляски Фэрбенкс, Фэрбенкс, Аляска

Контактное лицо

Марина А. Гуляева, Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины; 30117 Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 2; кафедра физиологии Новосибирского государственного университета; 630090 Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.
Тел. +79529136513

Email mgulyaeva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3945-5339>

Формат цитирования

Друзяка О.Р., Друзяка А.В., Гуляева М.А., Хюттманн Ф., Шестопапов А.М. Современное использование и перспективы метода стабильных изотопов для изучения циркуляции вируса гриппа птиц А с мигрирующими птицами // Юг России: экология, развитие. 2019. Т.14, N3. С.92-100. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-92-100

Получена 22 январь 2019 г.

Прошла рецензирование 14 марта 2019 г.

Принята 5 мая 2019 г.

Резюме

Цель. Трансмиссия патогенов – глобальное биологическое явление, тесно связанное с миграциями птиц. Анализ проводился с целью понимания и оценки перспективы применения метода стабильных изотопов (SIA) для изучения циркуляции вируса гриппа птиц А с мигрирующими птицами.

Обсуждение. Недостаточное количество данных о расстоянии миграции инфицированных птиц и их межпопуляционных связях оставляет открытым вопрос передачи высокопатогенного вируса гриппа (ВПВГ) в популяции диких птиц. Более глубокое изучение роли миграций в распространении ВПВГ, возможно, позволит эффективнее исследовать передачу вирусного патогена между особями на миграционных остановках и уточнит глобальные миграционные маршруты. Новые методические подходы позволяют получать более полное представление о географии и фенологии миграций, и последствиях миграционного поведения для биологии видов. Изучение количественной составляющей миграционных потоков, представляется более перспективным на основе анализа содержания стабильных изотопов (SIA) в тканях птиц. Данный метод используется для решения различных экологических задач, в том числе и изучения миграций животных.

Заключение. На основании литературных данных показано, что SIA перспективен для уточнения миграционных маршрутов птиц и количественной оценки их интенсивности. Разрешающей способности метода достаточно для определения миграционных путей носителей вирусных патогенов в масштабах зоогеографических подобластей и подробнее. Однако к настоящему моменту таких исследований немного, а на территории России их вовсе не проводилось. Возможно, расширение использования метода SIA выявит новые пути распространения вирусных инфекций птиц.

Ключевые слова

миграции птиц, методы трассирования миграций, стабильные изотопы, дикие водоплавающие птицы, зоонозы, вирус гриппа птиц.

©2019 Авторы. Юг России: экология, развитие. Это статья открытого доступа в соответствии с условиями Creative Commons Attribution License, которая разрешает использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.

Modern application and prospects of the stable isotopes method for studying avian influenza A virus transmission in migratory birds

Olga R. Druzyaka¹, Aleksey V. Druzyaka^{2,3}, Marina A. Gulyaeva^{3,4} , Falk Huettmann⁵ and Aleksandr M. Shestopalov⁴

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Systematics and Ecology of Animals, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁴Federal Research Centre of Fundamental and Translational Medicine, Novosibirsk, Russia

⁵University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA

Principal contact

Marina A. Gulyaeva, Novosibirsk State University; 2 Pirogova St, Novosibirsk, Russia 630090 & Federal Research Centre of Fundamental and Translational Medicine; 2 Timakova St, Novosibirsk, Russia 30117.

Tel. +79529136513

Email mgulyaeva@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3945-5339>

How to cite this article

Druzyaka O.R., Druzyaka A.V., Gulyaeva M.A., Huettmann F., Shestopalov A.M. Modern application and prospects of the stable isotopes method for studying avian influenza A virus transmission in migratory birds. *South of Russia: ecology, development*. 2019, vol. 14, no. 3, pp. 92-100. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2019-3-92-100

Received 22 Junyary 2019

Revised 14 March 2019

Accepted 5 May 2019

Abstract

Aim. The circulation and transmission of pathogens is a global biological phenomenon that is closely associated with bird migration. This analysis was carried out with the aim of understanding and assessing the prospects of using the stable isotope method to study the circulation and transmission of the avian influenza A virus via migratory birds.

Discussion. Insufficient data on the distances of migration of infected birds and their interpopulational relationships leaves open the question of the transmission of highly pathogenic influenza viruses (HPV) in the wild bird population. A deeper study of the role of migrations in the spread of HPV may possibly allow the more effective investigation of the transmission of the viral pathogen between individuals at migration stopover sites and the clarification of global migration routes. New methodological approaches are providing a more complete picture of the geography and phenology of migrations, as well as of the consequences of migratory behavior for species biology. The study of the quantitative component of migratory flows based on the analysis of the content of stable isotopes (SIMS) in bird tissues seems very promising. This method is being applied to the solution of various environmental issues, including the study of animal migrations.

Conclusion. Based on data from the scientific literature, it is shown that SIMS is promising for the clarification of bird migration routes and the quantification of their intensity. The resolving power of the method is sufficient to determine the migration pathways of carriers of viral pathogens on the scale of zoogeographic subdomains and in even further detail. However, to date, there have been few such studies: in Russia they have not been conducted at all. The increased use of the SIMS methodology may possibly reveal new ways in which viral infections are spread via birds.

Key Words

bird migrations, migration tracing methods, stable isotopes, wild waterfowl, zoonoses, avian influenza virus.

ВВЕДЕНИЕ

Миграция – регулярное сезонное перемещение особей, в том числе, между гнездовой и прочими частями ареала. Данный процесс широко распространен среди различных групп животных, и в особенности, среди птиц [1]. Для картирования миграционных перемещений животных разработан ряд методов, которые можно разделить на прямые и косвенные. Первые предполагают непосредственное наблюдение за перемещением особей (например, следование за птицей на летательном аппарате или тропление на снежном покрове) или специального внешнего маркера (кольца, разнообразные метки других типов), вторые – анализ естественных биологических или биогеохимических маркеров прошлых мест обитания особи [2].

На территории бывшего СССР, несмотря на обширные материалы наблюдений за мигрирующими птицами и их мечения (главным образом, кольцеванием) [3; 4], мы по-прежнему плохо знаем миграционные связи внутри ареала большинства видов. Наблюдения и учеты мигрирующих птиц дают представление об интенсивности и сроках пролета, но сами по себе ничего не сообщают о миграционных маршрутах конкретных особей. Вероятность повторного отлова птицы, мигрировавшей из места кольцевания невелика. Нередко между временем кольцевания и повторной встречи окольцованной птицы проходит несколько лет. Конечно, такие сведения дают некоторое представление о продолжительности жизни птиц, но они ничего не говорят о деталях каждого перелета [5]. Кроме того, накопленные в недавнем прошлом данные о миграциях частично требуют пересмотра в связи с изменением границ ареалов некоторых видов [6].

До середины 1990-х годов возможность устанавливать миграционные связи и давать оценку сезонной взаимосвязи, была ограничена традиционными методами отлова и кольцевания птиц. Однако, этот подход наиболее эффективен при применении к большим выборкам, обычно доступным только для охотничьих видов [7; 8]. Появление и развитие метода анализа стабильных изотопов в тканях животных (SIA) изменило эту ситуацию, поскольку с его помощью можно судить о месте гнездования или зимовки, а также времени перелета на основе только однократного контакта с птицей. Из-за относительной простоты отбора образцов и однократности контакта с птицей метод может применяться массово. В итоге, метод SIA оказывается принципиально новым инструментом, позволяющим реконструировать сами миграционные маршруты и их межгодовую динамику на популяционном уровне [9].

Интерес к феномену миграций животных, также, связан с их важной ролью в циркуляции различных паразитов, в том числе опасных для человека и сельскохозяйственных животных [10; 11]. Межвидовая передача патогенов в глобальном масштабе – одно из фундаментальных биологических явлений, тесно связанных с миграциями птиц, которое оказывает влияние, как на сами мигрирующие популяции, так и на другие виды, обитающие совместно с мигрантами. В число последних входит человек и сельскохозяйственные животные, поэтому проблема трансмиссии патогенов имеет не только фундаментальное, но и весьма острое прикладное значение. Внедрение новых методических подходов позволяет расширять наши представления о географии и фенологии миграций, о биогенных и абиогенных факто-

рах и последствиях миграционного поведения для биологии видов.

По территории России проходят все известные в Евразии миграционные коридоры птиц. Из 657 видов птиц, гнездящихся в России [6], около 67% связывают сезонными перелетами территорию РФ с сопредельными частями Евразии [12]. При этом в отдельных регионах Российской Федерации отмечено высокое разнообразие зоонозных патогенов – например, в области пересечения миграционных коридоров птиц на юге Западной Сибири были выделены штаммы вируса гриппа птиц А, которые ранее выделялись в противоположных частях континента – от Северной и Западной Европы до Юго-Восточной Азии [13]. Резонно предположить, что столь высокое локальное разнообразие вирусных патогенов связано с географией пролетных путей птиц, однако, конкретные механизмы этой связи все еще неясны. В частности, неизвестны в точности ни виды-переносчики, ни конкретные пути трансмиссии, ни природные или антропогенные факторы, влияющие на перемещение патогенов с птицами. Применение новых методов трассировки миграций в областях пересечения пролетных путей позволит прояснить картину циркуляции вирусных патогенов по Евразии в целом и в России, в частности.

В данной работе описаны перспективы изотопного картирования миграций животных как перспективного метода уточнения маршрутов птиц с целью выявления механизмов циркуляции вирусов гриппа А на территории России.

ОБСУЖДЕНИЕ

Методы изучения миграций диких птиц и циркуляция вирусов гриппа птиц А

Вирусы гриппа А (ВГА) птиц имеют широкий круг хозяев, включающий различные виды млекопитающих и птиц. Однако, основным естественным резервуаром, обеспечивающим непрерывную циркуляцию вируса гриппа, считаются дикие птицы водного и околотовного комплекса, относящихся к отрядам *Anseriformes* (дикие утки и гуси) и *Charadriiformes* (чайки, крачки, кулики) [10].

Большинство представителей этих отрядов совершают сезонные миграции на большие расстояния, и этим способствуют географическому распространению различных штаммов ВГА. Для понимания закономерностей циркуляции вируса гриппа птиц в природе и предсказания всплесков заболеваний, вызванных опасными штаммами, необходима максимально полная картина путей миграции, численности и структуры популяций видов-переносчиков.

Направления миграции и места зимовок разных видов птиц, в целом, изучены с помощью кольцевания. Численность водоплавающих птиц подвергается непрерывному мониторингу, в том числе со стороны государственных надзорных органов, однако миграционные потоки и генетическая структура популяций видов, имеющих широкий ареал обитания, изучены хуже, а мониторинг того и другого на регулярной основе в России не проводится. В советский период были собраны значительные массивы данных по миграциям птиц по территории России и бывших советских республик, выявлены ключевые точки миграционных путей, установлены сроки пролета и численность птиц, в том числе и водоплавающих [14]. Было проведено массовое кольцевание птиц и налажено получение колец, снятых с

добытой охотниками птицы [3]. Все это позволило выяснить магистральные направления и сроки миграций птиц по территории бывших СССР, а также, установить районы зимовки для большинства видов. В тоже время, структура популяций видов в пределах ареалов гнездования для большинства видов в основном осталась неизвестной, вследствие чего затруднительно прогнозировать характер обмена вирусными патогенами, как в пределах ареала гнездования, так и между различными зимовочными площадками.

Недостаточное количество данных о путях миграции инфицированных птиц и их межпопуляционных связях оставляет открытым вопрос о механизме трансмиссии ВГА у диких видов [15] и, в частности, не позволяет делать предсказания времени и места вспышек высокопатогенных ВГА вдали от очага возникновения. Более того, складывающаяся эпизоотологическая картина, например, вспышка высокопатогенного ВГА среди диких птиц в середине гнездового сезона, через 35-45 суток после окончания весенней миграции видов-носителей [16], подчас не имеет адекватного объяснения. Возможно, более глубокое исследование потенциала передачи вирусного патогена между особями на миграционных остановках [17] и детальная трассировка миграционных маршрутов позволит уточнить роль миграций птиц в циркуляции и распространении вирусных патогенов, в том числе, вирусов гриппа птиц А. Сроки и маршруты миграционных перелетов повсеместно уточняются с помощью новых инструментальных подходов, дополняющих собой традиционное кольцевание и наблюдение за миграциями в ключевых точках пролета.

Популярным подходом к картированию миграционных путей является дистанционный трекинг индивидуальных перелетов на основе VHF-, GPS- или GSM-позиционирования, в том числе и в районах массовых проявлений высокопатогенных ВГА [18]. К неоспоримым достоинствам телеметрии следует отнести исчерпывающую информацию о времени и маршруте (треке) перелета помеченной особи. К недостаткам – высокую затратность метода. Кроме того, дистанционные устройства имеют ряд взаимосвязанных технических ограничений (заряд батареи, ограничения по весу устройства и сроку действия), а также неизбежно влияют на поведение помеченной особи. Таким образом, трекинг с помощью телеметрии обычно охватывает небольшое число особей и не дает картину в целом по популяции. Он ограничен временем работы устройства, и может содержать искажения, вызванные изменением поведения птицы-носителя [19].

Упомянутый выше метод анализа стабильных изотопов в тканях животных (SIA) также позволяет судить о географии миграций различных видов птиц, хотя и требует определенной методологической коррекции [20]. Изотопный состав перьев, дает представления о местах последней линьки птицы. По образцам перьев, собранных в месте зимовки птиц, мы можем судить о местах послегнездовой линьки, а следовательно, и о местах размножения. Аналогично, по перьям, отобранным у птиц в гнездовых угодьях сразу после прилета с мест зимовки, можно судить о местах послебрачной линьки, которая нередко совпадает с местами зимовки [21; 22]. В отличие от рассмотренного выше телеметрического трекинга, пространственное разрешение этой методики картирования перемещений птиц относительно невелико. Кроме того, картирование места происхождения отдельного образца, зачастую, не пред-

ставляется возможным [22; 23]. Тем не менее, образцы перьев от группы в 20-50 особей могут дать представление о расстоянии перелета, а также о внутrigрупповой изменчивости миграционного поведения. Этот метод относительно недорог и применим для птиц любого размера, тогда как полноценные спутниковые передатчики, доступные в настоящее время, не отличаются дешевизной и могут использоваться только для птиц весом более 200 г. Облегченные даталоггеры, подходящие для мелких птиц, имеют ограниченный радиус действия, низкую точность позиционирования, и требуют повторного отлова птицы [24].

Метод анализа стабильных изотопов имеет ещё одно качественное отличие от дистанционного трекинга, важное для изучения механизмов циркуляции зоонозов. Возможность взять образцы ткани у большого числа птиц, как стерильных, так и зараженных исследуемым патогеном, позволяет сравнить места их происхождения на статистически достоверном материале. Использование внешних маркеров (колец или устройств дистанционного трекинга) позволяет отследить перемещения лишь у небольшого числа помеченных особей. Учитывая невысокий процент заражения зоонозами в естественных популяциях [13], вероятность напрямую проследить естественные пути распространения патогенов, таким образом, крайне мала. По всей видимости, именно поэтому SIA на сегодняшний день, зачастую, является единственным методом, который обеспечивает достаточный объем материала для картирования миграций птиц и изучение их паразитарной нагрузки (в том числе, ВГА) на популяционном уровне. Наибольшее число работ по такой схеме выполнены на популяциях, гнездящихся или зимующих внутри Европы и в Северной Америке [25; 26]. Существуют единичные исследования для птиц Юго-Восточной Азии. В частности, исследование миграции потенциального носителя высокопатогенных штаммов ВГА, материкового подвиды большого баклана (*Phalacrocorax carbo sinensis*) на Тайване с использованием SIA позволило узнать миграционные маршруты 98 особей [24], тогда как аналогичные работы с использованием устройств дистанционного трекинга ограничены десятком особей [18]. Территория России затронута такими исследованиями опосредованно, за счет птиц, зимующих в Европе [26; 27], на территории Сибири и Дальнего Востока России, насколько известно из литературных данных, такие работы не проводились.

Анализ содержания стабильных изотопов в биологических тканях

Основные биогенные элементы (водород, кислород, азот и углерод) имеют более одного стабильного изотопа. Стабильными называются нерадиоактивные изотопы, которые существуют длительное время, в сравнении с жизненным циклом отдельного организма. Животные получают все перечисленные химические элементы главным образом из пищи (углерод и азот) либо с водой (кислород и водород). Метод анализа стабильных изотопов основан на различной скорости протекания реакций фазового перехода для молекул одного вещества с различным изотопным составом вследствие небольших различий атомной массы изотопов. Это приводит к так называемому фракционированию, т.е. разделению тяжелых и легких изотопов в различных средах. Если бы такого разделения не существовало, изотопный состав воды во всей гидросфере Земли был бы одинаковым,

что не соответствует действительности [28].

Концентрации тяжелых изотопов выражают в атомных процентах, т.е. доле атомов тяжелого изотопа от всех атомов данного элемента. Изотопный состав живых организмов варьирует в довольно узких пределах, поэтому его принято выражать в тысячных долях отклонения от международного стандарта [30] и обозначать как δ . Для водорода и кислорода, содержащихся в осадках, это V-SMOW-2 – Vienna Standard Mean Ocean Water (стандартная средняя океаническая вода). Этот стандарт создан на основе дистиллированной океанической воды, собранной из разных частей света. Цифра 2 означает, что нынешний стандарт средней океанической воды – второй по счету, так как первый стандарт, изготовленный еще в 1960-х годах, закончился. Изготовлением и распространением стандартов занимается Лаборатория изотопной гидрологии при МАГАТЭ в Вене, Австрия [29; 30].

Такой подход связан с повсеместно применяемой методикой масс-спектрометрических измерений, при которой концентрацию тяжелых изотопов в исследуемом образце сравнивают с концентрацией этих изотопов в стандартном образце. Это позволяет с высокой

точностью определить относительную изотопную концентрацию, иначе говоря, изотопную подпись исследуемого образца. Точность измерения концентрации изотопов в массовых анализаторах составляет обычно 0,2–0,5‰. Общая формула для вычисления изотопной подписи выглядит следующим образом:

$$\delta^n X_{\text{образец}} = [(R_{\text{образец}}/R_{\text{стандарт}}) - 1] \times 1000 \text{ ‰}$$

где X – это исследуемый элемент, n – номер тяжелого изотопа, R – молярное соотношение тяжелого и легкого изотопов элемента [28].

Для изотопного анализа используют целый организм (мелкие животные) или отдельные ткани животных. Для стандартного анализа требуется несколько миллиграммов анализируемого вещества, более того, возможен анализ существенно меньших образцов [31].

Распространенность изотопов одного и того же элемента в природе существенно различается. Более легкая форма, как правило, более распространена. Например, среди всех изотопов кислорода доля ^{16}O составляет 99,762%, а среди изотопов углерода доля ^{12}C равна 99,83% (табл. 1) [29].

Таблица 1. Среднее содержание изотопов основных биогенных элементов в сухом веществе наземных экосистем
Table 1. The average content of isotopes of main nutrients in solid matter of terrestrial ecosystems

Элемент / Nutrient	Изотоп / Isotope	% от общего количества элемента / % of the total amount of element
Водород / Hydrogen	^1H	99,985
	^2H	0,015
Углерод / Carbon	^{12}C	98,890
	^{13}C	1,110
Азот / Nitrogen	^{14}N	99,630
	^{15}N	0,370
Кислород / Oxygen	^{16}O	99,759
	^{17}O	0,037
	^{18}O	0,204
Серa / Sulphur	^{32}S	95,000
	^{33}S	0,760
	^{34}S	4,220
	^{36}S	0,014

Исследования миграции птиц с помощью SIA

Применение стабильных изотопов в экологических исследованиях основано на принципе «вы есть то, что вы едите». Соотношение стабильных изотопов варьирует между трофическими уровнями одного сообщества и между самими этими сообществами. Включаясь в ткань животного через его рацион, изотопный состав пищи отражается на изотопной подписи особи. Поэтому соотношение стабильных изотопов в ткани животных непосредственным образом связано с их диетой, а время пребывания элементов в тканях зависит от скорости метаболизма [32].

Соотношение стабильных изотопов изменяется предсказуемо по всему ландшафту, а определённые ткани животных, как правило, отражают соотношение стабильных изотопов в его локальной среде обитания. Таким образом, иногда можно сделать вывод о местонахождении животного, перемещающегося между пищевыми сетями [32]. При этом важно выбрать подходящую ткань для изотопного анализа, поскольку ткани отличаются метаболической активностью, а значит и характером обмена изотопами с окружающей средой [31].

Ткани, основу которых составляет кератин, метаболически инертны после синтеза. Они обычно используются для изучения миграций, поскольку изотопная подпись, отражающая место, где происходил рост тка-

ни, остается неизменной. Хотя некоторые из этих тканей могут продолжать расти в течение длительного периода, соотношение стабильных изотопов сохраняется в структуре кератина неизменным [32]. Исключение составляют изотопы водорода, поскольку возможен некоторый обмен изотопами с водородом в парах окружающей воды [4], но необходимая поправка вносится за счет одновременного анализа стандартного образца кератина вместе с исследуемыми тканями, например, так называемый Caribou Hoof Standard [33]. И наоборот, метаболически активные ткани сообщают информацию о диете организма за относительно короткий предшествующий период. Например, изотопные подписи различных тканей хищных птиц отражают различные периоды их питания. Так, изотопная подпись крови отражает характер питания на протяжении трех недель до взятия пробы, а плазма крови – за прошедшие сутки [34]. Поэтому при исследовании миграции животных за продолжительный период времени используют метаболически инертные ткани, в то время как при исследовании передвижений за короткий период (например, для различия вновь прибывших и резидентных особей) используют метаболически активные ткани.

Открытие связи изменений изотопного состава тканей животных (например, костей, мышц, яичной скорлупы, перьев) с изотопным составом окружающей среды [35; 36] послужило базисом для исследования

географического происхождения образцов тканей разных групп позвоночных и даже членистоногих [36; 37]. Эффективность стабильных изотопов для изучения миграции птиц впервые убедительно показана в работах Чемберляйна и соавторов [4], а также Хобсона и Вассеняара [8]. Авторы первой работы, сравнив изотопный состав водорода (дейтерий, δD), углерода ($\delta^{13}C$) и стронция ($\delta^{87}Sr$) в тканях мигрирующих птиц, сделали вывод, что по изотопной подписи образца можно установить места размножения мигрирующих видов, количественно оценить степень смешения размножающихся популяций во время миграции и на местах зимовки, и

выявили ряд других аспектов структуры популяции мигрирующих животных. В работе Хобсона и Вассеняара впервые показана высокая корреляция между δD в перьях 6 видов неотропических мигрирующих певчих птиц и в осадках в местах их размножения на территории Северной Америки. Выраженный широтный градиент δD в осадках на всей территории Северной Америки (рис. 1) позволил авторам локализовать происхождение образцов, добытых на зимовках в Центральной и Южной Америке и тем самым картировать миграционные маршруты сравнительно большой (140 образцов) группы особей.

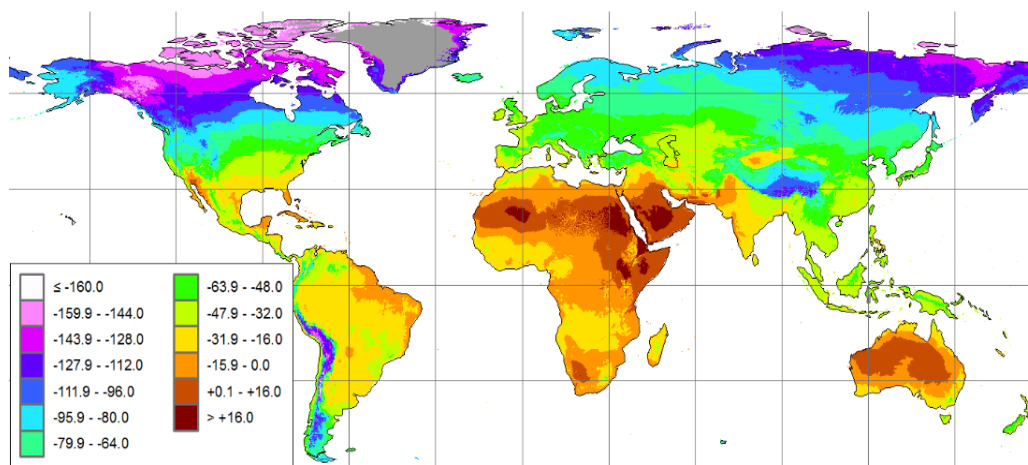


Рисунок 1. Паттерны распределения средневзвешенного по теплому сезону количества дейтерия в осадках по поверхности суши на основе 50-летних наблюдений сети GNIP. Теплый сезон – период положительных среднемесячных температур воздуха. На легенде указано содержание дейтерия в ‰, относительно стандарта VSMOW-SLAP [38]

Figure 1. Patterns of the distribution of the average amount of deuterium in precipitation during the warm season over the land surface - based on 50-year observations of the GNIP. The warm season is a period of positive average monthly air temperatures. The legend indicates the content of deuterium in ‰, relative to the VSMOW-SLAP standard [38]

В этих работах впервые показано, что изотопы водорода можно использовать для связывания мест размножения и зимовки мигрирующих птиц, перемещающихся между регионами с различным содержанием изотопов водорода в осадках. В обзоре Р. Ингера и С. Бирхопа [9], приведены примеры новых аспектов миграций птиц, обнаруженных с помощью метода SIA. В частности, методом SIA удалось обнаружить более широкое расселение молодых особей дрозда Бикнелла в гнездовых угодьях в сравнении со старшей частью популяции. Для ряда других видов воробынообразных SIA позволил идентифицировать феномен скачковой (leap-frog) миграций. Кроме того, SIA дает возможность определить происхождение «бродячих» особей, обнаруженных за пределом их видового географического ареала. Эти и другие примеры основаны на массовом применении анализа содержания стабильных изотопов в перьях птиц, собранных одновременно в разных частях ареалов исследуемых видов, что отличает метод SIA от прочих подходов к изучению миграций птиц. Существенные познавательные возможности обуславливают и популярность метода – с 1997 года опубликовано несколько сотен работ, посвященных уточнению пространственной структуры ареалов перелетных птиц методом SIA.

Изменчивость концентрации изотопов между различными регионами

Относительная распространенность дейтерия (δD) сильно зависит от кинетических процессов, связанных с температурой, испарением и конденсацией [30]. При понижении

среднегодовой температуры воздуха на 1 градус средний годовой изотопный состав осадков уменьшается на 0,7 ‰ по ^{18}O и примерно на 5,6 ‰ по дейтерию. По мере накопления данных об изотопном составе осадков в различных регионах мира значения могут меняться. Также могут наблюдаться различия в изотопно-температурной зависимости между различными регионами планеты. Тем не менее, сам факт сильной статистически значимой связи между этими двумя параметрами остается неизменным. Данные об изотопном составе осадков на планете собираются в рамках совместной программы МАГАТЭ – BMO GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) специализированными станциями, неодинаково распределенными по поверхности Земли, и представленными в интерактивном режиме на открытом веб-ресурсе.

Связь между температурой воздуха и изотопным составом осадков проявляется в ряде географических закономерностей: широтная (при увеличении расстояния от экватора происходит уменьшение δD), сезонная (более низкая δD в составе осадков зимой, и более высокая δD летом) и высотная (понижение δD в составе осадков с увеличением высоты над уровнем моря). Следует отметить, что δD -изотопный ландшафт Евразии сложнее и в восточной части менее выразителен, чем у Северной Америки, что снижает точность географической локализации образцов методом SIA.

Ограничения метода SIA для изучения миграций птиц
Накопленный опыт применения метода SIA для изучения

географии и фенологии миграций птиц выявил и его ограничения. В частности, корректное применение метода для локализации места линьки или рождения особи, требует знания точного времени этих событий, при этом другие события миграционного цикла птицы (например, остановки во время миграции), остаются неохваченными [19; 29]. Кроме того, требуется внесение поправки на внутригодовую динамику содержания изотопов в осадках, и даже после этого точность географической привязки невысока и вдобавок зависит от плотности расположения GNIP-станций [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных о методе анализа стабильных изотопов (SIA) в образцах перьев, приведенных в мировой литературе, можно сделать вывод о том, что данный метод можно использовать для изучения фенологии и географии миграций птиц. Разрешающей способности метода достаточно для определения миграционных путей носителей зоонозов, в том числе вирусов гриппа птиц А с точностью до географической подобласти или точнее. На данный момент, в этих целях метод используется очень ограниченно, а на территории России – вовсе не применяется. В целом, метод SIA обладает сравнительно невысокой географической разрешающей способностью, в сравнении с кольцеванием или дистанционным позиционированием, но его несомненными преимуществами являются возможность количественной оценки доли мигрантов из разных регионов в одной выборке и минимальное число контактов с птицей. Массовое применение метода SIA позволяет выйти на принципиально новый количественный уровень анализа миграционных потоков носителей патогенов и, следовательно, даёт возможность более точно моделировать распространение зоонозных инфекций, переносимых дикими птицами, а также прогнозировать наиболее вероятные географические точки возникновения вспышек.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 18-54-70006 и МАГАТЭ (Контракт № 22563).

ACKNOWLEDGEMENT

The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research through research project № 18-54-70006 and IAEA (Research Contract № 22563).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Newton I. The migration ecology of birds. Elsevier. 2010. 984 p.
2. Rubenstein D.R., Hobson K.A. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes // Trends in ecology & evolution. 2004. V. 19. Iss. 5. P. 256-263. Doi: 10.1016/j.tree.2004.03.017
3. Бианки В.В., Добрынина И.Н. Миграции птиц Восточной Европы и Северной Азии // Птицы. М.: Наука, 1997. 320 с.
4. Veen J., Yurlov A.K., Delany S.N., Mihantiev A.I., Selivanova M.A., Boere G.C. An atlas of movements of Southwest Siberian waterbirds. Wetlands Internat., Wageningen. 2005. P. 10-17.
5. Webster M.S., Marra P.P., Haig S.M., Bensch S., Holmes R.T. Links between worlds: unraveling migratory connectivity // Trends in Ecology & Evolution. 2002. V. 17. Iss. 2. P. 76-83. Doi: 10.1016/S0169-5347(01)02380-1

6. Коблик Е., Архипов В., Редькин Я. Список птиц Российской Федерации. Litres. 2018. 256 с.
7. Chamberlain C.P., Blum J.D., Holmes R.T., Feng X.H., Sherry T.W., Graves G.R. The use of isotope tracers for identifying populations of migratory birds // Oecologia. 1996. V. 109. Iss. 1. P. 132-141. Doi: 10.1007/s004420050067
8. Hobson K.A., Wassenaar L.I. Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers // Oecologia. 1997. V. 109. Iss. 1. P. 142-148. Doi: 10.1007/s004420050068
9. Inger R., Bearhop S. Applications of stable isotope analyses to avian ecology // Ibis. 2008. V. 150. Iss. 3. P. 447-461. Doi: 10.1111/j.1474-919X.2008.00839.x
10. Webster R.G., Bean W.J., Gorman O.T., Chambers T.M., Kawaoka Y. Evolution and ecology of influenza A viruses // Microbiology and molecular biology reviews. 1992. V. 56. Iss. 1. P. 152-179.
11. Reed K.D., Meece J.K., Henkel J.S., Shukla S.K. Birds, migration and emerging zoonoses: West Nile virus, Lyme disease, influenza A and enteropathogens // Clinical medicine and research. 2003. V. 1. Iss. 1. P. 5-12.
12. Михеев А.В. Пространственная структура популяций у птиц // Русский орнитологический журнал. 2010. Т. 19. N 592. С. 1499-1509.
13. De Marco M.A., Sharshov K., Gulyaeva M., Delogu M., Ciccarese L., Castrucci M. R., Shestopalov A. Chapter: Ecology of Avian Influenza Viruses in Siberia. Book: Siberia: Ecology, Diversity and Environmental Impact, Nova Science Pub Inc. 2016. 235 p.
14. Гаврилов Э.И., Равкин Ю.С. Миграции птиц в Азии. Новосибирск: Наука, 1986. 261 с.
15. Gaidet N., Cappelle J., Takekawa J.Y., Prosser D.J., Iverson S.A., Douglas D.C., Perry W.M., Mundkur T., Newman S.H. Potential spread of highly pathogenic avian influenza H5N1 by wildfowl: dispersal ranges and rates determined from large-scale satellite telemetry // Journal of Applied Ecology. 2010. V. 47. Iss. 5. P. 1147-1157. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01845.x
16. Gulyaeva M.A., Sharshov K.A., Zaykovskaia A.V., Shestopalova L.V., Shestopalov A.M. Experimental infection and pathology of Clade 2.2 H5N1 virus in gulls // J Vet Sci. 2016. V. 17. Iss. 2. P. 179-188. Doi: 10.4142/jvs.2016.17.2.179
17. Takekawa J.Y., Newman S.H., Xiao X., Prosser D.J., Spragens K.A., Palm E.C., Yan B., Li T., Lei F., Zhao D., Douglas D.C., Muzaffar S.B., Ji W. Migration of waterfowl in the East Asian flyway and spatial relationship to HPAI H5N1 outbreaks // Avian Dis. 2010. V. 54. Suppl. 1. P. 466-476. Doi: 10.1637/8914-043009-Reg.1
18. Iverson S.A., Gavrilov A., Katzner T.E., Takekawa J.Y., Miller T.A., Hagemeijer W., Mundkur T., Sivananthaperumal B., DeMattos C.C., Ahmed L.S., Newman S.H. Migratory movements of waterfowl in Central Asia and avian influenza emergence: sporadic transmission of H5N1 from east to west // Ibis. 2011. V. 153. Iss. 2. P. 279-292. Doi: 10.1111/j.1474-919X.2010.01095.x
19. Cappelle J., Iverson S.A., Takekawa J.Y., Newman S.H., Dodman T., Gaidet N. Implementing telemetry on new species in remote areas: recommendations from a large-scale satellite tracking study of African waterfowl // Ostrich. 2011. V. 82. Iss. 1. P. 17-26. Doi: 10.2989/00306525.2011.556786
20. Hobson K.A. Stable isotopes and the determination of avian migratory connectivity and seasonal interactions // The Auk. 2005. V. 122. Iss. 4. P. 1037-1048. Doi: 10.1093/auk/122.4.1037
21. Yuan-Mou C., Hatch K.A., Ding T.S., Eggett D.L., Yuan H.W., Roeder B.L. Using stable isotopes to unravel and predict the origins of great cormorants (*Phalacrocorax carbo*

- sinensis*) overwintering at Kinmen // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2008. V. 22. Iss. 8. P. 1235-1244. Doi: 10.1002/rcm.3487
22. Wunder M.B., Kester C.L., Knopf F.L., Rye R.O. A test of geographic assignment using isotope tracers in feathers of known origin // *Oecologia*. 2005. V. 144. Iss. 4. P. 607-617. Doi: 10.1007/s00442-005-0071-y
23. Kelly J.F., Johnson M.J., Langridge S., Whitfield M. Efficacy of stable isotope ratios in assigning endangered migrants to breeding and wintering sites // *Ecol. Appl.* 2008. V. 18. Iss. 3. P. 568-576.
24. Hallworth M.T., Marra P.P. Miniaturized GPS Tags Identify Non-breeding Territories of a Small Breeding Migratory Songbird // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 1106-1109. Doi: 10.1038/srep11069
25. Hill N.J., Takekawa J.Y., Ackerman J.T., Hobson K.A., Herring G., Cardona C.J., Runstadler J.A., Boyce W.M. Migration strategy affects avian influenza dynamics in mallards (*Anas platyrhynchos*) // *Molecular Ecology*. 2012. V. 21. Iss. 24. P. 5986-5999. Doi: 10.1111/j.1365-294X.2012.05735.x
26. Guillemain M., van Wilgenburg S.L., Legagneux P., Hobson K.A. Assessing geographic origins of Teal (*Anas crecca*) through stable-hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotope analyses of feathers and ring-recoveries // *Journal of Ornithology*. 2014. V. 155. Iss. 1. P. 165-172. Doi: 10.1007/s10336-013-0998-4
27. Fox A.D., Hobson K.A., de Jong A., Kardynal K.J., Koehler G., Heinicke T. Flyway population delineation in Taiga Bean Geese *Anser fabalis fabalis* revealed by multi-element feather stable isotope analysis // *Ibis*. 2017. V. 159. Iss. 1. P. 66-75. Doi: 10.1111/ibi.12417
28. Michener R.H., Lajtha K. Stable isotopes in ecology and environmental science. Blackwell Pub., 2007, 591 p.
29. Viljoen G.J., Luckins A.G., Naletoski I. Stable Isotopes to Trace Migratory Birds and to Identify Harmful Diseases. Springer. 2016. 43 p.
30. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Санкт-Петербург: Изд. ААНИИ. 2016. 63 с.
31. Rubenstein D.R., Hobson K.A. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes // *Trends in ecology & evolution*. 2004. V. 19. Iss. 5. P. 256-263. Doi: 10.1016/j.tree.2004.03.017
32. Hobson K.A. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review // *Oecologia*. 1999. V. 120. Iss. 3. P. 314-326. Doi: 10.1007/s004420050865
33. Wassenaar L.I., Hobson K.A. Improved Method for Determining the Stable-Hydrogen Isotopic Composition (δD) of Complex Organic Materials of Environmental Interest // *Environ. Sci. Technol.* 2000. V. 34. Iss. 11. P. 2354-2360. Doi: 10.1021/es990804i
34. Bearhop S., Waldron S., Votier S.C., Furneset R.W. Factors that influence assimilation rates and fractionation of nitrogen and carbon stable isotopes in avian blood and feathers // *Physiol. Biochem. Zool.* 2002. V. 75. Iss. 5. P. 451-458. Doi: 10.1086/342800
35. Schaffner F.C., Swart P.K. Influence of diet and environmental water on the carbon and oxygen isotopic signatures of seabird eggshell carbonate // *Bulletin of Marine Science*. 1991. V. 48. Iss. 1. P. 23-38.
36. Vogel J.C., Eglinton B., Auret J.M. Isotope fingerprints in elephant bone and ivory // *Nature*. 1990. V. 346. P. 747-749. Doi: 10.1038/346747a0
37. Fry B. Fish and shrimp migrations in the northern Gulf of Mexico analyzed using stable carbon and nitrogen and sulfur isotope ratios // *US Natl Mar Fish Serv Bull.* 1984. V. 81. Iss. 4. P. 789-802.
38. Terzer S., Wassenaar L.I., Araguás-Araguás L.J., Aggarwal P.K. Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. V. 17. Iss. 11. P. 4713-4728. Doi: 10.5194/hess-17-4713-2013

REFERENCES

- Newton I. The migration ecology of birds. Elsevier, 2010, 984 p.
- Rubenstein D.R., Hobson K.A. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes. *Trends in ecology & evolution*, 2004, vol. 19, iss. 5, pp. 256-263. Doi: 10.1016/j.tree.2004.03.017
- Bianki V.V., Dobrynina I.N. Migrations of birds in Eastern Europe and North Asia. In: *Plastinchatoklyuvyye. Rechnyye utki* [Lamellar-billed. River ducks]. Moscow, Nauka Publ., 1997, 320 p. (In Russian)
- Veen J., Yurlov A.K., Delany S.N., Mihantiev A.I., Selivanova M.A., Boere G.C. An atlas of movements of Southwest Siberian waterbirds. Wetlands Internat., Wageningen, 2005, pp. 10-17.
- Webster M.S., Marra P.P., Haig S.M., Bensch S., Holmes R.T. Links between worlds: unraveling migratory connectivity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, vol. 17, iss. 2, pp. 76-83. Doi: 10.1016/S0169-5347(01)02380-1
- Koblik E., Arkhipov V., Red'kin Ya. *Spisok ptits Rossiyskoy federatsii* [List of birds of the Russian Federation]. Litres, 2018, 256 p. (In Russian)
- Chamberlain C.P., Blum J.D., Holmes R.T., Feng X.H., Sherry T.W., Graves G.R. The use of isotope tracers for identifying populations of migratory birds. *Oecologia*, 1996, vol. 109, iss. 1, pp. 132-141. Doi: 10.1007/s004420050067
- Hobson K.A., Wassenaar L.I. Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers. *Oecologia*, 1997, vol. 109, iss. 1, pp. 142-148. Doi: 10.1007/s004420050068
- Inger R., Bearhop S. Applications of stable isotope analyses to avian ecology. *Ibis*, 2008, vol. 150, iss. 3, pp. 447-461. Doi: 10.1111/j.1474-919X.2008.00839.x
- Webster R.G., Bean W.J., Gorman O.T., Chambers T.M., Kawaoka Y. Evolution and ecology of influenza A viruses. *Microbiology and molecular biology reviews*. 1992, vol. 56, iss. 1, pp. 152-179.
- Reed K.D., Meece J.K., Henkel J.S., Shukla S.K. Birds, migration and emerging zoonoses: West Nile virus, Lyme disease, influenza A and enteropathogens. *Clinical medicine and research*. 2003, vol. 1, iss. 1, pp. 5-12.
- Mikheev A.V. Spatial structure of populations in birds. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal* [Russian Journal of Ornithology]. 2010, vol. 19, no. 592, pp. 1499-1509. (In Russian)
- De Marco M.A., Sharshov K., Gulyaeva M., Delogu M., Ciccarese L., Castrucci M. R., Shestopalov A. Chapter: Ecology of Avian Influenza Viruses in Siberia. Book: *Siberia: Ecology, Diversity and Environmental Impact*, Nova Science Pub Inc. 2016, 235 p.
- Gavrilov E.I., Ravkin Yu.S. *Migratsii ptits v Azii* [Bird Migration in Asia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 261 p. (In Russian)
- Gaidet N., Cappelle J., Takekawa J.Y., Prosser D.J., Iverson S.A., Douglas D.C., Perry W.M., Mundkur T., Newman S.H. Potential spread of highly pathogenic avian influenza H5N1 by wildfowl: dispersal ranges and rates determined from large-scale satellite telemetry. *Journal of Applied Ecology*, 2010, vol. 47, iss. 5, pp. 1147-1157. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01845.x
- Gulyaeva M.A., Sharshov K.A., Zaykovskaia A.V., Shestopalova L.V., Shestopalov A.M. Experimental infection and pathology of Clade 2.2 H5N1 virus in gulls. *J Vet Sci.*, 2016, vol. 17, iss. 2, pp. 179-188. Doi: 10.4142/jvs.2016.17.2.179

17. Takekawa J.Y., Newman S.H., Xiao X., Prosser D.J., Spragens K.A., Palm E.C., Yan B., Li T., Lei F., Zhao D., Douglas D.C., Muzaffar S.B., Ji W. Migration of waterfowl in the East Asian flyway and spatial relationship to HPAI H5N1 outbreaks. *Avian Dis.*, 2010, vol. 54, 1 suppl., pp. 466-476. Doi: 10.1637/8914-043009-Reg.1
18. Iverson S.A., Gavrilov A., Katzner T.E., Takekawa J.Y., Miller T.A., Hagemeijer W., Mundkur T., Sivananthaperumal B., DeMattos C.C., Ahmed L.S., Newman S.H. Migratory movements of waterfowl in Central Asia and avian influenza emergence: sporadic transmission of H5N1 from east to west. *Ibis*, 2011, vol. 153, iss. 2, pp. 279-292. Doi: 10.1111/j.1474-919X.2010.01095.x
19. Cappelle J., Iverson S.A., Takekawa J.Y., Newman S.H., Dodman T., Gaidet N. Implementing telemetry on new species in remote areas: recommendations from a large-scale satellite tracking study of African waterfowl. *Ostrich*, 2011, vol. 82, iss. 1, pp. 17-26. Doi: 10.2989/00306525.2011.556786
20. Hobson K.A. Stable isotopes and the determination of avian migratory connectivity and seasonal interactions. *The Auk*, 2005, vol. 122, iss. 4, pp. 1037-1048. Doi: 10.1093/auk/122.4.1037
21. Yuan-Mou C., Hatch K.A., Ding T.S., Eggett D.L., Yuan H.W., Roeder B.L. Using stable isotopes to unravel and predict the origins of great cormorants (*Phalacrocorax carbo sinensis*) overwintering at Kinmen. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2008, vol. 22, iss. 8, pp. 1235-1244. Doi: 10.1002/rcm.3487
22. Wunder M.B., Kester C.L., Knopf F.L., Rye R.O. A test of geographic assignment using isotope tracers in feathers of known origin. *Oecologia*, 2005, vol. 144, iss. 4, pp. 607-617. Doi: 10.1007/s00442-005-0071-y
23. Kelly J.F., Johnson M.J., Langridge S., Whitfield M. Efficacy of stable isotope ratios in assigning endangered migrants to breeding and wintering sites. *Ecol. Appl.*, 2008, vol. 18, iss. 3, pp. 568-576.
24. Hallworth M.T., Marra P.P. Miniaturized GPS Tags Identify Non-breeding Territories of a Small Breeding Migratory Songbird. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, pp. 1106-1109. Doi: 10.1038/srep11069
25. Hill N.J., Takekawa J.Y., Ackerman J.T., Hobson K.A., Herring G., Cardona C.J., Runstadler J.A., Boyce W.M. Migration strategy affects avian influenza dynamics in mallards (*Anas platyrhynchos*). *Molecular Ecology*, 2012, vol. 21, iss. 24, pp. 5986-5999. Doi: 10.1111/j.1365-294X.2012.05735.x
26. Guillemain M., van Wilgenburg S.L., Legagneux P., Hobson K.A. Assessing geographic origins of Teal (*Anas crecca*) through stable-hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotope analyses of feathers and ring-recoveries. *Journal of Ornithology*, 2014, vol. 155, iss. 1, pp. 165-172. Doi: 10.1007/s10336-013-0998-4
27. Fox A.D., Hobson K.A., de Jong A., Kardynal K.J., Koehler G., Heinicke T. Flyway population delineation in Taiga Bean Geese *Anser fabalis fabalis* revealed by multi-element feather stable isotope analysis. *Ibis*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 66-75. Doi: 10.1111/ibi.12417
28. Michener R.H., Lajtha K. Stable isotopes in ecology and environmental science. Blackwell Pub., 2007, 591 p.
29. Viljoen G.J., Luckins A.G., Naletoski I. Stable Isotopes to Trace Migratory Birds and to Identify Harmful Diseases. Springer, 2016, 43 p.
30. Ekaykin A.A. *Stabil'nye izotopy vody v glyatsiologii i paleogeografii* [Stable water isotopes in glaciology and paleogeography]. St. Petersburg, AARI Publ., 2016, 63 p. (In Russian)
31. Rubenstein D.R., Hobson K.A. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes. *Trends in ecology & evolution*, 2004, vol. 19, iss. 5, pp. 256-263. Doi: 10.1016/j.tree.2004.03.017
32. Hobson K.A. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia*, 1999, vol. 120, iss. 3, pp. 314-326. Doi: 10.1007/s004420050865
33. Wassenaar L.I., Hobson K.A. Improved Method for Determining the Stable-Hydrogen Isotopic Composition (δD) of Complex Organic Materials of Environmental Interest. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, vol. 34, iss. 11, pp. 2354-2360. Doi: 10.1021/es990804i
34. Bearhop S., Waldron S., Votier S.C., Furness R.W. Factors that influence assimilation rates and fractionation of nitrogen and carbon stable isotopes in avian blood and feathers. *Physiol. Biochem. Zool.*, 2002, vol. 75, iss. 5, pp. 451-458. Doi: 10.1086/342800
35. Schaffner F.C., Swart P.K. Influence of diet and environmental water on the carbon and oxygen isotopic signatures of seabird eggshell carbonate. *Bulletin of Marine Science*. 1991, vol. 48, iss. 1, pp. 23-38.
36. Vogel J.C., Eglinton B., Auret J.M. Isotope fingerprints in elephant bone and ivory. *Nature*, 1990, vol. 346, pp. 747-749. Doi: 10.1038/346747a0
37. Fry B. Fish and shrimp migrations in the northern Gulf of Mexico analyzed using stable carbon and nitrogen and sulfur isotope ratios. *US Natl Mar Fish Serv Bull.*, 1984, vol. 81, iss. 4, pp. 789-802.
38. Terzer S., Wassenaar L.I., Araguás-Araguás L.J., Aggarwal P.K. Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, iss. 11, pp. 4713-4728. Doi: 10.5194/hess-17-4713-2013

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ольга Р. Друзяка и Алексей В. Друзяка проводили сводный анализ полученных результатов и представленной в открытом доступе литературы по теме исследования. Марина А. Гуляева и Александр М. Шестопалов корректировали рукопись до подачи в редакцию. Фальк Хюттманн консультировал по вопросам путей миграции диких перелетных птиц. Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат и самоплагиат.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Olga R. Druzyaka and Alexey V. Druzyaka conducted a consolidated analysis of collected data and previous research presented in the literature. Marina A. Gulyaeva and Alexander M. Shestopalov corrected the text prior to submission to the Editor. Falk Huettmann advised on migration routes for wild migratory birds. Authors are equally responsible for the text and for avoiding plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors state that there is no conflict of interest.