

УДК 574.3.34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ РОЖДАЕМОСТИ И СМЕРТНОСТИ

А.Я. Моничев¹, В.М. Афонин¹, Г.С. Розенберг², Д.Б. Гелашвили¹

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603600, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23*

²*Институт экологии Волжского бассейна РАН
Россия, 445003, Тольятти, Комзина, 10*

Поступила в редакцию 19.05.03 г.

Прогнозирование численности населения на основе модельного представления динамики рождаемости и смертности. – Моничев А.Я., Афонин В.М., Розенберг Г.С., Гелашвили Д.Б. – Предложена прогностическая модель динамики численности народонаселения планеты. Особенностью модели является аналитическая запись индексов рождаемости и смертности в виде функциональной зависимости от численности населения. В качестве истинного регулятора демографических процессов в модели используется значение плотности населения.

Ключевые слова: рождаемость, смертность, конкуренция, кооперация, численность населения, плотность населения, демографический прогноз.

Forecasting the human population in terms of a model of birth and death rate dynamics. – Monichev A.Y., Afonin V.M., Rozenberg G.S., Gelashvili D.B. – A model of the human population dynamics is offered. It features an analytical expression for the birth and death rates as a function of the population number. The population density is treated as the master factor in demographic processes.

Key words: birth rate, death rate, competition, cooperation, population number, population density, demographic forecast.

Закрепленная документами конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 1992) концепция «устойчивого развития» вызвала неоднозначную реакцию со стороны широкой общественности и научных кругов. Это предопределено фундаментальным внутренним противоречием, содержащимся в концепции и заключающемся в том, что в ней, с одной стороны, подчеркивается необходимость постоянного развития (в том числе и материального), а с другой – предполагается самоограничение этого развития через рациональное перераспределение в планетарном масштабе истощаемых ресурсов и контроля за численностью населения планеты. Вопросам прогнозирования численности населения посвящено достаточное число работ (Бахметова, 1991; Небел, 1993; Капица, 1992; Капица и др., 1997; Розенберг и др., 1997; Афонин, 2000). Интерес к этой проблеме вполне понятен ввиду того, что именно демографические характеристики являются основой для дальнейших прогнозов в таких областях жизнедеятельности, как экология, экономика, политика. В таблице сведена лишь часть моделей и прогнозов численности населения Земли, которые в данной статье мы не будем комментировать (комментарий и соответствующие ссылки можно найти в статье Г.С. Розенберга и др., 1997).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

Прогнозы роста населения Земли

Автор прогноза	Глубина прогноза, год	Прогнозируемая численность, млрд чел.
<i>Левенгук А.</i> (1679) (по данным В.И. Данилова-Данильяна и К.С. Лосева (2000, с. 57))	-	13.4
<i>Мальтус Т.</i> (модель геометрического роста при $T_{1800} = 0.9 \cdot 10^9$, $\varepsilon = 0.006 \cdot 10^9$, $t = 200$ лет)	2000	3
<i>Мальтус Т.</i> (модель геометрического роста при $T_{1900} = 0.9 \cdot 10^9$, $\varepsilon = 0.005 \cdot 10^9$, $t = 100$ лет)	2000	240
<i>Циолковский К.Э.</i> (1928) (по критерию надежности)	1990	4
<i>Сахаров А.Д.</i> (1972) (по критерию доступности организованной площади)	2020	11
<i>Котляков В.М.</i> (1994) (по критерию нарушенной биоты суши)	1990	0.6 – 1
<i>Виноградов М.Е.</i> с соавторами (1994) (по критерию потребляемой продукции)	1990	3 – 4
Жирмунский А.В., Кузьмин В.И. (1994) (по критерию критических уровней развития)	2003 – 2008	7.4 – 9.1
<i>Капица С.П.</i> (1999) (по критерию гиперболического роста $N = 186/[2025 - T]$, где $T_0 = 2025$ от Р.Х. – критическая дата)	2020	12 – 13
Статистический прогноз (по критерию метода наименьших квадратов по данным 1000 – 1985 гг.)	2000	6.5 – 7

Как правило, для такого рода прогнозов используется методология экстраполяции данных линейным, квадратичным (рис. 1) или каким-либо другим приближением (Капица и др., 1997).

Указанная процедура является полностью формальной и не учитывает никаких управляющих механизмов, реализуемых в человеческой популяции в целях регуляции своей численности. На тот факт, что такая регуляция, по-видимому, существует, указывает более детальный анализ расчета динамики народонаселения планеты, если провести его с учетом отдельного рассмотрения рождаемости и смертности как составляющих прироста.

Согласно имеющимся данным индексы рождаемости и смертности претерпевают ди-

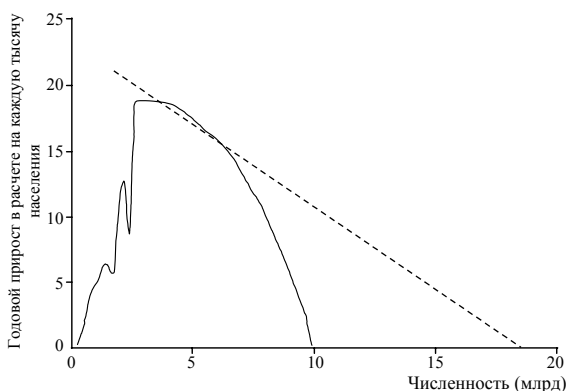


Рис. 1. Линейная (пунктирная линия) и квадратичная (сплошная линия) экстраполяции темпов роста глобальной численности народонаселения (Афонин, 2000)

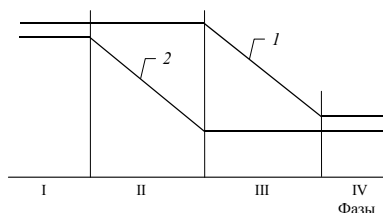


Рис. 2. Схема исторического хода динамики изменения рождаемости (1) и смертности (2) согласно демографическим данным (Небел, 1993). Фазы: I – «примитивная» стабильность; II, III – демографический переход; IV – «современная» стабильность

лей коррелирует с динамикой показателей для развивающихся стран, вклад которых в мировое население является подавляющим.

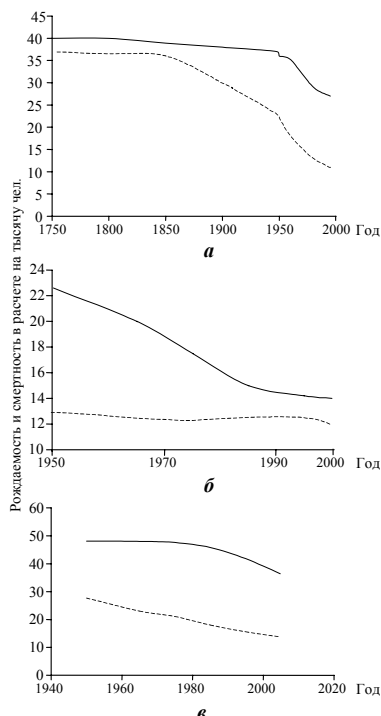


Рис. 3. Динамика рождаемости (сплошная линия) и смертности (пунктирная линия): а – в мире в целом (Медоуз и др., 1994), б – в развитых странах (Кваша, Ионцев, 1995), в – в слабо-развитых странах (Небел, 1993)

намические изменения, схематически представленные на рис. 2 (Небел, 1993).

Представленная схема вполне соответствует кривым, построенным на основе демографической статистики (рис. 3).

В силу отличия социальных условий развитые и развивающиеся страны находятся на разных этапах эволюционных изменений рождаемости и смертности (ср. рис. 2 и 3). То, что для слаборазвитых стран согласно схеме, приведенной на рис. 2, – дело будущего, для развитых стран реализуется уже в настоящее время. Однако в целом, как и следовало ожидать, динамика глобальных демографических показателей коррелирует с динамикой показателей для развивающихся стран, вклад которых в мировое население является подавляющим.

Зависимости, приближающие кривые на рис. 2 и 3, математически могут быть представлены функциями вида:

$$\begin{cases} r(t) = r_{\max} / (1 + a \cdot N(t)^\gamma), \\ s(t) = s_{\max} / (1 + b \cdot N(t)^\delta), \end{cases} \quad (1)$$

где $r_{\max}$, $s_{\max}$, a , b , γ , δ – некоторые положительные параметры, численные значения и смысл которых мы обсудим позднее, а $N(t)$ – численность населения планеты в соответствующие моменты времени.

Характерный вид кривых, построенных на основе зависимостей (1), приведен на рис. 4.

Функции вида (1) хорошо известны в математической биофизике и используются для описания ферментативной кинетики активирования и ингибирования биохимических реакций (Рубин и др., 1987).

Нам удалось показать, что подобные функции могут описывать также процессы размножения популяции клеток, в частности костномозговых (Моничев, 1984).

При этом параметры a и b характеризуют кооперативное подавление описываемых процессов, γ , δ – степень подобной кооперации. Параметры $r_{\max}$, $s_{\max}$ характеризуют максимально реализуемые значения анализируемых показателей. По указанным признакам подобные

зависимости активно привлекаются и для описания популяционной динамики вида (Свирижев, Логофет, 1978).

Во всех указанных случаях такие зависимости описывают конкурентные и кооперативные взаимодействия в среде, а эти отношения, без сомнения, существуют и в человеческой популяции. Поэтому вполне логично использовать их для описания демографических процессов, тем более что они соответствуют отмеченным статистическим закономерностям (см. рис. 2 и 3).

Численные значения параметров, входящих в зависимость (1), могут быть найдены на основе демографических данных. Так, значения $r_{\max}$, $s_{\max}$ согласно схеме, приведенной на рис. 2, представляют собой те высокие значения рождаемости и смертности, которые имеют место во время «примитивной» стабильности и равны соответственно 40 и 37.5. Для нахождения значений остальных коэффициентов в принципе достаточно двух временных отсчетов, которые отмечены на рис. 4, поэтому эти коэффициенты легко находятся из двух систем уравнений:

$$\begin{cases} r_1 = r_{\max} / (1 + a \cdot N_{(t1)}^\gamma), \\ r_2 = r_{\max} / (1 + a \cdot N_{(t2)}^\gamma); \\ s_1 = s_{\max} / (1 + b \cdot N_{(t1)}^\delta), \\ s_2 = s_{\max} / (1 + b \cdot N_{(t2)}^\delta). \end{cases}$$

В этом случае полученные кривые будут проходить точно через отмеченные точки. Однако более важно, чтобы соответствующие зависимости наилучшим образом приближали не две характерные точки, а все множество демографических данных, касающихся этих зависимостей. При этом следует учесть, что наиболее обширные статистические наблюдения относятся не к показателям рождаемости и смертности, а к общему годовому приросту населения, который согласно зависимостям (1) может быть записан в следующем виде:

$$p_{(t)} = (r_{\max} / (1 + a \cdot N_{(t)}^\gamma)) - (s_{\max} / (1 + b \cdot N_{(t)}^\delta)). \quad (2)$$

На рис. 5 эти данные, характеризующие годовой прирост в соответствующий момент времени, нанесены точками.

Задача состоит в том, чтобы аппроксимировать данные точки с помощью кривой. Для этого была использована процедура Хука – Дживса (Банди, 1988) мини-

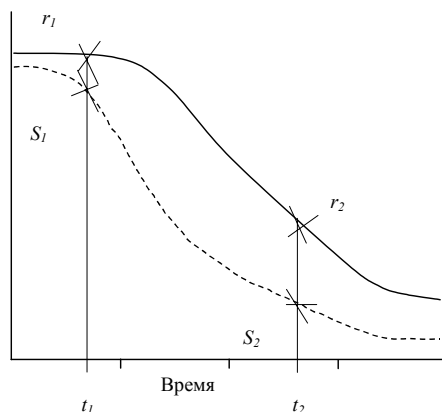


Рис. 4. Характерный вид модельных кривых рождаемости (сплошная линия) и смертности (пунктирная линия)

мизации функции, представляющей собой сумму квадратов отклонений отмеченных точек от кривой. По сути, это – один из вариантов метода наименьших квадратов в применении к сложной нелинейной функции вида (2).

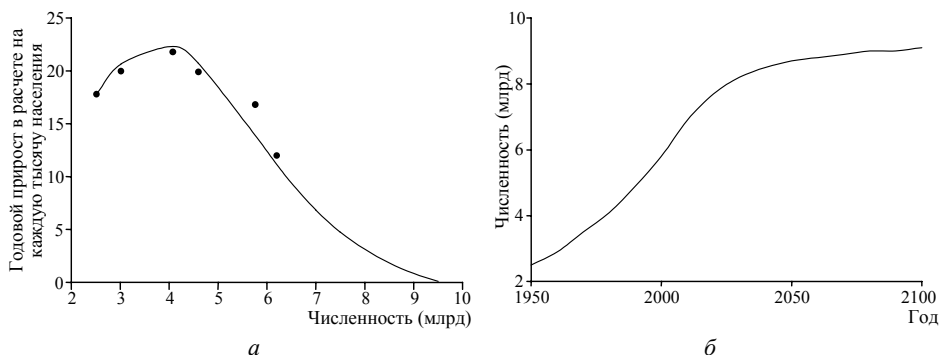


Рис. 5. Основные демографические характеристики модели: *а* – кривая динамики изменения темпов роста народонаселения планеты, полученная методом Хука – Дживса; *б* – динамика численности народонаселения

Указанная процедура позволяет найти те значения параметров a , b , δ и γ , которые наилучшим образом приближают статистические данные с помощью выбранной нами моделирующей функции (2). При этом были получены следующие значения соответствующих величин:

$$a = 3.94 \cdot 10^{-11}; \quad b = 2.565 \cdot 10^{-4}; \quad \gamma = 2.91; \quad \delta = 1.049. \quad (3)$$

После того как вид и параметры функций, моделирующих динамику рождаемости и смертности, определены, можно приступить к прогнозированию закономерностей роста численности народонаселения:

$$dN/dt = (r - s) \cdot N. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4), описывающее динамику численности населения, определяет скорость ее роста как разницу индексов рождаемости и смертности, если численность (N) исчисляется в тысячах человек.

Данное уравнение легко решается любым из пошаговых методов приближенного интегрирования, реализуемых на компьютере. Результаты счета уравнения (4) представлены на рис. 5.

Приведенные результаты модельного прогнозирования показывают, что численность населения в мире должна стабилизироваться к 2100 году на отметке приблизительно в 9.8 млрд человек. Это меньше прогнозов по линейной и квадратичной экстраполяции (см. рис.1) и соответствует современным прогнозам ООН. Интересно, что значение предельной численности мирового населения можно получить также, приравняв функциональные выражения для индексов рождаемости и смертности, так как предельная численность одновременно является результатом равновесия указанных процессов:

$$r_{\max} / (1 + a \cdot N_{\text{равн}}^{\gamma}) = s_{\max} / (1 + b \cdot N_{\text{равн}}^{\delta}).$$

Следует заметить, что в действительности истинным регулятором исследуемых нами процессов является не глобальная численность, а какая-то усредненная локальная величина с нею связанная, поскольку близкодествующие связи всегда являются более сильными, чем дальнодествующие. Естественно предположить, что подобной величиной является плотность населения ρ , связанная с численностью N простым соотношением $\rho = N/S$, где S – площадь того локального участка, где анализируется динамика народонаселения, а N – численность населения данного региона. В этом случае формулы (1) и уравнение (4) примут вид:

$$\begin{cases} r = r_{\max} / (1 + c \cdot \rho^{\gamma}), \\ s = s_{\max} / (1 + d \cdot \rho^{\delta}), \\ dp/dt = (r - s) \cdot \rho. \end{cases} \quad (5)$$

Удобство подобной записи заключается в том, что в данном виде уравнения оказываются пригодными для анализа региональных проблем народонаселения. Однако остается открытым вопрос о правомерности применения формул (5) в региональном аспекте. Насколько просматриваются отмеченные ранее закономерности в регионах? Для ответа на этот вопрос мы воспользовались статистическими данными по 48 районам Нижегородской области (Гелашвили и др., 2000), из которых следует, что индексы рождаемости и смертности действительно отрицательно коррелируют с плотностью населения. Коэффициенты корреляции соответственно составляют $k_r = -0.178$, $k_s = -0.335$. Подобное обстоятельство вполне можно рассматривать как аргумент в пользу справедливости характера зависимостей $r(\rho)$ и $s(\rho)$, приведенных в формулах (5), которые предусматривают именно отрицательную корреляцию.

Сложность анализа региональных процессов заключается в том, что регулирующее влияние плотности зачастую оказывается перекрытым другими процессами, например какими-либо социальными катаклизмами. В первую очередь это сказывается на значениях коэффициентов c , d , которые отражают конкурентно-ингибирующие отношения в системе, а следовательно, безусловно должны зависеть от таких показателей, как социальные условия, качество жизни, степень индустриализации региона. Динамику изменения этих коэффициентов можно проследить, если известны данные, касающиеся динамики индексов $r(t)$ и $s(t)$, а также плотности $\rho(t)$ в анализируемом регионе. Рассчитанный нами по данным рождаемости и смертности в Нижегородской области в период с 1989 по 1998 год коэффициент c увеличился в два раза и составил $2.8 \cdot 10^{-10}$, а коэффициент d уменьшился в 1.5 раза и составил $2.9 \cdot 10^{-4}$. Поэтому основной особенностью региональных прогнозов является учет временной зависимости коэффициентов c и d в модели (5), то есть определение вида функций $c(t)$ и $d(t)$ на основании региональной статистики:

$$\begin{cases} r(\rho, t) = r_{\max} / (1 + c(t) \cdot \rho^{\gamma}), \\ s(\rho, t) = s_{\max} / (1 + d(t) \cdot \rho^{\delta}), \\ dp/dt = (r - s) \cdot \rho. \end{cases} \quad (6)$$

В заключение остановимся на специфической особенности данных модельных представлений в прогнозировании численности.

Модель представляет собой вариант смыслового подхода к проблеме, когда использованные формульные зависимости несут конкретное смысловое содержание. В принципе формулы (6) описывают конкурентное взаимодействие в популяции. Причем коэффициенты c и d отражают степень конкуренции и связаны в силу этого с социально-экономическими факторами. Коэффициенты γ, δ , если округлить их до целых значений, по смыслу формул (1) указывают размеры той группы людей или социальной ячейки, которая выступает в качестве единого регулирующего агента. Оценка показывает, что эти значения находятся в интервале от 1 до 6 (в нашем случае $\gamma \approx 3$, $\delta \approx 1$), то есть соответствуют возможным размерам семьи.

Результаты проведенных модельных исследований показывают, что рождаемость и смертность следует рассматривать как результат конкурентных и кооперативных взаимоотношений в человеческой популяции. Последние в конечном итоге определяются численностью или плотностью населения. Построенная на этих допущениях модель является непротиворечивой и соответствует имеющимся данным о динамике изменения глобальных показателей рождаемости, смертности и численности населения в мире. Перспективным является использование полученных результатов для региональных демографических прогнозов с учетом показателя плотности населения как истинного регулятора демографических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афонин В.М. Модельный анализ роста населения планеты с учетом саморегуляции данного процесса // Тр. биол. фак. Нижегород. гос. ун-та. 2000. Вып. 3. С. 54 – 57.
- Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
- Бахметова Г. Ш. Современные методы демографического прогнозирования // Проблемы прогнозирования. М.: Наука, 1991. С. 68 – 72.
- Гелашивили Д.Б., Розенберг, Басуров В.А., Моничев А.Я., Пуртов И.И., Сидоренко В.В., Юнина В.П. Анализ пространственной динамики напряженности экологической ситуации региона на основе обобщенного индекса антропогенной нагрузки (на примере Нижегородской области) // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2000. С.44 – 52.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие: Учеб. пособие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
- Капица С.П. Модель роста народонаселения мира // Математическое моделирование. М.: Наука, 1992. Т. 4, вып. 4. С. 67 – 76.
- Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997. 285 с.
- Кваша А. Я., Ионцев В. А. Современная демография. М.: Изд-во МГУ, 1995. 272 с.
- Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й. За пределами роста. М.: Прогресс, 1994. 304 с.
- Моничев А.Я. Динамика кроветворения. М.: Медицина, 1984. 176 с.
- Небел Б. Наука об окружающей среде: Как устроен мир. М.: Мир, 1993. Т 1. 424 с.
- Розенберг Г.С., Краснощеков Г.П., Гелашивили Д.Б. Мальтус, Циолковский, Котляков и проблемы устойчивого развития и народонаселения // Вестн. ДВО РАН. 1997. №2. С. 8 – 12.
- Рубин А.Б., Пытьева Н.Ф., Ризниченко Г.Ю. Кинетика биологических процессов. М.: Изд-во МГУ, 1988. 306 с.
- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.