

### Библиографический список

1. Кузин А. Е. Анализ промысла северного морского котика (*Callorhinus ursinus*) на о. Тюленьем // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). – 2015. – Т. 183. – С. 71 – 80.
2. Корнев С.И., Блохин И.А., Генералов А.А., Семерин А.П. Исторический тренд командорской популяции северного морского котика за 50 лет (1958–2007 гг.) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. – 2008 – № 11. – С. 105 – 120.
3. Trites A.W., Larkin P.A. The decline and fall of the Pribilof fur seal (*Callorhinus-Ursinus*) – a simulation study. // *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* – 1989. – Vol. 46. – P. 1437 – 1445.
4. Жданова О.Л., Кузин А.Е., Фрисман Е.Я. Динамика выживаемости самцов северного морского котика (*Callorhinus ursinus*) острова Тюлений (Охотское море) по данным многолетних наблюдений // Зоологический журнал. – 2017. – Т. 96. – №. 6. – С. 720 – 739.
5. Жданова О.Л., Кузин А.Е., Фрисман Е.Я. Оценка ювенильной выживаемости самцов северного морского котика (*Callorhinus ursinus*): математическое моделирование и анализ данных // Математическая биология и биоинформатика. – 2018. – Т. 13. – №.2. – С. 360 – 375. doi: 10.17537/2018.13.360.
6. Caswell H. *Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation.* – Sunderland: Sinauer, 2001.

УДК 574.34:575.174.4

## Модельный анализ влияния оптимального промысла на лимитированную популяцию

*Е.А. Колбина*

*ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз», г. Владивосток, Россия*

В статье приведен анализ влияния оптимального промысла на лимитированную популяцию.

**Ключевые слова:** популяция, модельный анализ, генетическая структура, промысел.

В большой серии современных исследований отмечено почти катастрофическое снижение эффективной численности популяций и потеря генетического разнообразия в результате антропогенного

воздействия. Причем эти негативные для биологических видов тенденции наблюдаются не только в промыслаемых популяциях (например, изменение генетической структуры порообразующих деревьев при восстановлении лесов после вырубки), промысловых видов рыб, но и в популяциях, которые явно не эксплуатируются, а испытывают на себе влияние антропогенного воздействия за счет фрагментации и сокращения среды обитания (например, генетические изменения в популяции саламандры). Окончательное решение вопроса, что происходит с адаптивной изменчивостью видов на фоне антропогенного воздействия, не является очевидным и тоже привлекает интерес исследователей.

Целью работы является описание и исследование наиболее простой модельной ситуации, в которой проявляются закономерности взаимосвязанных изменений динамики генетической структуры и численности популяций, вызванных взаимодействием эволюционных (в основном селективных) и экологических (ограничивающих популяционный рост) факторов, включая эффекты промыслового воздействия на эксплуатируемые популяции. В качестве такой модельной системы рассматривается диплоидная менделевская панмиктичная популяция, генетическое разнообразие в которой контролируется одним диаллельным локусом. Экологическое лимитирование сводится к убывающей зависимости приспособленности от численности, а воздействие промысла – к изъятию части особей.

Введем обозначения:  $x_n$  – численность популяции в  $n$ -ом поколении,  $q_n$  – частота аллеля А в  $n$ -ом поколении (следовательно,  $(1 - q_n)$  – частота аллеля а),  $W_{AA}(n)$ ,  $W_{Aa}(n)$ ,  $W_{aa}(n)$  – приспособленности генотипов АА, Аа, аа – соответственно в  $n$ -ом поколении. Изменение численности и генетической структуры популяции описывается следующей системой рекуррентных уравнений [1]:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \bar{W}_n(x_n)x_n \\ q_{n+1} = q_n(W_{AA}(x_n)q_n + W_{Aa}(x_n)(1 - q_n))/\bar{W}_n(x_n), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{W}_n = W_{AA}(x_n)q_n^2 + 2W_{Aa}(x_n)q_n(1 - q_n) + W_{aa}(x_n)(1 - q_n)^2$  – средняя приспособленность популяции в  $n$ -ом поколении. Будем полагать, что приспособленности зависят от численности линейно

$$W_{ij} = 1 + R_{ij} - \frac{R_{ij}}{K_{ij}}x.$$

Соответственно каждый генотип характеризует его ресурсный ( $K_{ij}$ ) и мальтузианский ( $R_{ij}$ ) параметры. Для упрощения выкладок введем

дополнительное предположение, что все генотипы имеют одинаковую приспособленность при некотором значении численности популяции (равном  $x^*$ ).

Условия существования и разрушения генетического полиморфизма модели (1), а так же результаты исследования ее динамического поведения приведены в работах [2] и [3].

Введем в модель (1) промысел с долей изъятия  $u$ :

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n \bar{W}_n (1 - u) \\ q_{n+1} = q_n (W_{AA} q_n + W_{Aa} (1 - q_n)) / \bar{W}_n, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R = U x_n \bar{W}_n$  – величина изъятия,

$$\bar{W}_n = W_{AA} q_n^2 + 2W_{Aa} q_n (1 - q_n) + W_{aa} (1 - q_n)^2.$$

Оптимальный равновесный уровень численности  $\bar{x}_M$ , обеспечивающий максимальный равновесный уровень изъятия, однозначно определяется уравнением  $\bar{W} = 1 - \bar{x}_M \cdot \bar{W}'_x$ .

Найдены равновесные значения численности и частоты аллеля А модели (2), обеспечивающие максимальный объем изъятия [4, 5]. Определены условия их существования и устойчивости при оптимальном промысле. Показано, что в состоянии, обеспечивающем максимальный уровень изъятия, значение генетического состава остается таким же, как и в случае, когда промысел отсутствует, а равновесное значение численности снижается в два раза. Также показано, что при линейном виде функций приспособленностей и при описанных соотношениях параметров модели в равновесии генетический состав популяции не зависит от ее численности. Показано, что условия существования равновесных значений в целом при отсутствии промысла и при его воздействии одинаковы.

Численное исследование влияния промысла с постоянной долей изъятия на динамику популяции показало, что промысел при любой оптимальной доле изъятия ведет к стабилизации численности и частоты аллеля А. Промысел с переменной долей изъятия может вызвать колебания численности, а при определенных начальных условиях – даже привести к вымиранию популяции. Кроме того, показано, что оптимальный промысел может привести к изменению генетического разнообразия в случае, если какая-либо из оптимальных долей изъятия переведет равновесную численность через  $x^*$ . Таким образом, промысел может привести к изменениям результатов отбора и вызвать разрушение или способствовать поддержанию полиморфизма.

### Библиографический список

1. Ратнер В.А. Математическая популяционная генетика (элементарный курс). – Новосибирск: Наука, 1977.
2. Жданова О.Л., Колбина Е.А., Фрисман Е.Я. Проблемы регулярного поведения и детерминированного хаоса в математической модели эволюции менделевской лимитированной популяции // Дальневосточный математический журнал. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – Т. 4, № 2. – С. 289–303.
3. Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Динамические режимы в модели однолокусного плотностно-зависимого отбора // Генетика. 2005. – Т. 41, №11. – С. 1575–1584.
4. Жданова О.Л., Колбина Е.А., Фрисман Е.Я. Влияние промысла на генетическое разнообразие и характер динамического поведения менделевской лимитированной популяции // ДАН. 2007. – Т. 412, №4. – С. 564–567.
5. Фрисман Е.Я., Жданова О.Л., Колбина Е.А. Влияние промысла на генетическое разнообразие и характер динамического поведения менделевской лимитированной популяции // Генетика. – М.: Наука, 2010. – Т. 46, № 2. – С. 272–281.

УДК 528.8, 556.55

## Разработка классификатора термокарстовых озер Центрального Ямала на основе снимков спутника Sentinel-2

*А.В. Кульшин, Л.А. Хворова*  
*АлтГУ, г. Барнаул*

В статье рассматриваются задачи разработки классификатора термокарстовых озер Центрального Ямала на основе многоспектральной спутниковой информации. Для эффективного решения поставленной задачи сформирована база данных, содержащая космические снимки исследуемой территории. Классификатор, обученный на снимках спутника Sentinel-2, будет являться эффективным инструментом для поиска «индикаторов» интенсивного газовыделения, что позволит вовремя среагировать экологами на различном рода экологические проблемы.

**Ключевые слова:** *Центральный Ямал, Бованенково, дистанционное зондирование Земли, термокарстовые озера,*