

**Министерство образования РФ**  
**Российский государственный гидрометеорологический университет**

**На правах рукописи**  
**УДК 556.555.3.06 (861)**

**Домингес Калье Эфраин Антонио**

**СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ПРИТОКА ВОДЫ К  
ВОДОХРАНИЛИЩАМ ГЭС РЕСПУБЛИКИ КОЛУМБИЯ**

**Специальность 25.00.27 - гидрология суши, водные ресурсы,  
гидрохимия**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург**  
**2004**

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор В. В. Коваленко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Р. П. Репинская  
кандидат технических наук,  
Е. В. Шевнина

Ведущая организация: Санкт-петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится "12" февраля 2004 г. в 15— часов на заседании специализированного совета Д.212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан "12" января 2004 г.

Ученый секретарь специализированного совета,

кандидат географических наук



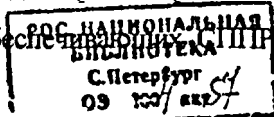
Воробьев В. Н.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность темы. Более 70% производимой в Колумбии электроэнергии генерируется на гидроэлектростанциях. В связи с этим энергетическая система страны очень чувствительна к изменениям гидрологического режима. С целью оптимального управления, соблюдения принципа бесперебойного электроснабжения и определения стратегии ценообразования на электричество нужны гидрологические прогнозы для поддержки процедур принятия решений. Стохастические процедуры принятия решений (СППР) требуют вероятностного описания ограничительных факторов выработки электроэнергии, в число которых входят гидрологические характеристики притока воды к водохранилищам ГЭС. В настоящее время используемые модели прогноза притока воды описывают вероятностные характеристики притока на основе априорной информации, а в то же время стохастические процедуры принятия решений требуют апостериорные вероятности притока.

С целью выхода на оптимальную выработку электроэнергии без ущерба для принципа бесперебойного электроснабжения; энергетический сектор Колумбии нуждается в прогнозе байесовских (апостериорных) вероятностей характеристик притока и оценке долгосрочных изменений гидрологического режима при возможных колебаниях климата. Поэтому исследование по данной тематике представляется оправданным, актуальным и имеет большое практическое значение.

Цели и задачи исследования. Целью настоящей диссертации является разработка математических моделей для прогнозирования притока к водохранилищам ГЭС Колумбии, обеспечение бесперебойности СППР



мым прогнозом апостериорных вероятностей. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Сбор информации, создание банка данных и статистическая обработка данных для оценки существующего гидрологического режима Колумбии по имеющимся в России методикам.

2. Оценка долгосрочных изменений гидрологического режима Колумбии при возможных колебаниях климата

3. Разработка методик прогноза месячного притока к водохранилищам ГЭС на основе динамической модели и регрессионных зависимостей (на примере реки Магдалены).

4. Разработка и численная реализация методик прогнозирования вероятностных характеристик месячного притока к водохранилищам ГЭС на основе стохастической модели формирования стока.

Методика исследований и исходный материал. Решение поставленных задач проводилось в два этапа: а) всесторонний анализ основ функционирования энергетического сектора и б) применение методов математического моделирования для создания системы прогнозирования притока к водохранилищам ГЭС Колумбии. Для разработки требуемых математических моделей и компьютерного интерфейса системы моделирования применялись принципы объектно-ориентированного программирования на базе сред разработки Delphi 5 и Visual Basic 6. В качестве платформ тестирования разработанных численных схем использовались приложения Excel и MathCad. Исходная информация об энергетическом секторе Колумбии получена из официальных публикаций учреждений, имеющих прямое отношение к делам гидроэнергетики в Колумбии и в мире.

В качестве эталонного объекта выбрано водохранилище Бэтания, расположенное в верховьях реки Магдалены. Для контрольных створов и суммарного притока строились регрессионные, динамические и стохастические модели прогноза притока. Для нахождения возможных предикторов построена корреляционная матрица размером 200 на 40. Гидрометеорологическая информация получена из баз данных Института гидрологии, метеорологии и исследований по окружающей среде (ИГМИОС), а конкретная информация по эталонному водохранилищу любезно предоставлена фирмой EMGESA..

Научная обоснованность и достоверность положений и выводов подтверждается статистическими оценками надежности промежуточных результатов, включая оценку чувствительности прогнозов к погрешностям прогнозных осадков и способам задания параметров стохастической модели формирования стока. Дополнительно эффективность методики стохастического прогнозирования притока проверена путем использования статистических критериев согласия Пирсона, Колмогорова и Смирнова на трех уровнях значимости при трех степенях свободы. Кроме того, уверенность в надежности результатов придает опыт широкого применения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для решения научно технических задач, требующих описания эволюции плотности вероятности марковских случайных процессов, к которым принадлежит процесс формирования стока.

Научная новизна и практическая значимость. В ходе диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Построены цифровые карты существующего гидрологического режима (годового стока) Колумбии.

2. Построены карты аномалий стохастических характеристик гидрологического режима Колумбии для сценария удвоения содержания углекислого газа в атмосфере.

3. Разработана методика прогноза притока воды к водохранилищам ГЭС на основе динамических и регрессионных моделей.

4. Разработана методика прогнозирования вероятностных характеристик притока воды к водохранилищам ГЭС на основе стохастической модели формирования стока.

Практическая значимость исследования, определяется возможностью снабжения гидроэнергетического сектора Колумбии стандартной для всех ГЭС методикой прогноза притока к водохранилищам ГЭС в динамических, регрессионных и стохастических вариантах. Значимость работы подчеркивается тем, что она выполнялась при полной поддержке Института гидрологии, метеорологии и исследований по окружающей среде Колумбии (ИГМИОС), Всемирной метеорологической организации и частично финансировалась программой развития ООН. Участие автора в данном исследовании инициировано Президентом республики Колумбия Альваро Урибе Велес.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены на научных семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, на итоговых, сессиях ученого совета РГГМУ, на международных конференциях Национального колумбийского университета, Федерального бразильского университета и на научном семинаре университета Кадиса. Полные и частичные отчеты о результатах ис-

следований переданы президенту Подкомитета по гидрологии и гидроагрегатам Колумбии, главному гидрологу фирмы, управляющей водохранилищем Бэтания и Институту гидрологии, метеорологии и исследований по окружающей среде Колумбии. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, и приложения. Основное содержание диссертации изложено на 156 страницах текста (не считая приложений), включая 35 рисунков и 14 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность темы, определены цели и задачи исследований, отмечена ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое описание существующих работ в той же области исследования, приведена информация о структуре диссертации и апробации полученных результатов.

В первой главе даются описательные сведения о гидроэнергетическом секторе Колумбии и характерных его проблемах. Подробно рассматривается модель принятия решений в этом секторе, и описываются существующие модели прогноза притока, к водохранилищам ГЭС, в том числе и вероятностные модели. Также рассматриваются их недостатки. В заключительной части первой главы дана постановка задачи исследования и представлены концептуальные его основы.

Во второй главе диссертации описываются используемые математические модели, подробно излагаются технологии их идентификации, параметризации, и детально рассматриваются применяв-

мысленные численные схемы. Подробно разобраны схемы построения регрессионных, динамических и стохастических моделей. Регрессионные модели разработаны на основе построенной программы расчета многомерных зависимостей, а динамические модели построены на основании математического оператора с сосредоточенными параметрами в виде:

$$\tau \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{k} Q(t) = \dot{X}(t),$$

где  $Q$  - расход воды,  $L^3/T$ ;

$\dot{X}$  - объем осадков,  $L^3/T$ ;

$k$ —коэффициент стока;

$\tau$  - время релаксации.

Для решения уравнения (1) использована неявная схема

$$\frac{\tau}{\Delta t} (Q^{t+\Delta t} - Q^t) + \frac{Q^{t+\Delta t}}{k} = \dot{X}^{t+\Delta t}, \quad (2)$$

параметризация которой проводится двумя способами: а) методом Ньютона и б) методом нелинейной оптимизации. Нелинейная оптимизация проводилась путём автоматизации утилиты пакета Microsoft Excel под названием Solver Tool, которая использует обобщенный вариант метода координатного спуска, разработанного в Техасском и Клевландском университетах. Разработанный автором код для автоматизации вышеуказанной утилиты написан на



языке Visual Basic for Microsoft Applications и представлен в приложениях диссертации.

В основе разработки долгосрочного и месячного прогноза вероятностных характеристик притока положена стохастическая модель формирования стока, разработанная на кафедре гидрофизики и гидропропозов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ). Её можно вывести из уравнения (1), если предположить, что  $-1/k\tau \equiv c(t)$  и  $\dot{X}/\tau \equiv N(t)$ . Если  $c(t)$  и  $N(t)$  неслучайные функции, то и решение этой модели - неслучайный, а динамический процесс  $Q = /(/)$ . Однако на самом деле и  $c(t)$ , и  $N(t)$  являются случайными. Поэтому будем считать, что  $c(t) = \bar{c}(t) + \tilde{c}(t)$  и  $N(t) = \bar{N}(t) + \tilde{N}(t)$ , где  $\tilde{c}(t)$  и  $\tilde{N}(t)$  - случайные процессы с независимыми ординатами (дельта коррелированные) с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}$ ,  $G_{\tilde{N}}$ , и  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ . Тогда модель формирования стока можно привести к виду уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(t, Q)}{\partial t} + \frac{\partial [A(t, Q)p(t, Q)]}{\partial Q} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 [B(t, Q)p(t, Q)]}{\partial Q^2} = 0, \quad (3)$$

где функции  $A(t, Q)$  и  $B(t, Q)$  - неслучайные функции времени и  $Q$  - «ординат», определяющие особенности изучаемого марковского процесса (коэффициенты сноса и диффузии), а  $p(t, Q)$  - плотность вероятности исследуемой случайной характеристики.

Для решения уравнения (3) использовались разработанные в ходе данного исследования явная и неявная схемы конечно-разностной аппроксимации. Обобщенно эти схемы можно представить уравнением

$$\begin{aligned}
 \frac{P_j^{i+1} - P_j^i}{\Delta t} = & \left\{ \sigma \left( \frac{\varphi_R (A_{j+1}^{i+1} P_{j+1}^{i+1} - A_j^{i+1} P_j^{i+1})}{\Delta Q} + \frac{\varphi_L (A_j^{i+1} P_j^{i+1} - A_{j-1}^{i+1} P_{j-1}^{i+1})}{\Delta Q} \right) + \right. \\
 & \left. + (1 - \sigma) \left( \frac{\varphi_R (A_{j+1}^i P_{j+1}^i - A_j^i P_j^i)}{\Delta Q} + \frac{\varphi_L (A_j^i P_j^i - A_{j-1}^i P_{j-1}^i)}{\Delta Q} \right) \right\} + \\
 & + \left\{ \sigma \left[ \frac{1}{2} \frac{(B_{j+1}^{i+1} P_{j+1}^{i+1} - 2B_j^{i+1} P_j^{i+1} + B_{j-1}^{i+1} P_{j-1}^{i+1})}{\Delta Q^2} \right] + \right. \\
 & \left. + (1 - \sigma) \left[ \frac{1}{2} \frac{(B_{j+1}^i P_{j+1}^i - 2B_j^i P_j^i + B_{j-1}^i P_{j-1}^i)}{\Delta Q^2} \right] \right\}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $\varphi_R, \varphi_L$  - коэффициенты направленных разностей, а  $\sigma$  и  $(1 - \sigma)$  - весовые коэффициенты временных слоев. При значении  $\sigma = 1$  уравнение (4) вырождается в неявную схему, а когда  $\sigma = 0$  в явную. При этом для применения явной схемы требуется выполнение условия Куранга-Фридрихса-Леви в виде:

$$\max(|B(\tau, Q)|) \frac{\Delta t}{\Delta Q^2} < \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Для долгосрочного прогноза (сценарных оценок) вероятностных характеристик притока при условии, что  $\partial Q(\tau, Q) / \partial t = 0$  из уравнения (3), для коэффициентов вариации ( $C_\kappa$ ) и асимметрии ( $C_s$ ), выведены следующие прогнозные соотношения:

$$a_{np} = (G_{\bar{z}\bar{N}} + 2\bar{N}_{np}) / (2\bar{c}_{np}), \quad b_{0np} = -G_{\bar{N}} / (2\bar{c}_{np}), \quad b_1 = 2G_{\bar{z}\bar{N}} / (2\bar{c}_{np}), \quad (6)$$

$$\alpha_{1np} = q_{np} = a_{np} - b_{1np}, \quad (7)$$

$$\alpha_{2np} = \alpha_{1np} a_{np} - b_{0np} - 2\alpha_{1np} b_{1np}, \quad (8)$$

$$\alpha_{3np} = \alpha_{2np} a_{np} - 2\alpha_{1np} b_{0np} - 3\alpha_{2np} b_{1np}, \quad (9)$$

$$C_{np} = \sqrt{(\alpha_{2np} - q_{np}^2) / q_{np}^2}, \quad (10)$$

$$C_{стп} = \frac{\alpha_{3np} - 3\alpha_{2np}\alpha_{1np} + \alpha_{1np}^3}{C_{np}^3 q_{np}^3}. \quad (11)$$

где  $\alpha_i$  — статистический момент порядка  $i$ .

Представленные выражения (6 - 11) позволяют строить прогнозные карты гидрологических характеристик с заданной заблаговременностью. По полученным картам можно, например, вычислить возможный гидроэнергетический потенциал при заданных сценариях изменения климата. Нужно подчеркнуть, что полученное квазистационарное решение является обязательным элементом и для идентификации параметров уравнения ФПК, используемого в динамическом режиме.

Третья глава посвящена практическому применению, разработанных во второй главе регрессионных, динамических и стохастических моделей.. Площадь водосбора эталонного водохранилища 13600 км<sup>2</sup>, средний приток воды 400 м<sup>3</sup>/с. Контрольными створами избраны гидрологические станции 2104701 - Пуэнте Балсеадеро и

2105706 - Паикол, находящиеся в руслах рек Магдалены и Паэз и контролирующие 93% притока к водохранилищу Бэтаня. Выбранное водохранилище производит 15% электроэнергии страны. На водосборной площади этого водохранилища находятся 200 метеорологических и 40 гидрологических станций (рисунок 1). Все они находятся под управлением Гидрометцентра (ИГМИОС). Плотность метеорологической и гидрологической сетей составляет 68 и 340 км<sup>2</sup>/ст соответственно.

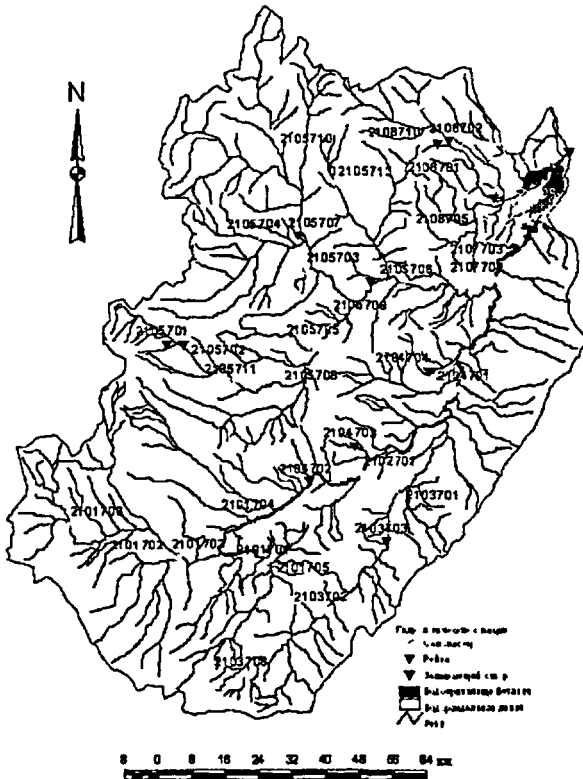


Рисунок 1 - Гидрологическая сеть на водосборной площади водохранилища Бэтаня

К водосборной площади водохранилища плотно прилегает восточный район страны, от которого по ущельям восточного Кордильера передается воздействие однопикового режима выпадения осадков восточной равнины. Поэтому на водосборной площади Бэ-тании на одних осадкомерных станциях фиксируется двухпиковый режим выпадения осадков, характерный для горного андийского района, на других - однопиковый режим юга-востока Колумбии. Таким образом, по данным контрольных створов, месячный приток воды к водохранилищу в большей степени однопиковый, но по гидрографам стока видно, что на некоторых гидрологических станциях этот режим будет размытым в большей или меньшей степени. В итоге суммарный приток к водохранилищу обладает размытым многопиковым режимом. Самый главный пик гидрографа суммарного притока приходится на июль, а менее значительные максимумы могут появляться в апреле и сентябре (рисунок 2).

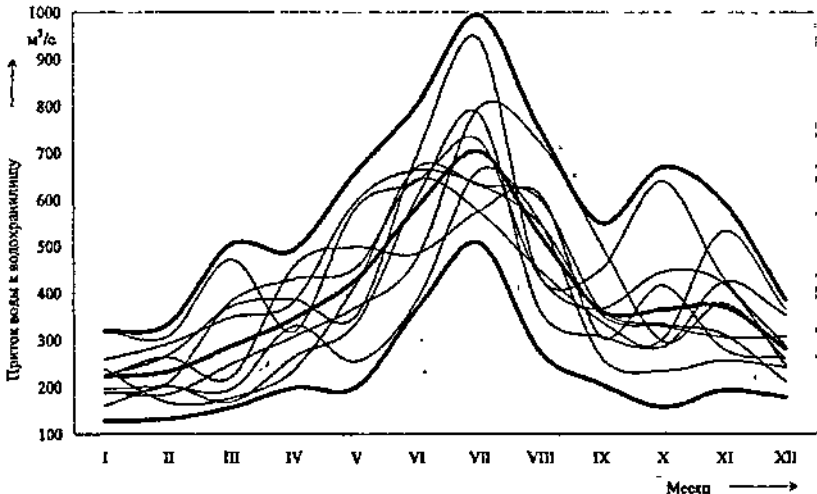


Рисунок 2 - Гидрограф суммарного притока воды к водохранилищу

Для контрольных створов строились регрессионные, динамические и стохастические модели прогноза притока. Чтобы задать точку отсчета, по природному прогнозу и существующим в Колумбии моделям прогноза притока проводились расчеты числа оправдавшихся прогнозов и критерия  $S/\sigma_{\Delta}$ . В качестве природного прогноза использовались многолетние среднемесячные значения притока. Результаты показали, что применяемые в Колумбии - модели прогноза притока по эффективности уступают природному прогнозу, о чем свидетельствуют данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Сводка результатов прогнозирования по используемым в Колумбии моделям притока воды

Модель прогноза.	$S/\sigma_{\Delta}$	Число оправдавшихся прогнозов по ГМЦ, %	Число оправдавшихся прогнозов по ПГЭК, %
По природному прогнозу	0.69	69	71
Марковская	1.03	48	59
Марковская (сезонная)	0.83	59	66
АР(1,12)	0.78	65	73
СС(3)	0.68	66	68
АРСС(1,3)	0.68	68	75
АРПСС(0,12,0)	0.70	68	73

Разработанные регрессионные модели, при использовании фактических осадков, показали очень хорошую эффективность, но при использовании других вариантов прогнозных осадков их эффективность резко снизилась до пределов неудовлетворительных прогнозов. В свою очередь, эффективность прогнозов по динамической модели лучше, чем по природному прогнозу (таблица 2). В общем случае рассмотрено 18 вариантов регрессионных зависимостей и 8 динамических моделей.

Таблица 2 - Оценки результатов прогнозирования по динамической модели

Вариант задания осадков	Способ параметризации					
	Итерационный метод Ньютона			Нелинейная оптимизация $k = \text{const}$		
	S/ $\sigma_{\Delta}$	ГМЦ	ПЭК	S/ $\sigma_{\Delta}$	ГМЦ	ПЭК
Фактические осадки	0.42	94	98	0.42	94	98
Среднемесячное многолетнее значение осадков	0.63	76	82	0.63	72	79
$X_{\text{прог}} = 0.5(X_{T,j-1} + X_{T,\text{сред}})$	0.67	72	78	0.68	74	79
$X_{\text{прог}} = 0.5X_{T,\text{сред}} + 0.25X_{T,j-1} + 0.25X_{T,\text{сред}}$	0.76	71	72	0.73	74	76
$X_{\text{прог}} = f(X_{T,\text{сред}}, X_{T,j})$	0.68	72	80	0.62	73	80
$X_{\text{прог}} = f(X_{T,\text{сред}}, \dot{X}, \ddot{X})$	0.63	76	82	0.62	72	80

С целью прогноза долгосрочных изменений гидрологического режима Колумбии, на сетке 10 на 10 километров в 11000 узлах проводилась параметризация динамической модели. Изолинии критерия  $S/\sigma_A'$  показали, что на 90%-ах динамическая модель «работает» удовлетворительно. Далее в каждом узле применялась квазистационарная модель ФПК. Согласно полученным результатам, при удвоении углекислого газа в атмосфере в Колумбии 65% территории страны может испытывать значительные изменения нормы стока. При этом только 5% в сторону понижения (рисунок 3). Согласно полученным результатам гидрологический режим Колумбии оказался неустойчивым в 5 климатических районах страны.

Для стохастического прогнозирования месячного притока по схеме (4) использованы два варианта задания начальных условий. В первом варианте среднемесячный фактический приток задавался в качестве нормы, и по погрешности его определения вычислялась дисперсия. По этим данным строилось нормальное распределение, которое задавалось в качестве начального распределения. Во втором варианте, начальное распределение строилось по ежедневным значениям притока каждого месяца. Первоначально, по характерному гидрографу стока выбирались те месяцы года, для которых не опровергается, гипотеза о независимости ежесуточных значений притока. Проверка проводилась по критерию числа повышений и понижений. Затем, по суточным значениям для каждого месяца, строилась кривая обеспеченности. При этом для всех эмпирических кривых обеспеченности подбиралась теоретическая кривая в виде гамма распределения.



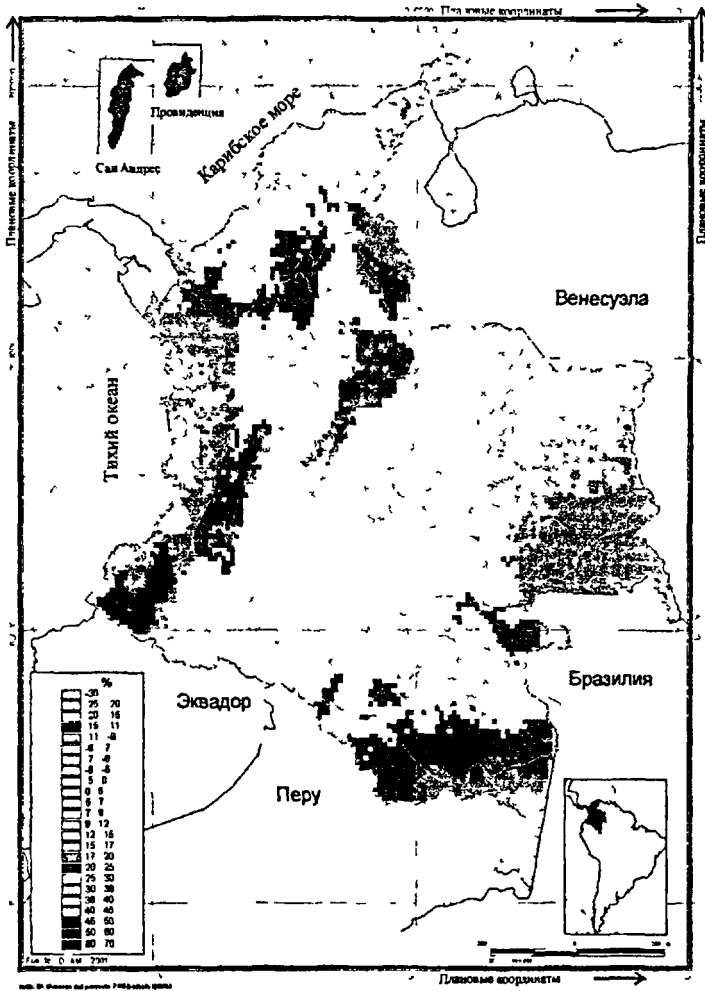


Рисунок 3 - Карта аномалии нормы стока по сценарию  $2^*CO_2$

Эффективность поверочных прогнозов проверялась с помощью критериев Смирнова, Колмогорова и Пирсона. Как показано в таблицах 3 и 4, для первого варианта задания начальных условий применялось 10 способов задания прогнозных осадков и параметров модели ФПК, а для второго варианта только два способа. Оценка

критериев Смирнова, Колмогорова и Пирсона проводилась на трех уровнях значимости и при трех разных степенях свободы. Параметризация модели ФПК проводилась на основе решения обратной задачи для квазистационарного уравнения. При этом, для второго варианта задания начальных условий, начальные моменты вычислялись по фактическим данным, по уравнениям связи центральных и начальных моментов и непосредственно по подобранной кривой распределения. Из рассмотренных способов параметризации только последний оказался успешным. Согласно критериям оценки прогнозов при первом и втором случаях задания начальных условий стохастический прогноз притока стока обладает удовлетворительной эффективностью.

В заключении сформулированы основные научные результаты исследований:

1. Построены цифровые карты существующего гидрологического режима Колумбии (годового стока).

2. Построены цифровые карты ожидаемых аномалий статистических характеристик гидрологического режима Колумбии при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере.

3. Разработаны динамические и регрессионные модели, позволяющие с учетом существующих данных наблюдений прогнозировать месячный приток с удовлетворительной оценкой по принятым в России критериям.

4. Разработаны и апробированы явные и неявные численные схемы решения уравнения ФПК, обеспечивающие удовлетворительное качество прогнозов по критериям согласия-Колмогорова, Пирсона и Смирнова.

Таблица 3 - Оценка оправдываемости прогнозов кривых плотности вероятности по первому варианту задания начальных условий (при степени свободы  $\nu = 15$ )

Способ задания осадков и параметров уравнения ФПК	Оценка критерия оправдываемости, %								
	Смирнова $\omega^2$			Колмогорова $\lambda$			Пирсона $\chi^2$		
	Уровень значимости $\alpha$								
	1	5	10	1	5	10	1	5	10
По фактическим $X, k, G_N$	99	99	99	99	99	99	99	99	99
По предыдущим $X, k, G_N$	56	42	38	15	14	14	65	64	64
По фактическим $X$ , прогнозным $k$ и $G_N$	93	84	81	40	36	36	90	90	90
$X_{\text{прог}} = 0.5X_{j-1} + 0.5X_{\text{ср}}$	72	57	48	19	19	19	71	70	69
$X_{\text{прог}} = 0.25X_{j-1} + 0.25X_{\text{ср}} + 0.5X_{\text{ср}}$	65	52	43	21	21	21	72	67	67
$X_{\text{ср}}$ , прогнозным $k$ и $G_N$	73	60	48	20	20	20	72	70	69
$X_{\text{прог}} = f(X_{\text{ср}}, X_{j-1}, X_{j+2})$	74	61	50	23	20	20	72	69	69
$X_{\text{прог}} = f(X_{T,\text{сред}}, \dot{X}_{T,\text{сред}}, \ddot{X}_{T,\text{сред}})$	72	59	56	19	19	19	74	73	69
По фактическим $X, k$ и $G_N$ прогнозный	85	69	60	27	26	26	75	74	73
$X_{\text{ср}}, k$ и $G_N$ прогнозный	65	56	49	19	17	17	75	70	68

Таблица 4 - Оценка оправдываемости прогнозов кривых плотности вероятности по второму варианту задания начальных условий и разным степеням свободы  $\nu$

$\nu$	Способ задания осадков и параметров уравнения ФПК	Смирнова $\omega^2$			Колмогорова $\lambda$			Пирсона $\chi^2$		
		Уровень значимости $\alpha$								
		1	5	10	1	5	10	1	5	10
15	По фактическим $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	99	99	99	99	99	99	99	99	99
	По многолетним среднемесячным значениям $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	93	71	68	39	36	36	99	99	96
30	По фактическим $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	99	99	99	96	93	93	96	96	96
	По многолетним среднемесячным значениям $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	68	61	50	21	21	21	93	82	61
40	По фактическим $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	99	99	99	93	93	93	96	96	96
	По многолетним среднемесячным значениям $X, k, G_R$ и $G_{cR}$	64	50	39	21	18	18	71	64	46

Для всех моделей написаны приложения на языке Delphi 5. Главное из них программа для решения уравнения ФПК (рисунок 4).

В приложении представлены сведения о виде прогнозов, имеющих место в схеме управления энергетическим сектором Колумбии и о существующих в Колумбии моделях прогноза притока. Представлены распечатки программных кодов, разработанных в диссертации приложений, и материалы по исходным, промежуточным и выходным данным расчетов, в том числе и картографический материал о гидрологическом режиме Колумбии и возможных его аномалиях при увеличении содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Имеются справки о внедрении результатов исследований.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Protocolo para la modelaci6n matematica de procesos hidrol6gicos Meteorologia Colombiana No 1. - Santa Fe de Bogota: Universidad Nacional de Colombia, 2000. - 7 p.

2. Modelo matematico para la formulaci6n de escenarios hidrol6gicos ante el cambio climatico: Meteorologia Colombiana No 2. - Santa Fe de Bogota: Universidad Nacional de Colombia, 2000. - 10 p.

3. Modelo matematico para la formulation de escenarios de escorrentia ante posibles variantes del cambio climatico: Comunicaciones del IV Dialogo interamericano de gerenciamiento de aguas en Foz do Iguazu: - Parana: OEA, RIRH, 2001. - 17 p.

4. Применение динамических и стохастических моделей формирования стока для прогноза притока к водохранилищам ГЭС Колумбии // Информационные материалы итоговой сессии Ученого совета. - СПб.: изд-во РГТМУ, 2002. - С. 78-79.

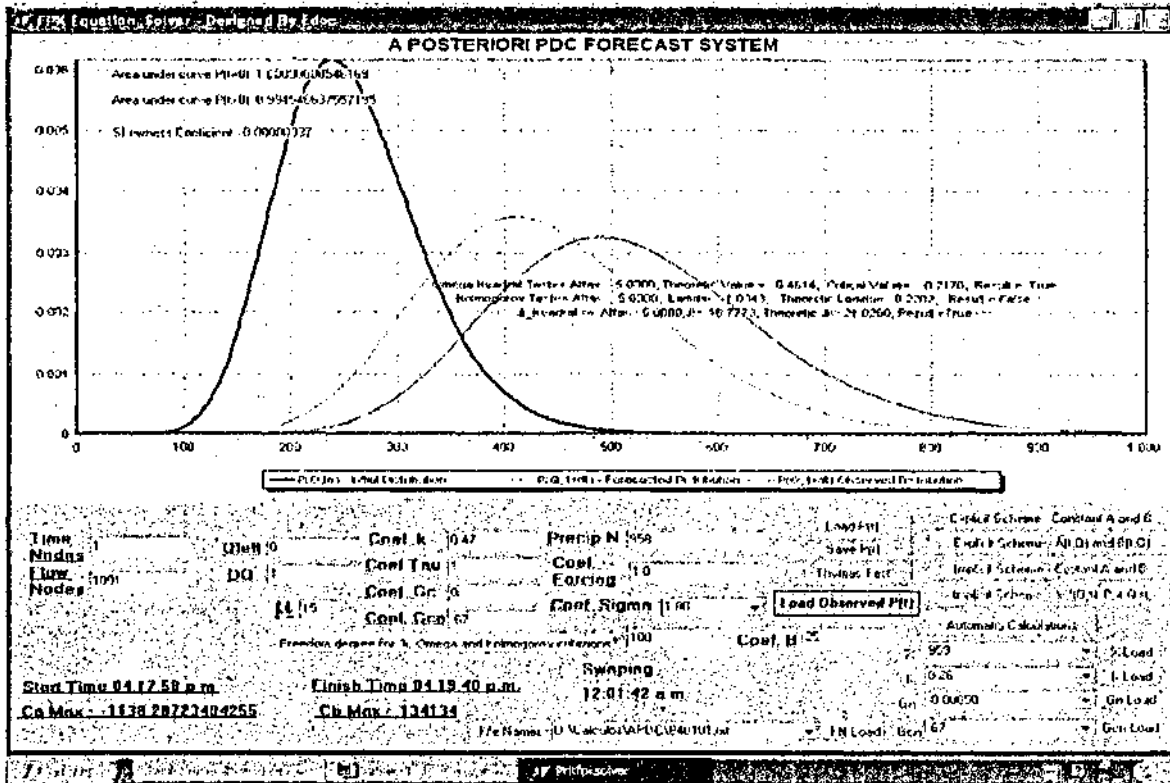


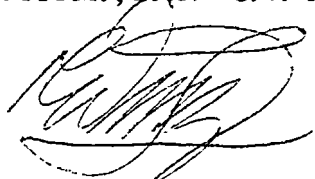
Рисунок 4 - Вид главного окна программы «FPK - Equation Solver»

5. Primera comunicacion nacional ante la convention marco de las Naciones Unidas sobre cambio climatico. - Bogota: Servigraphics, 2002. - P. 200 - 207 (Coautor con IDEAM, PNUD, MA y otros).

5. Hydrological scenarios modelling for climate change conditions using the Fokker-Plank-Kolmogorov equation; Communications from kick off meeting in Brasilia: Prediction in ungedged basins-Workshop. - Brasilia.: IAHS, 2002. - 8 p.

7. Интерфейс между стохастической моделью прогноза притока воды к водохранилищам ГЭС и процедурой принятия решений в гидроэнергетическом секторе Колумбии // Материалы итоговой сессии Ученого Совета РГТМУ. Часть I. Секции метеорологии и гидрологии - СПб, 2003. С. 80-82.

8. Роль стохастического моделирования в задаче об оптимальном управлении в гидроэнергетическом секторе Колумбии // Сборник молодых ученых. - СПб.: и зо РГТМУ, 2003. - С. 79-86 (в соавторстве с Коваленко В.В.).



Отпечатано с готового оригинал-макета

ЛРН№ 0203090 от 30.12.96

Подписано в печать с оригинал-макета

Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная

Печ. л. 1.0 Тир. 100. Зак. №

РГТМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр. 98.

И-1410

РНБ Русский фонд

2004-4

25973