

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АРКТИЧЕСКИХ МЕСТООБИТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДОВ-ИНДИКАТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОГО МЕДВЕДЯ)

Платонов Н.Г., Рожнов В.В., Мордвинцев И.Н., Иванов Е.А., Найденко С.В.

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (ИПЭЭ РАН),
г. Москва
rozhnov.v@gmail.com*

Введение

Состояние ледового покрова – главный абиотический фактор, определяющий пригодность арктических местообитаний для жизни многих видов животных. В течение 35 лет, с конца 1970-х по середину 2010-х гг., по данным дистанционного зондирования Земли наблюдается сокращение ледового покрова Арктики, главной причиной которого называют потепление климата. Более подробный анализ показывает, однако, что арктическая климатическая система отличается устойчивостью за счет ряда механизмов положительной и отрицательной обратной связи, поэтому уменьшение полярной «шапки» зависит от множества факторов. С одной стороны, площадь и протяженность морского льда зависит от океанических течений и атмосферной циркуляции, с другой – лёд играет роль некоего изолятора при взаимодействии океана и атмосферы. Несмотря на эту неоднозначность, арктический лёд – среда обитания многих видов животных, и уменьшение ледового покрова вызывает угрозу потери ими местообитаний. Ситуация усугубляется возрастающим экономическим и геополитическим интересом к арктическому шельфу. Отсюда возникает необходимость эффективного управления популяциями редких видов для сохранения биоразнообразия Арктики.

Исследованиям арктических животных уделяется все больше внимание, в том числе и авторами этой работы [1-8]. В этих исследованиях реализуется главным образом подход, при котором внимание сосредоточено на тех или иных особенностях биологии этих видов животных.

Цель проекта «Разработка теоретических и экспериментальных основ методов комплексной биоиндикации для оценки состояния и прогнозирования изменений экологических систем Арктики и их компонентов», который выполняется в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации», состоит в комплексном экосистемном подходе к изучению арктических экосистем, который включает выявление видов-индикаторов их состояния и поиск параметров такой биоиндикации.

Возможность биоиндикации обеспечивается значительной биологической средообразующей ролью морского льда. Отсутствие льда способствует увеличению фотосинтеза и развитию вверх трофической цепи, в том числе с увеличением биоразнообразия. Биопродуктивность океана выше в районе кромки льда из-за пересечения биоценозов.

Среди морских млекопитающих особое место занимает белый медведь (*Ursus maritimus*). Он использует морской лёд Арктики для охоты на ластоногих, а для размножения предпочитает участки суши с определенным рельефом и физико-географическими характеристиками. Он выступает как вид-индикатор атмосферных и сухопутных загрязнений по химическому составу шерсти, морских загрязнений по составу жировой ткани, климатических изменений по расположенности родовых

берлог и осенней встречаемости на побережье, уязвимости арктических экосистем по анализу состояния здоровья популяций.

Другие крупные морские млекопитающие Арктики также могут использоваться в качестве биоиндикаторов. Изменение численности белухи (*Delphinapterus leucas*) характеризует перераспределение морских биоресурсов и их обилие. Ластоногие используют морской лед для размножения и отдыха и занимают промежуточное звено между рыбами и белым медведем, поэтому могут выступать в качестве индикатора целостности трофической цепи.

В данной работе представлено обоснование выбора белого медведя в качестве вида-индикатора, используемых параметров, а также общая схема моделей, которые могут быть использованы для прогнозирования изменений арктических экосистем.

Методы.

Обоснование выбора параметров. В табл. 1 указаны основные измеряемые качественно или количественно биологические параметры белого медведя и связанные с ними абиотические характеристики, в основном, параметры окружающей среды, что характеризует белого медведя как вид-индикатор. Приведенная таблица кратко отражает возможности выбранного биоиндикатора и характеризует лишь направления деятельности, реализуемые в рамках данного проекта.

Таблица 1. Параметры биоиндикации белого медведя

| <i>Биологический параметр</i> | <i>Фактор среды</i> |
|---|---|
| Волосной покров | Загрязненность нефтепродуктами, радионуклидами |
| Плазма крови, здоровье | Благоприятность окружающей среды |
| Жир | Загрязненность |
| Численность популяции | Емкость местообитаний (преимущественно, ледовых) |
| Поведение, каннибализм | Емкость ресурсной базы |
| Размер выводка, упитанность беременных самок осенью | Емкость ресурсной базы, наличие транспортной платформы для выхода на сушу |
| Граница ареала популяции | Атмосферная циркуляция (через ледовитость) |
| Конфликты «белый медведь - человек» | Ледовые местообитания, социальные проблемы организации быта |

В условиях сокращения ледовых местообитаний белый медведь больше времени проводит на суше. Голод, соседство с человеком и домашними животными могут приводить к высокой восприимчивости белых медведей к широкому спектру патогенов. Поэтому оценка серопозитивности особей служит в качестве параметра, характеризующего здоровье популяции и соотношение уязвимости и адаптации вида к изменению окружающей среды.

Жировая ткань в течение жизни накапливает трудновыводящиеся химические соединения. Лабораторный анализ жира позволяет выделить критические для жизнедеятельности особи вещества и элементы и оценить содержание вредных соединений в окружающей среде, а также в употребляемой пище. Аналогичные результаты исследования волосного покрова могут свидетельствовать о загрязненности в более короткий период, как правило, между линьками, в первую очередь о загрязненности атмосферы, а также о загрязнениях на суше (например, нефтепродукты).

Уменьшение благоприятных условий для охоты вынуждает белого медведя искать альтернативные источники пищи: выброшенные на берег останки морских млекопитающих, раздавленных при паническом сходе в воду на лежбищах моржей животных, яйца птиц и птенцов, представителей своего же вида.

В условиях недостатка корма в качестве источника пищи белого медведя

привлекают поселения людей. Непродуманная организация пунктов хранения запасов еды и утилизации пищевых отходов, а также непродуманное поведение в условиях сосуществования белого медведя и человека приводит к нежелательным конфликтам, регистрация которых является биоиндикатором качества социально-бытовых и природоохранных мероприятий.

Одним из информативных показателей благополучия популяции, характеризующим ёмкость и ресурсы местообитаний, является размер выводка. Перед залеганием в родовые берлоги беременная самка усиленно питается, так как в течение нескольких месяцев она будет лишена возможности покинуть берлогу. Обилие и качество питания в осеннее время способствует не только необходимой упитанности, но и развитию плода.

Хотя белый медведь умеет хорошо плавать и может приспособиться к сезонному пребыванию на суше, его жизнь тесно связана с морскими льдами Арктики, распределение которых зависит от многих факторов, но в краткосрочной перспективе определяется атмосферной циркуляцией, изменение которой происходит значительно сильнее океанических течений. Поэтому граница ареала белого медведя проходит по кромке льда, а дальние заходы вглубь суши или многокилометровые заплывы свидетельствуют об адаптации вида к изменяющимся условиям среды.

Сбор материала для анализа перечисленных параметров проведен на двух модельных участках российского сектора Арктики: остров Земля Александры (архипелаг Земля Франца-Иосифа) и мыс Желания (остров Северный архипелага Новая Земля).

Результаты.

Биоиндикация качества среды обитания

Для модельного участка «Земля Александры» (архипелаг Земля Франца Иосифа) проанализирована серопозитивность белых медведей к различным патогенам. Этот параметр отражает фактор, лимитирующий численность популяции в сложных условиях обитания. Оценена серопозитивность 26 белых медведей, отловленных на Земле Франца Иосифа, путем анализа наличия антител к шести патогенам: вирусам болезни Ауэски, чумы плотоядных и гриппа А, а также к *Dirofilaria* sp., *Trichinella spiralis*, *Toxoplasma gondii*. Все серопозитивные животные оказались взрослыми или подростками, тогда как медвежата были серонегативными ко всем шести патогенам. Серопозитивность к *Dirofilaria* sp., вирусам гриппа А и болезни Ауэски среди белых медведей в их естественной среде обитания зарегистрирована впервые.

Биоиндикация ёмкости среды обитания

Ёмкость ресурсной базы может быть оценена по наблюдениям на модельных участках за белыми медведями с целью получения таких показателей как усредненный размер выводка в первый год жизни медвежат (сеголетков), во второй год жизни (годовиков) и в третий год жизни (двухлеток). Количественная оценка численности группировки или субпопуляции может быть оценена по числу родовых берлог, работа по учету которых также может быть проведена на модельных участках. При выборочных отловах особей необходимо проведение процедуры оценки возраста, например, по премоляру.

По сведениям различных исследователей белого медведя размер популяции белого медведя по числу родовых берлог оценивается приблизительно и составляет около 10% [9].

Величина выводка в различные годы жизни медвежат необходима для оценки динамики детской смертности. Средний возраст взрослых медведей обоих полов

используется для определения продолжительности жизни поколения и для качественной оценки максимального возраста белых медведей в естественной среде обитания.

Демографическая модель популяции. Для биоиндикации ёмкости ресурсной базы белого медведя, связанной с площадью ледовых местообитаний и их пространственным распределением в биопродуктивных районах разработана основа демографической модели популяции, которая может быть заполнена конкретными популяционными характеристиками.

Биологические характеристики, рассмотренные ниже, не являются независимыми, а взаимосвязаны друг с другом, поэтому при ограниченности непосредственных измерений используются извлеченные параметры. Полнота измеренных параметров может быть использована для верификации и оценки качества измерений. В связи с отсутствием или неполнотой измерений в российской Арктики на данном этапе работ численные характеристики являются приближенными и приведены здесь для демонстрации работы модели.

Основной принцип модели: число особей поколения ($peer$) i -года ($peer[i]$) – это число особей поколения $(i-1)$ -года ($peer[i-1]$), уменьшенное на величину не доживших особей, число которых выражается численностью поколения $(i-1)$ -года, умноженной на уровень смертности поколения i -года ($mortality[i]$) – относительное число утеранных особей в возрасте i . Таким образом, $peer[i] = peer[i-1] * (1 - mortality[i])$, где i – возраст в годах.

Белый медведь относится к категории хищников с высоким уровнем смертности в первые годы жизни: смертность среди медвежат первого года жизни составляет не менее 30-40% [10]. В демографии хищников изменение удельной смертности по времени соответствует типичной кривой изменения интенсивности отказов. Сначала происходит уменьшение удельной смертности, от сеголетков к годовикам (высокий уровень отказа из-за уязвимости молодняка). Далее следует период минимума отказов в связи с приспособленностью взрослых. Затем уровень смертности возрастает из-за старения и связанных с ним болезней. Для построения графика изменения удельной смертности (интенсивности отказов) мы использовали степенную функцию $y \sim x^{2.0}$ для молодых особей (моложе шести лет) и $y \sim x^{5.0}$ – для старых (старше шести лет) (рис. 1). Несмотря на то, что правый «хвост» задан степенной функцией, изменение смертности особей в возрасте старше 20 лет близко к экспоненциальному распределению, что соответствует принципам, принятым в теории отказов, и подчиняется закону смертности Гомперца-Мейкхама. В данном примере мы задали максимальную продолжительность жизни 35 лет. При выборе степеней левого «хвоста» мы ориентировались на уровень смертности сеголетков $mortality[1]=0.24$ и годовиков $mortality[2]=0.18$. Данная оценка выживаемости годовиков ($0.82=1-0.18$) более оптимистичная при сравнении с уровнем $0.70-0.75$ выживаемости годовалых медвежат Северной Америки [11]. Минимальное значение удельной смертности взрослых задано на уровне 0.06 .

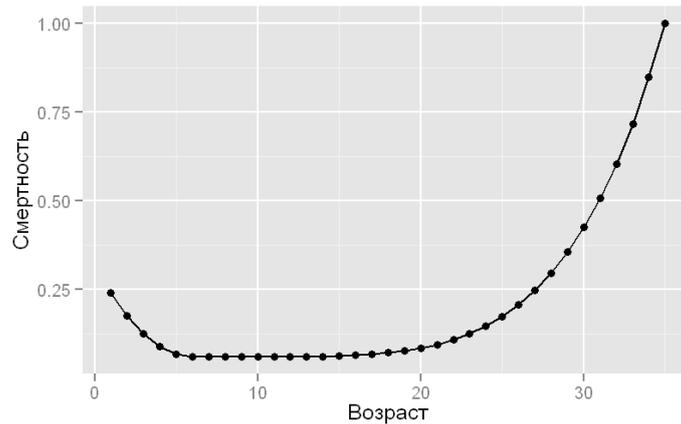


Рисунок 1. Удельная смертность белого медведя по годам жизни.

Использованные константы и допущения:

1. Число берлог ($dens$) постоянно, не меняется из года в год. Это допущение базируется на предположении, что популяция находится в равновесном состоянии, и уровень смертности особей компенсируется уровнем ежегодного прироста. Для удобства восприятия мы задали число берлог 100. В случае обеспечения работ на модельных участках учет родовых берлог может быть произведен. В нашей стране учеты проводились с вертолетов, однако в настоящее время может быть организован малоинвазивный маршрутный учёт с использованием малошумной техники, например, снегоходов.
2. Средний размер выводка по наблюдениям в течение периода 1980-1992 гг. составил 1.84 [12]. Выводок белых медведей обычно состоит из одного-двух медвежат, изредка медведица рождает троих. В данном примере мы задали размер выводка 1.8. При работе на модельных участках средний размер выводка может быть получен по наблюдениям в течение полевого сезона с продолжительным световым днем.
3. Доля самок 45% ($sexratio$). В настоящее время половозрастной состав популяций белого медведя, распространенных в Российском секторе Арктики, неизвестен [10]. Мы сознательно заложили число самок меньше числа самцов ввиду наличия возможной агрессии крупных самцов не только против молодых особей, но и против медвежат, из-за которой может пострадать и самка.
4. Репродуктивный возраст самки задаётся следующим образом: беременность в возрасте 4 лет возможна у 30% самок, беременность в возрасте 4-5 лет возможна у 60% самок. Беременность в возрасте от шести до тридцати лет возможна у 100% самок. Верхняя граница репродуктивного возраста в модели ограничена продолжительностью жизни особи (в модели 30 лет, на пять лет меньше максимальной продолжительности жизни).
5. Максимальный возраст 35 лет, смертность в 35 лет равна единице: $mortality[35]=1$

Для контроля постоянного числа берлог мы использовали продолжительность репродуктивного цикла ($reprod.cycle$), которая составляет не менее трех лет. Это период с момента залегания в берлогу до распада семьи по естественным причинам. Репродуктивный цикл может сокращаться в результате гибели медвежат и увеличиваться в случае отсутствия встречи с самцом. Тогда число залегающих в родовые берлоги самок возраста i лет: $dens[i] = sexratio * peer[i] / reprod.cycle$. Если сумма берлог всех разновозрастных самок превышает значение 100, мы увеличиваем параметр $reprod.cycle$. И наоборот, если сумма берлог меньше 100, мы сокращаем продолжительность репродуктивного цикла.

Результаты моделирования с указанными выше параметрами приведены в табл. 2. Модель реализована на языке R, исходный код скрипта приведен в Приложении.

Таблица 2. Пример прогона демографической модели. Параметры указаны в тексте

| <i>Возраст</i> | <i>Смертность</i> | <i>Сверстников</i> | <i>Берлог</i> | <i>Утеряно</i> | <i>Утеряно (%)</i> | <i>Утеряно совокупно (%)</i> | <i>Размер выводака</i> |
|----------------|-------------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------------|------------------------|
| 1 | 0.240 | 136.80 | 0.00 | 43.20 | 24.000 | 24 | 1.80 |
| 2 | 0.175 | 112.83 | 0.00 | 23.97 | 13.315 | 37 | 1.37 |
| 3 | 0.125 | 98.75 | 0.00 | 14.08 | 7.823 | 45 | 1.13 |
| 4 | 0.089 | 89.98 | 2.68 | 8.77 | 4.872 | 50 | |
| 5 | 0.067 | 83.94 | 5.00 | 6.05 | 3.359 | 53 | |
| 6 | 0.060 | 78.90 | 7.83 | 5.04 | 2.798 | 56 | |
| 7 | 0.060 | 74.17 | 7.36 | 4.73 | 2.630 | 59 | |
| 8 | 0.060 | 69.72 | 6.92 | 4.45 | 2.472 | 61 | |
| 9 | 0.060 | 65.53 | 6.50 | 4.18 | 2.324 | 64 | |
| 10 | 0.060 | 61.60 | 6.11 | 3.93 | 2.186 | 66 | |
| 11 | 0.060 | 57.89 | 5.74 | 3.70 | 2.058 | 68 | |
| 12 | 0.060 | 54.40 | 5.40 | 3.49 | 1.941 | 70 | |
| 13 | 0.061 | 51.09 | 5.07 | 3.31 | 1.837 | 72 | |
| 14 | 0.062 | 47.95 | 4.76 | 3.14 | 1.746 | 73 | |
| 15 | 0.063 | 44.94 | 4.46 | 3.01 | 1.670 | 75 | |
| 16 | 0.065 | 42.04 | 4.17 | 2.90 | 1.613 | 77 | |
| 17 | 0.067 | 39.21 | 3.89 | 2.83 | 1.574 | 78 | |
| 18 | 0.071 | 36.41 | 3.61 | 2.80 | 1.555 | 80 | |
| 19 | 0.077 | 33.60 | 3.33 | 2.80 | 1.558 | 81 | |
| 20 | 0.085 | 30.76 | 3.05 | 2.84 | 1.580 | 83 | |
| 21 | 0.095 | 27.84 | 2.76 | 2.92 | 1.620 | 85 | |
| 22 | 0.108 | 24.84 | 2.46 | 3.01 | 1.671 | 86 | |
| 23 | 0.125 | 21.73 | 2.16 | 3.11 | 1.726 | 88 | |
| 24 | 0.147 | 18.54 | 1.84 | 3.19 | 1.770 | 90 | |
| 25 | 0.173 | 15.33 | 1.52 | 3.22 | 1.787 | 91 | |
| 26 | 0.207 | 12.16 | 1.21 | 3.17 | 1.760 | 93 | |
| 27 | 0.247 | 9.15 | 0.91 | 3.01 | 1.670 | 95 | |
| 28 | 0.296 | 6.44 | 0.64 | 2.71 | 1.506 | 96 | |
| 29 | 0.355 | 4.16 | 0.41 | 2.29 | 1.271 | 98 | |
| 30 | 0.425 | 2.39 | 0.24 | 1.77 | 0.981 | 99 | |
| 31 | 0.508 | 1.18 | 0.00 | 1.21 | 0.674 | 99 | |
| 32 | 0.605 | 0.46 | 0.00 | 0.71 | 0.395 | 100 | |
| 33 | 0.718 | 0.13 | 0.00 | 0.33 | 0.186 | 100 | |
| 34 | 0.849 | 0.02 | 0.00 | 0.11 | 0.062 | 100 | |
| 35 | 1.000 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.011 | 100 | |

Интерпретация табл. 2 приведена ниже. Дробное число зверей указано при расчете на начальное количество особей (или родовых берлог). Округление не применялось, однако в случае применения модели на собранных в будущем реальных данных необходимо также рассмотреть возможность округления в меньшую сторону.

Строка 1. Поколение медвежат в возрасте одного года насчитывает 180 особей (при условии 100 берлог и среднего размера выводака 1.8). Из-за уровня смертности на первом году жизни, равным 0.24, утеряно (погибли по разным причинам) 43.2 медвежонка (или 24%). Оставшиеся 136.8 пережили год и повзрослели. При наличии реальных данных можно пересмотреть параметр среднего выводака.

Строка 2. Из 136.8 особей до следующего года жизни доживает лишь 112.83. Потери составляют 23.97 особей (13.315%). Более трети медвежат не доживает до трехлетнего возраста; совокупные потери за первые два года жизни составляют 37%. Средний размер выводака составляет 1.37. Это следует из числа годовиков (136.8 на 100 берлог). При наличии реальных данных по числу годовалых медвежат следует

изменить параметр среднего выводка и при необходимости изменить степень функции левого «хвоста» (рис. 1).

Строка 3. Приведен размер выводка 1.13. В природе самки, водящие двухлетних медвежат, встречаются редко, однако этот параметр оставлен для возможных дискуссий в случае сбора реальных данных и для корректировки модели. В строках, идущих ниже, размер выводка не указан из-за распада семьи по естественным причинам.

Строка 4. Согласно начальным условиям, не более тридцати процентов самок в возрасте четырех лет могут залечь в родовые берлоги. В зависимости от продолжительности репродуктивного цикла процент беременных четырехлетних самок уменьшается. В данном случае при доле самок 45% к общему числу сверстников из 89.98 медведей самки составляют 40.49 особей. Из них только 2.68 образуют родовые берлоги. Половина всех белых медведей (50% в таблице) не доживает до возраста пяти лет.

Строка 5. По допущениям модели, 60% самок могут формировать родовые берлоги. Если репродуктивный цикл 3 года, то число беременных пятилетних самок составляет 20%.

Строка 6. Считается, что 100% самок могут образовывать родовые берлоги. Уровень смертности в возрасте шести лет минимален (0.06). В дальнейшем уровень смертности будет расти по введённой формуле $y \sim x^{5.0}$, сначала очень незначительно, но после возраста двадцати лет – заметно (см. правый «хвост» на рис. 1)

Строка 31. Мы ввели допущение об окончании детородного периода в 30 лет, поэтому самки 30 лет и старше не образуют родовых берлог.

Таким образом, на 100 родовых берлог и 180 новорожденных подростками самками было образовано 100 родовых берлог, в которых родились 180 детенышей. Другая интерпретация полученного результата состоит в том, что спустя 35 лет из 180 рожденных потери составили 180 особей. Средняя смертность с первых лет жизни составила 0.215, при этом смертность особей трех лет и старше – 0.081, что соизмеримо с общепринятыми значениями для ряда популяций белого медведя. Для достижения равновесия в табл. 2 продолжительность репродуктивного цикла составила 4.5 лет при заданной величине среднего выводка 1.8. В расчете на 100 родовых берлог модельная субпопуляция состоит из 1386 особей, включая медвежат-сеголеток, то есть родовые берлоги составляют 7.2% от численности субпопуляции. Если из субпопуляции исключить сеголетков и годовалых медвежат, то родовые берлоги составляют 8.3% от численности субпопуляции. Полученные значения данного биоиндикатора меньше упомянутого в начале раздела уровня 10% и свидетельствуют о более оптимистичной оценке ресурсной базы местообитаний.

Другой мерой ёмкости местообитаний является продолжительность жизни одного поколения. Этот параметр рассчитывается как среднее значение возраста самки, взвешенное по параметру числа родовых берлог. При использовании среднего арифметического смена поколений наступает через 12.95 лет, а при использовании медианной оценки – через 12.00 лет. Чем больше значение этого биоиндикатора, тем более благоприятные средовые условия жизни белого медведя.

Время смены одного поколения у белого медведя составляет 15 лет [13]. Данная оценка была получена как время совершеннолетия (5 лет) плюс половина репродукционного этапа жизни (1/2 от 20 лет). По другим данным по результатам отловов 3191 особей смена поколения происходит каждые 11 лет (среднее арифметическое 11.4 лет, медиана 11.2 лет), а средняя продолжительность поколения соответствует 11-13 годам.

В настоящее время предложенная модель реализуется лишь с одним извлеченным

параметром – продолжительностью репродуктивного цикла, однако позволяет свободно менять заданные начальные условия с помощью констант. К примеру, если изменить долю самок с 45% на 50%, а все остальные условия оставить без изменений, то значения в табл. 2 и уровень родовых берлог от общего числа популяции останутся теми же самыми, изменится только лишь продолжительность репродуктивного цикла с значения 4.5 лет на значение 5.0 лет. При уменьшении среднего размера выводка с 1.8 до 1.6 доля родовых берлог к численности субпопуляции (взрослые, три года и старше) увеличивается с 8.3% до 9.3%, репродуктивный цикл уменьшается с 4.5 до 4.0 лет, а продолжительность жизни одного поколения остаётся прежней. При увеличении минимума смертности взрослого населения с 0.06 до 0.09 уменьшается продолжительность поколения с 12.95 до 11.81 лет (среднее арифметическая оценка среднего) и с 12.00 до 10.00 (медиана), а доля родовых берлог к численности популяции возрастает с 8.3% до 11.0% (взрослые, три года и старше). Если минимальная смертность взрослого населения возрастет до 0.12, то равновесие популяции разрушается. При минимальном значении репродуктивного цикла в три года спустя 35 лет вместо 100 родовых берлог будет образовано лишь 78, которые будут составлять 14.2% от численности субпопуляции населения возраста трех лет и старше. При увеличении детской смертности в раннем возрасте (сеголетки) с 0.24 до 0.32 доля родовых берлог возрастает с 8.3% до 10.4%, а продолжительность репродуктивного цикла сокращается с 4.5 до 3.6 лет, что и наблюдается в природе, когда самка, потерявшая детенышей, способна к зачатию в ближайший сезон гона.

Таким образом, модель отражает тот факт, что рост детской смертности уменьшает продолжительность репродуктивного цикла и приводит к увеличению отношения числа берлог к размеру популяции. В зависимости от заложенных в модель условий размер популяции составляет от 8% до 12% от численности берлог, причем нижняя граница достигается при благоприятных условиях существования белого медведя (к примеру, низкая смертность взрослого населения). При этом число молодых медведей в возрасте не старше пяти лет оказывается приблизительно равным числу медведей более старшей возрастной структуры. В исследованиях отечественных специалистов отмечается равное соотношение взрослых и молодых медведей, но не уточнен минимальный возраст взрослой особи [10].

Биондикация перераспределения ресурсов среды

Одним из преимуществ использования крупных млекопитающих в качестве биоиндикаторов является возможность анализа девиации поведения при изменении условий окружающей среды. При этом поведение хищников связано с перераспределением или поведением видов-жертв, то есть индикатором становится параметры некоторого участка трофической цепи.

Иерархия видов-индикаторов на опорной точке «Мыс Желания» представлена двумя уровнями: белым медведем (*Ursus maritimus*) и атлантическим моржом (*Odobenus rosmarus*). Моржи образуют береговую залежку на Оранских о-вах. При сохранении льда в летний период моржи не выходят на берег. При полном отсутствии льда на обширных пространствах моржи теряют платформы для отдыха при миграциях, поэтому их распространение может быть ограничено. Массовое присутствие моржей на ограниченной акватории может привести к подрыву кормовой базы, на восстановление которой может потребоваться время.

Взаимодействие белого медведя и моржа осуществляется только на суше. Белого медведя на смешанных моржовых лежбищах привлекает молодняк. Помимо морских млекопитающих, в межвидовых связях арктических экосистем обнаруживается использование белым медведем яиц и птенцов в качестве источников пищи.

Присутствие белого медведя в районе мыса Желания является биоиндикацией кормовой базы и окружающей обстановки. Источники питания делятся на естественные и искусственные (антропогенные). Естественные источники могут быть регулярными (тюлени, лежбища моржей, яйца птиц) или случайными (выброшенные на берег останки морских млекопитающих). Условия окружающей среды проявляются ледовой обстановкой (транспортная основа для сезонных миграций и охотничьи угодья) и рельефом побережья.

Обилие встреченных особей летом 2011 г. согласуется с ранним образованием сплошного ледового покрова с Карской стороны о-ва Северный осенью 2010 г. (рис. 2), способствовавшим выходом животных к архипелагу, и ранним и быстрым отступлением льда весной 2011 г., в результате которого не все белые медведи успели покинуть архипелаг, поэтому остались на островах. Позднее образование льда осенью 2011 и 2012 гг. не способствовало выходу медведей к архипелагу, а неустойчивый ледовый покров в последующие зимы 2011/2012 гг. и 2012/2013 гг. препятствовал нахождению белого медведя вблизи островов Новой Земли. Это стало возможной причиной низкого числа встреченных особей летом 2012 и 2013 гг. При позднем отступлении льда от северной половины архипелага со стороны Карского моря в 2014 г. отмечена отложенная регистрация встреч умеренного количества как разновозрастных семейных групп, так и одиночных особей белых медведей.

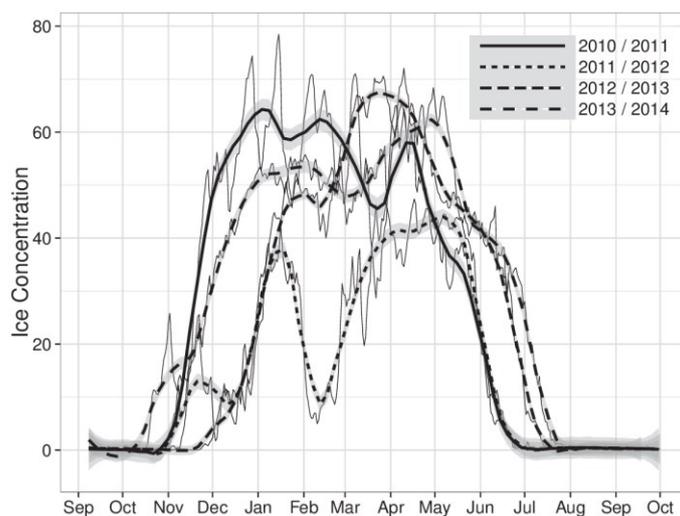


Рисунок 2. Временные ряды концентрации льда в двухсоткилометровой зоне о-ва Северный.

Для о-ва Северный архипелага Новая Земля новая эра ледовитости наступила в конце июня 2004 г., когда среднегодовая концентрация льда упала с 51% до 29%. Несмотря на это, встречаемость семейных групп белого медведя на мысе Желания является индикатором того, что берега архипелага продолжают, как и раньше, использоваться для образования берлог, и самки имеют достаточно пищевых ресурсов для рождения и кормления потомства.

Заключение.

На данном этапе работ рассмотрены лишь некоторые возможности использования белого медведя в качестве вида-индикатора. Состояние здоровья особей по анализу плазмы крови позволяет оценить улучшение или ухудшение качества среды обитания, а демографические характеристики свидетельствуют об изменении количественных параметров среды обитания, в первую очередь, емкости ледовых местообитаний.

Некоторые важные параметры биоиндикации, отвечающие за загрязнение окружающей среды, требуют серьёзных и продолжительных лабораторных исследований, которые продолжаются в настоящее время, а сами результаты будут опубликованы после завершения анализа. Продолжение работ по Проекту будет ориентировано на систематизацию основ биоиндикации с участием видов из высших звеньев трофической цепи и включения в анализ взаимоотношения белого медведя с человеком, а также разворачивании устойчивой системы сбора биологических параметров с сети модельных участков в российской Арктике.

Благодарности.

Экспедиционные и камеральные работы проведены в рамках проекта «Разработка теоретических и экспериментальных основ методов комплексной биоиндикации для оценки состояния и прогнозирования изменений экологических систем Арктики и их компонентов» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации». Авторы благодарят дирекцию и сотрудников НП «Русская Арктика» за возможность проведения экспедиционных работ на Новой Земле, обеспечение доставки и пребывания на опорном пункте «м. Желания»

Ссылки на литературу

1. В.В. Рожнов, Н.Г. Платонов, И.Н. Мордвинцев, С.В. Найденко, Е.А. Иванов, Р.В. Ершов. *Зоол. журн.*, 2014, **93**, 1-15.
2. И.Г. Мещерский, О.В. Шпак, Д.И. Литовка, Д.М. Глазов, Е.А. Борисова, В.В. Рожнов. *Биология моря*, 2013, **39**, 126-135.
3. С.В. Найденко, Е.А. Иванов, И.Н. Мордвинцев, Н.Г. Платонов, Р.В. Ершов, В.В. Рожнов. *Зоол. журн.*, 2013, **92**, 248-252.
4. Н.Г. Платонов, И.Н. Мордвинцев, В.В. Рожнов, И.В. Алпацкий. *Исследование Земли из космоса*, 2012, **4**, 12-25.
5. Н.Г. Платонов, И.Н. Мордвинцев, В.В. Рожнов. *Известия РАН. Серия биологическая*, 2013, **2**, 217-226.
6. Н.Г. Платонов, В.В. Рожнов, И.В. Алпацкий, И.Н. Мордвинцев, Е.А. Иванов, С.В. Найденко. *Доклады Академии наук*, 2014, **456**, 366-369.
7. Б.А. Соловьёв, Н.Г. Платонов, Д.М. Глазов, О.В. Шпак, В.В. Рожнов. *Зоол. журн.*, 2011, **90**, 1398-1402.
8. О.В. Шпак, Д.М. Кузнецова, В.В. Рожнов. *Зоол. журн.*, 2013, **92**, 497-500.
9. С.М. Успенский *М. Агрпромиздат*, 1989, 190 с.
10. С.Е. Беликов, А.В. Болтунов, Н.Г. Овсяников. *Стратегия сохранения белого медведя в Российской Федерации*. 2010.
11. D.P. DeMaster, I. Stirling. *International Conference on Bear Research and Management* 1983, **5**, 260-263.
12. A.E. Derocher. *Polar Biol.* 1999, **22**, 350-356.
13. J. Aars, N.J. Lunn, A.E. Derocher. *Proceedings of the 14th Working Meeting of the IUCN/SSC Polar Bear Specialist Group*, 2006.

Приложение. Исходный код демографической модели на языке R (<http://www.r-project.org>)

```
## =====  
'main' <- function()  
{  
  init.den <- 100  
  litter <- 1.8  
  max.age <- 35
```

```

reprod.age <- 6:(max.age-5)
reprod.cycle <- 6
adult <- 6:(max.age-10)
subad.ini <- 3
subad <- subad.ini:max.age
mortality.cub <- 0.24
mortality.adult <- 0.06
sexratio <- 0.45 ## F/(F+M)
k1 <- 2
k2 <- 5
age <- seq(max.age)
mortality <- rep(NA,length(age))
mortality[1] <- mortality.cub
mortality[adult] <- mortality.adult
mortality[length(mortality)] <- 1
n <- adult[1]
y1 <- mortality[n]
y2 <- mortality[1]
x1 <- 0
x0 <- age[1]-x1
x2 <- age[n]-x0
a1 <- (y2-y1)/(x2^k1-x1^k1)
b1 <- y1-a1*x1^k1
mortality[1:n] <- a1*(age[n:1]-x0)^k1+b1
i1 <- adult[1]
i2 <- max.age
x1 <- 0
x0 <- age[i1]-x1
x2 <- age[i2]-x0
y1 <- mortality[i1]
y2 <- mortality[i2]
a2 <- (y2-y1)/(x2^k2-x1^k2)
b2 <- y1-a2*x1^k2
mortality[i1:i2] <- a2*(age[i1:i2]-x0)^k2+b2
if (FALSE) ## if TRUE then plotting bathtub curve of mortality
{
  require(ggplot2)
  grname <- "bathtub.pdf"
  pdf(grname)
  df0 <- data.frame(age=age,mortality=mortality)
  p1 <- ggplot(df0,aes(age,mortality))
  p1 <- p1+geom_point()+geom_line()
  print(p1)
  print(p1+scale_y_log10())
  dev.off()
  shell(grname,wait=FALSE)
}
toBreak <- FALSE
maxj <- 1000
for (j in 1:maxj) #to adjust equilibrium by changing 'reprod.cycle'
{
  p0 <- init.den*litter ## borned in dens
  peer <- dens <- lost <- rep(NA,length(age)) ## 'peer' - has the same age
  for (i in seq_along(age))
  {
    p <- ifelse(i==1,p0,peer[i-1])
    peer[i] <- p*(1-mortality[i])
    sc <- if ((age[i]<min(reprod.age)-2) || (age[i]>max(reprod.age))) 0
      else if (age[i]<min(reprod.age)-1) 0.3
      else if (age[i]<min(reprod.age)) 0.6
      else 1
    dens[i] <- sc*sexratio*peer[i]/reprod.cycle
    lost[i] <- ifelse(age[i]<2,p0-peer[i],peer[i-1]-peer[i])
  }
  df1 <- data.frame(age=age,mortality=mortality,peer=peer
    ,dens=dens,lost=lost
    ,lostP=100*lost/sum(lost) ## lost in %%
    ,lostC=cumsum(100*lost/sum(lost)) ## cumul lost in %%

```

```

        ,litter=NA)
peer1 <- with(df1,sum(peer)-0.5*peer[1])
peer2 <- with(df1,sum(peer[subad.ini:max.age]))
mort1 <- mean(df1$mortality)
mort2 <- mean(df1$mortality[adult])
d1 <- 100*init.den/peer1
d2 <- 100*init.den/peer2
dens <- sum(df1$dens)
lost <- sum(df1$lost)
df1$litter[1:3] <- df1$peer[1:3]/init.den
df2 <- data.frame(n=p0,mort.all=mort1,mort.adult=mort2
                 ,peer1=peer1,peer2=peer2
                 ,d1=d1,d2=d2,dens=dens,lost=lost,cycle=reprod.cycle)
if (dens-init.den>1e-3)
  reprod.cycle <- reprod.cycle+1/(j*5)
else if (dens-init.den<1e-3)
  reprod.cycle <- reprod.cycle-1/(j*5)
else
  toBreak <- TRUE
if (reprod.cycle<2.5)
{
  reprod.cycle <- 3
  init.den <- init.den-0.1
  toBreak <- FALSE
}
if (!toBreak)
  next
}
df1$peer <- round(df1$peer,3)
print(df1,digits=2)
print(df2,digits=4)
w <- round(with(df1,dens/sum(dens))*1e6)
d <- NULL
for (i in seq(nrow(df1)))
  d <- c(d,rep(df1$age[i],w[i]))
print(c(GL.median=median(d),GL.mean=mean(d)))
0L
}
invisible(main())
## =====

```