

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

РГБ ОД

13 ИЮН 2000

На правах рукописи  
УДК 556.557.2/4:551.583+519.22

ГРИГОРЬЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТА НА  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР**

11.00.11 - охрана окружающей среды и рациональное использование  
природных ресурсов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2000

Работа выполнена в Институте Озероведения Российской Академии Наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук

Ю.А. Трапезников

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор

В.А. Рожков

доктор географических наук, профессор

А.М. Догановский

**Ведущая организация:** Государственный Гидрологический Институт

Защита диссертации состоится «30» мая 2000 года в «10» часов на заседании диссертационного совета Д.200.10.01 Института Озероведения РАН по адресу: 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Озероведения РАН.

Автореферат разослан «20» апреля 2000 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



В.П. Беляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке вероятностных моделей взаимосвязи природных процессов, с учетом их внутригодового хода, и применению этих моделей для исследования закономерностей реакции гидрологических процессов на климатические изменения. В качестве основных климатических показателей выбраны температура воздуха и атмосферные осадки. Гидрологические процессы, используемые в работе - температура воды и уровень озер, речной сток.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время высказываются предположения о том, что в сравнительно близком будущем могут произойти существенные климатические изменения. Одним из наиболее важных последствий изменения климата является изменение гидрологического режима озер. Очевидно, что для планирования и управления хозяйственной деятельностью на озерах необходимо максимально широко и всесторонне использовать знания о климате и о последствиях его изменения. Для решения этой проблемы большое значение имеет выяснение причинного механизма реакции гидрологического режима озер на климатические вариации. Поэтому тема настоящей работы является актуальной и своевременной.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Построение вероятностной модели совокупности взаимосвязанных периодически коррелированных случайных процессов для описания климатических и гидрологических процессов с учетом их годовой ритмики.
2. Использование модели для имитационного воспроизведения климатических и гидрологических процессов.
3. Построение вероятностной модели передаточной функции с совокупностью взаимосвязанных периодически коррелированных случайных процессов на входе и выходе.
4. Использование модели передаточной функции для изучения механизма взаимодействия климатических и гидрологических процессов в диапазоне годовой ритмики. Оценки реакции гидрологических показателей озер на различные сценарии изменения климата.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Вероятностные модели для описания взаимосвязи природных процессов с учетом их внутригодовой изменчивости.

2. Результаты применения моделей для изучения механизма формирования гидрологического режима озер и оценки их состояния в условиях изменения климата.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Для описания процессов с годовой ритмикой использовалась методика периодически коррелированных случайных процессов.
2. Для описания динамических систем с совокупностью климатических процессов на входе и совокупностью гидрологических процессов на выходе применялась модель передаточной функции с многокомпонентными, зависимыми входом и выходом.
3. Разработанный в настоящей работе параметрический метод оценивания взаимных спектров используется в процедуре идентификации многокомпонентной модели передаточной функции.
4. Применен сценарный подход для оценки реакции озер на изменения климата.

### НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Обобщен метод вероятностного описания одномерных периодически коррелированных случайных процессов на многокомпонентный случай.
2. Разработана вероятностная модель взаимосвязи совокупностей периодически коррелированных случайных процессов. Модель использована для описания динамических систем с совокупностью климатических показателей на входе и совокупностью гидрологических процессов на выходе.
3. Разработан параметрический метод оценивания взаимных спектров, позволяющий получать наиболее корректные оценки авто и взаимных спектров. Метод использован в процедуре идентификации параметров модели передаточной функции с многокомпонентными входом и выходом.
4. На основе модельного воспроизведения климатических и гидрологических процессов показано, что в рядах наблюдений присутствует долгопериодный сигнал.
5. При рассмотрении возможных сценариев изменения климата показано, что отклонения гидрологических показателей озер от их средне многолетних показателей могут быть обусловлены изменением внутригодового хода климатических процессов, без изменения их среднегодовых норм.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

1. Повышение надежности оценок реакции гидрологического режима озер на климатические изменения за счет учета внутригодового хода природных процессов и, как следствие, повышении физической обоснованности математических моделей.

2. Разработанные модели можно использовать в прогностических целях при планировании водохозяйственных и водоохраных мероприятий, регулировании последствий изменения климатических условий, выработки рекомендаций по принятию мер по восстановлению озерных экосистем.

### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты, полученные в процессе работы над диссертацией, докладывались и обсуждались: на семинарах и ученых советах Института Озероведения Российской Академии Наук; на постоянно действующем семинаре океанографической комиссии Русского Географического общества (Санкт-Петербург, 29 января, 1998); на международной конференции "Stochastic Models of Hydrological Processes and Their Applications to Problems of Environmental Preservation" (Москва, 23-27 ноября, 1998); на международном симпозиуме First Russian SETAC Symposium "Risk Assessment for Environmental Contamination" (Санкт-Петербург, 14-17 июня, 1998); на международном симпозиуме 3<sup>rd</sup> Lake Ladoga Symposium "Monitoring and sustainable management of Lake Ladoga and other large lakes" (Петрозаводск, 23-27 августа, 1999).

### ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Обоснование применяемых методов, обработка и анализ натуральных данных, выполнение расчетов, разработка вероятностных моделей взаимосвязи природных процессов, интерпретация результатов и вывод закономерностей функционирования гидрологических процессов под влиянием климата.

### СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 163 страницы, включая 123 страницы текста, 16 таблиц и 33 рисунка. Список литературы включает 112 названий.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также пути возможного практического применения результатов, полученных в диссертационной работе.

В первой главе на основе выполненного аналитического обзора вероятностных методов моделирования природных процессов дается обоснование применения выбранных методов исследования для решения сформулированных задач. В настоящей работе, в соответствии с установившимся определением, климатическая система рассматривается как статистический ансамбль состояний, которые система проходит за

продолжительные периоды времени. Климатическая система - это атмосфера, гидросфера, литосфера, криосфера, биосфера, находящиеся в тесной взаимосвязи. Будем представлять звенья климатической системы совокупностью процессов, характеризующих ее состояние. Для изучения реакции гидрологических характеристик озер на климатические изменения выделим подсистемы, состоящие из метеорологических и гидрологических процессов. Для этих процессов характерны полицикличность (изменчивость в различных временных диапазонах), невозможность учесть все факторы, определяющие взаимосвязь климата и гидрологии озера. Все это приводит к необходимости рассматривать климатическую систему и ее подсистемы как совокупности взаимосвязанных случайных процессов, которые обладают характерными видами нестационарности, свойственными природным процессам. В соответствии с принятым подходом, климатическая или гидрологическая система описывается через вероятностные характеристики компонент этих систем: функция распределения, средние характеристики, дисперсии, авто и взаимные корреляции.

Наиболее распространенным способом модельного описания природных процессов является применение моделей авторегрессии скользящего среднего (АРСС). Аппарат моделей АРСС наиболее полно разработан для процессов, согласованных с нормальным, экспоненциальным и устойчивыми законами распределения в работах Дж. Бокса, Г. Дженкинса, А.Л. Лауренса, Б.Г. Марченко, В.А. Огородникова и др. В гидрологии модели АРСС использовались А.М. Догановским, В.Е. Привальским, Д.Я. Ратковичем, С.В. Музылевым и др. Если процесс не может быть аппроксимирован нормальным законом, в диссертационной работе используется процедура нормализации, которая осуществляется в три этапа. На первом этапе реализации случайного процесса  $\xi(t)$ , согласованного с законом, имеющим функцию распределения  $F(x)$ , преобразуются к реализации процесса  $\eta(t)$ , согласованного с нормальным распределением, с помощью преобразования

$$\eta(t) = \Phi^{-1}(F(\xi(t))),$$

где  $\Phi$  - функция распределения стандартного нормального закона. На втором этапе процесс  $\eta(t)$  аппроксимируется моделью АРСС с гауссовским белым шумом. Наконец, на третьем этапе обратным преобразованием получаем реализации исходного процесса.

Важнейшей особенностью природных процессов, которая заведомо не может быть воспроизведена в стационарных моделях случайных процессов,

является годовая ритмика. Для ее учета в гидрологии использовались следующие подходы: метод фрагментов (метод двойной выборки), метод последовательного определения линейной авторегрессии (метод ПОЛАР), модели сезонной и периодической авторегрессии, модель проинтегрированной авторегрессии скользящего среднего ПАРСС. Эти направления развивались ведущими специалистами стохастической гидрологии: Г.Г. Сванидзе, Н.А. Картвелишвили, Д.Я. Ратковичем, А.М. Догановским, М.В. Болговым и др. В полной мере периодическая нестационарность учитывается в модели периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Модели ПКСП предложены и применялись Ю.А. Трапезниковым, В.А. Рожковым, Д.Я. Драганом, И.Н. Яворским. В настоящей работе именно методика ПКСП берется в качестве базиса для модельного описания годовой ритмики природных процессов.

Для описания взаимосвязи природных процессов используются два основных подхода. Построение динамико-стохастических моделей и использование вероятностной модели передаточной функции. В гидрологической практике наибольшее распространение получил первый подход (В.В. Коваленко, Л.С. Кучмент, А.В. Фролов и др.). В этом случае исследуемый процесс является составляющим некоторого детерминистического уравнения термогидродинамики, в которое уже заложен механизм изменчивости природных процессов. Так как в настоящей работе именно изучение механизма влияния климата на гидрологические процессы является основной задачей, используется второй подход – моделирование динамических систем с климатическими показателями на входе и гидрологическими на выходе

$$Y(t) = \sum_{m=0}^{\infty} h_m X(t-m) + E(t),$$

где  $X(t)$  -  $N$ -мерный вход,  $Y(t)$  -  $M$ -мерный выход,  $E(t)$  многокомпонентный белый шум,  $h_m$  передаточная функция системы.

Вторая глава посвящена разработке и апробации вероятностной модели для воспроизведения зависимых природных процессов, обладающих годовой ритмикой. Для решения этой задачи в работе проводится обобщение методов одномерных периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) на многокомпонентный случай. При этом используется тот факт, что любой ПКСП взаимно однозначно представим своими отсчетными последовательностями через период коррелированности. В ходе решения практических задач исходные данные, учитывающие внутригодовой ход, как правило

представляются своими среднемесячными значениями. Следовательно, в соответствии с методикой ПКСП, каждому такому процессу сопоставляется вектор, состоящий из 12 месячных последовательностей через период коррелированности 1 год. В случае моделирования  $N$  взаимосвязанных процессов, происходит переход к  $12N$ -мерному вектору, состоящему из всех месячных последовательностей. К полученному многокомпонентному процессу применимо стационарное приближение. Так как стационарный процесс с любой точностью может быть аппроксимирован процессом авторегрессии скользящего среднего (АРСС), модель взаимосвязанных ПКСП записывается следующим образом:

$$Y(t) = \sum_{k=1}^p A_k Y(t-k) + E(t), \quad (1)$$

где  $Y(t)$  - вектор, состоящий из месячных последовательностей  $y_i(t)$ ,  $E(t)$  - многокомпонентный белый шум,  $A_k$  - матричные коэффициенты авторегрессии,  $p$  - порядок авторегрессии. Все векторы в (1) имеют размерность  $12N$  в соответствии с количеством моделируемых процессов.

С учетом процедуры нормализации, подобный подход позволяет воспроизводить следующие вероятностные характеристики процессов: функции распределения отсчетных последовательностей, вектор математического ожидания, дисперсию, авто и взаимные корреляции.

В диссертационной работе методика многокомпонентных ПКСП применяется для совместного воспроизведения температуры воздуха и атмосферных осадков в Санкт-Петербурге. Оценивание параметров модели проводится по временным рядам среднемесячных характеристик за период с 1836 по 1993 годы. В ходе статистического анализа исходных данных выявлены следующие закономерности.

1. Месячные последовательности температуры воздуха и осадков хорошо аппроксимируются нормальным и гамма распределением соответственно.
2. Годовая ритмика климатических показателей проявляется на всех вероятностных характеристиках процессов (функция распределения, математическое ожидание, дисперсия, внутригодовая коррелированность)
3. Для температуры воздуха имеет место слабая коррелированность соседних месяцев, для осадков эта коррелированность практически незначима. И для температуры, и для осадков корреляционные связи быстро затухают внутри года.



4. На фоне слабой межгодовой коррелированности месячных последовательностей климатических показателей имеет место достаточно высокая межгодовая коррелированность их среднегодовых последовательностей.

Для совместного моделирования процессов температуры воздуха и осадков с применением методики многокомпонентных ПКСП необходимо выполнение условия стационарности месячных последовательностей  $y_i(t)$ , которое может не выполняться. Поэтому месячные последовательности представляются в виде суммы двух процессов:

$$y_i(t) = g_i(t) + y'_i(t), \quad (2)$$

где  $g_i(t)$  тренды месячных последовательностей, а процессы  $y'_i(t)$  предполагаются стационарными и стационарно связанными. В работе рассматриваются три варианта задания трендов  $g_i(t)$  с получением модельных реализаций процессов температуры воздуха и осадков и их верификацией, основываясь на результатах анализа данных, полученных для Санкт-Петербурга.

Модель 1 учитывает только внутригодовую коррелированность температуры воздуха и осадков. В этом случае предполагается, что тренда в рядах наблюдений нет, т.е.  $g_i(t) \equiv 0$ .

Модель 2 отличается от модели 1 тем, что вводится периодический тренд, соответствующий условию чередования теплых и холодных сезонов с четырехлетним циклом, по следующей схеме:

**ХЗ-ХЛ--ТЗ-ХЛ--ХЗ-ТЛ--ТЗ-ТЛ**

где ХЗ, ТЗ, ХЛ, ТЛ - холодные (Х) и теплые (Т), зимние (З) и летние (Л) сезоны соответственно. Схема смены сезонов реализована в виде детерминированной составляющей  $g_i(t)$ , которая задает периодические отклонения от нормы месячных последовательностей января и июля.

В модели 3 аддитивная составляющая  $g_i(t)$  задается в виде линейного тренда. Параметры линейного тренда оценивались по эмпирическим рядам наблюдений, которые для месячных последовательностей температуры и осадков в среднем составляют  $0,5^\circ\text{C}$  и  $10\text{мм}$  за 100 лет соответственно и не являются статистически значимыми. Расчеты, проведенные по модельным реализациям показывают, что вариант отсутствия механизма межгодовой изменчивости (модель 1) не отличим от варианта функциональной закономерности чередования теплых и холодных сезонов (модель 2). Согласование всех вероятностных характеристик внутригодовой и межгодовой

изменчивости рядов температуры и осадков возможно лишь с учетом долгопериодного сигнала (модель 3). Модель 3 показывает, что в месячных последовательностях температуры и осадков тренд практически не выделяется. При годовом осреднении низкочастотный сигнал усиливается.)

Модели (1) и (2) использованы для изучения и имитационного воспроизведения годового хода гидрологических характеристик Ладожского озера: уровня и температуры поверхности воды. Оценивание параметров моделей проводилось по временным рядам среднемесячных характеристик за периоды 1881-1989 г.г. для уровня Ладожского озера и 1945-1985 г.г. для температуры воды в трех пунктах: о. Валаам, с. Сясьские рядки (Старосвирский канал) и р. Нева (Петрокрепость). При статистическом анализе временных рядов уровня озера получены следующие результаты: месячные последовательности уровня хорошо аппроксимируются нормальным распределением; имеет место высокая внутригодовая коррелированность уровня Ладожского озера (коэффициент корреляции между соседними месяцами изменяется от 0,95 до 0,99), которая переходит за пределы года и проявляется на корреляционных функциях межгодовой изменчивости в виде более высокой связности, по сравнению с некоррелированной последовательностью; в диапазоне межгодовой изменчивости временной ход коррелограмм всех месячных последовательностей уровня практически когерентен. Как и в случае с климатическими показателями для уровня Ладожского озера наблюдается подъем корреляционных функций среднегодовых значений по сравнению со среднемесячными.

На основе проведенного статистического анализа рассматривается несколько вариантов модельного представления уровня Ладожского озера. Модель 1 учитывает только внутригодовую коррелированность месячных последовательностей уровня Ладожского озера. Расчеты по такой модели показывают, что высокая внутригодовая инерционность водоема непосредственно связана с его высокой инерционностью в диапазоне межгодовой изменчивости. Появление значимых межгодовых связей возможно как следствие перехода высоких внутригодовых корреляций за пределы года.

В модели 2 кроме учета внутригодовой коррелированности вводится аддитивная составляющая, характеризующая квази-пятилетнюю цикличность уровня. Добавление стохастического тренда приводит к подъему корреляционных функций межгодовой изменчивости на 4-5 значениях (рис.1), что соответствует оценке корреляционных функций по рядам наблюдений. Кроме того наблюдается подъем корреляционной функции, рассчитанной по

среднегодовым значениям уровня над корреляционными функциями среднемесячных уровней.

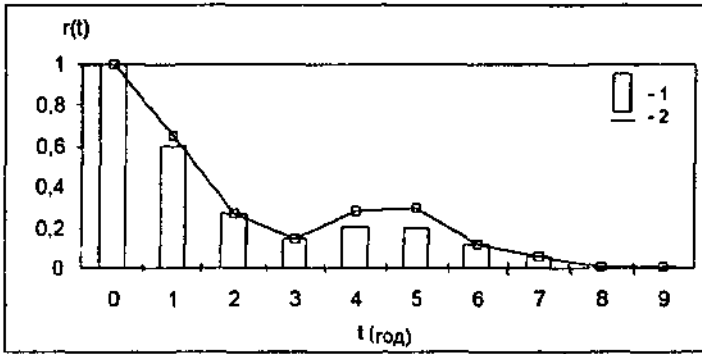


Рис.1. Оценки корреляционных функций межгодовой изменчивости среднемесячных (1) и среднегодового (2) уровней Ладожского озера, рассчитанные по модели 2.

Таким образом, как и в случае моделирования температуры воздуха и осадков, учет всех вероятностных характеристик внутригодовой и межгодовой изменчивости уровня озера возможен в предположении наличия в рядах наблюдений долгопериодной составляющей.

Третья глава посвящена разработке модели передаточной в виде динамической системы, на вход которой подается ансамбль климатических процессов, а на выходе находится ансамбль гидрологических процессов. Такая модель предназначена для изучения взаимосвязей природных процессов с учетом их годовой ритмики.

Наиболее простым примером модели передаточной функции является модель с одним входом и одним выходом в виде

$$\xi_t = \sum_{m=0}^{\infty} h_m \eta_{t-m} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_t$  — белый шум с нулевым средним, а  $h_m$  — передаточная функция системы. Параметры модели предлагается оценивать по авто и взаимным спектрам

$$h_m = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} H(f) \exp(i2\pi f m) df, \quad H(f) = S_{\xi\xi}(f) / S_{\eta\eta}(f),$$

где  $H(f)$  — частотная характеристика системы.

Идентификацию модели (3) можно проводить во временной области по реализациям процессов  $\xi_i$  и  $\eta_i$  (прямой метод) или по авто и взаимным корреляционным функциям входа и выхода (корреляционный метод). Наиболее простым для идентификации модели является корреляционный метод. Однако оценки параметров модели, полученные этим методом, будут смещенными из-за коррелированности оценок авто и взаимных корреляционных функций. Этому недостатка лишены спектральные методы оценивания параметров модели, которые не получили широкого распространения из-за отсутствия надежных методов оценивания взаимных спектров. Для ликвидации этой проблемы в работе предложен метод параметрического спектрального оценивания взаимных спектров.

Достаточно часто возникает необходимость изучить формирование режима одного гидрологического процесса под действием совокупности режимообразующих факторов. Для решения подобных задач необходимы модели динамических систем с совокупностью случайных процессов на входе при одиночном выходе.

Пусть  $y_i$  - выход, а  $\{x_{j,i}\}, j = \overline{1, N}$   $N$ -компонентный вход динамической системы. Модель такой системы имеет вид

$$y_i = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{\infty} h_{j,k} x_{j,i-k} + \varepsilon_i, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_i$  - аддитивная составляющая, некоррелированная с входом. Передаточная функция системы  $h_k$  является строкой и связана с вектором частотной характеристикой  $H(f)$  преобразованием Фурье

$$h_k = (h_{1,k}, \dots, h_{N,k}), \quad h_k = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} H(f) \exp(i2\pi f k) df,$$

где интегрирование проводится покомпонентно. Частотная характеристика определяется через взаимные спектры входа и выхода

$$H(f) = S_{yy}(f) S_{xx}^{-1}(f),$$

где  $S_{xx}(f)$  и  $S_{yy}(f)$  матрица авто спектра входа и строка взаимного спектра входа и выхода соответственно.

$$S_{xx}(f) = \begin{pmatrix} S_{x_{n_1} x_{n_1}}(f) & \Lambda & S_{x_{n_1} x_{n^*}}(f) \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ S_{x_{n^*} x_{n_1}}(f) & \Lambda & S_{x_{n^*} x_{n^*}}(f) \end{pmatrix}, \quad S_{yy}(f) = (S_{\varepsilon_{i_1}}, \dots, S_{\varepsilon_{i_N}})$$

Компоненты матриц  $S_{xx}(f)$  и  $S_{yy}(f)$  оцениваются методом параметрического оценивания спектров.

В общем виде решение задачи по изучению реакции водных объектов на климатические воздействия сводится к рассмотрению динамической системы с  $N$  климатическими показателями на входе и  $M$  гидрологическими характеристиками на выходе. Такая модель представима в виде

$$Y_t = \sum_{k=0}^{\infty} H_k X_{t-k} + E_t, \quad (5)$$

где  $Y_t$  -  $N$ -компонентный вход,  $X_t$  -  $M$ -компонентный выход,  $E_t$  -  $N$ -компонентный процесс белого шума,  $H_k$  - матрица многоканальной импульсной характеристики. Отдельному выходному каналу  $y_{i,t}$  соответствует функция свертки

$$y_{i,t} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{\infty} h_{i,j,k} x_{j,t-k} + \varepsilon_{i,t}. \quad (6)$$

Таким образом, модель динамической системы с  $N$  входами и  $M$  выходами сводится к  $M$  моделям передаточной функции с  $N$  входами и одномерным выходом.

В диссертационной работе модель передаточной функции с одним входом и одним выходом применяется для исследования механизмов влияния среднегодовых характеристик температуры воздуха и атмосферных осадков на уровень Ладожского озера. Выполненные исследования показывают запаздывающую реакцию озера на температуру и осадки: уровень озера значимо реагирует на осадки текущего и двух предшествующих лет с максимальным откликом на осадки предшествующего года. "Память" уровня на температуру сохраняется в течение 3-5 лет.

Модель передаточной функции с многокомпонентным входом и одним выходом применяется для изучения взаимосвязи среднегодовых значений стока  $r$ . Риони со среднегодовыми характеристиками температуры воздуха и атмосферных осадков. Численные значения параметров модели показывают, что после учета взаимосвязи входных процессов максимальный вклад в изменчивость расходов воды  $r$ . Риони вносят осадки текущего и двух предшествующих лет. В случае применения модели для изучения реакции температуры поверхности воды Ладожского озера на изменения температуры воздуха с учетом внутригодового хода этих характеристик показано, что для модельного воспроизведения среднемесячной температуры воды целесообразно

использовать простую модель, учитывающую только температуру воздуха одноименного месяца.

При использовании влияния температуры воздуха и атмосферных осадков на уровень Ладожского озера использована модель передаточной функции с многокомпонентным входом и выходом. На вход модели подаются месячные последовательности температуры воздуха и осадков, а на выходе находится среднемесячные ряды уровня Ладожского озера. По результатам статистического анализа взаимных корреляционных функций температуры воздуха, осадков и уровня озера можно сделать следующие выводы. Внутригодовая коррелированность уровня всех месяцев года с температурой от февраля до сентября отрицательна. Наибольший отрицательный вклад вносят три летних месяца: июнь, июль, август. Уровень озера положительно коррелирует с осадками практически всех месяцев текущего и предшествующих лет. Максимальные значения коэффициентов взаимной корреляции приходятся на 4 месяца: май, июнь, август, октябрь. Наибольшие числовые значения коэффициентов корреляции и для температуры, и для осадков приходятся на текущий и два предшествующих года. Абсолютный максимум значений коэффициентов корреляции соответствуют предшествующему году.

После идентификации параметров модели передаточной функции проводилось ее тестирование. Если на вход модели подаются эмпирические ряды наблюдений температуры воздуха и осадков, то коррелограммы, полученные по модельным рядам, хорошо согласуются с их оценками. В том числе оказывается, что при учете лишь текущего и двух предшествующих лет модель улавливает квази пятилетнюю цикличность уровня озера.

В других тестовых примерах на вход подаются не эмпирические, а искусственно сгенерированные ряды. Если модель учитывает только внутригодовую (авто и взаимную) коррелированность входных процессов, то она практически эквивалентна модели ПКСП уровня, рассмотренной в предыдущей главе. Если же предположить наличие во входных процессах долгопериодной составляющей в виде квази пятилетнего стохастического тренда, то этот сигнал усиливается на корреляционных функциях выхода.

Наиболее перспективным направлением применения моделей взаимосвязи природных процессов является изучение реакции гидрологических процессов на изменения климата. В диссертационной работе в качестве примера рассматривалась реакция уровня Ладожского озера на сценарные изменения климата. Оценивание модели проводилось на основе

статистического анализа временных рядов среднемесячной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, месячных норм осадков в г. Сортавала и среднемесячного уровня Ладожского озера в п. Сяськие Рядки. Основные допущения при идентификации параметров модели состояли в следующем.

1. За модельные математические ожидания и дисперсии входа и выхода принимаются выборочные значения этих характеристик.
2. Внутригодная коррелированность климатических показателей задается в соответствии с их оценками. Межгодная коррелированность климатических показателей аппроксимируется белым шумом.
3. Внутригодная структура взаимной корреляционной функции уровня с климатическими показателями задается по выборочной коррелограмме с учетом реакции уровня на климатическое воздействие текущего и двух предшествующих лет.

Для примера рассмотрим климатический сценарий, в соответствии с которым происходит внутригодное перераспределение среднемесячных характеристик температуры воздуха и атмосферных осадков, без изменения среднегодовых норм (рис.2). Предположим, что климатические условия июля расширены на два соседних месяца: математические ожидания и дисперсии температуры и осадков сравнились с соответствующими характеристиками июля. Одновременно с этим климатические условия ноября распространились на октябрь. В результате такой перестройки среднегодовая температура понизилась на  $0,03^{\circ}\text{C}$ , а годовая сумма осадков уменьшилась на 4 мм. Модельные расчеты (рис.2) показывают, что при таком изменении климата уровень озера понизится на 50 см.

Таким образом, значительные отклонения уровня Ладожского озера могут произойти за счет перераспределения среднемесячных характеристик внутри года даже без заметных отклонений среднегодовых значений климатических показателей от их среднегодовых норм.

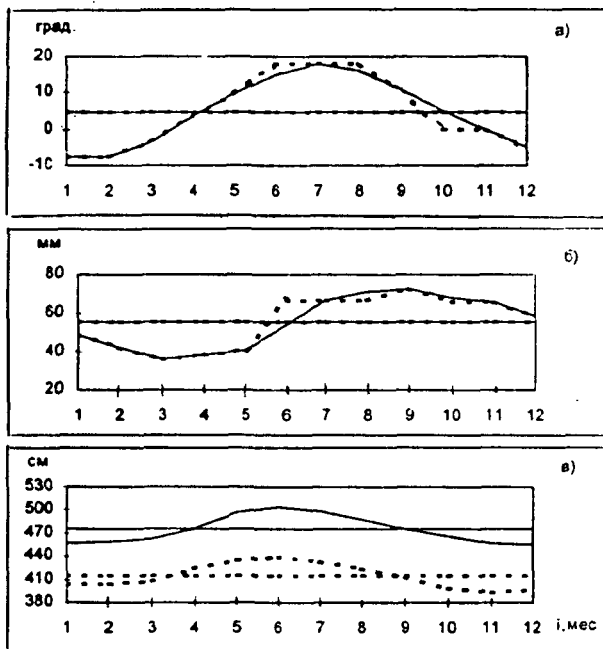


Рис.2. Среднегодовые и среднемесячные значения температуры воздуха (а), атмосферных осадков (б) и уровня Ладожского озера (в). Сплошная линия - оценки по рядам наблюдений; пунктирная линия - сценарий изменения климата (для температуры воздуха и атмосферных осадков) и модельные значения уровня озера.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

1. На основании обзора современных методов вероятностного моделирования в гидрологии сформулированы основные критерии, которым должна удовлетворять стохастическая модель, направленная на решение задачи описания взаимосвязи природных процессов. Показано, что наиболее целесообразно вести моделирование по принципу динамических систем в виде модели передаточной функции.
2. Для модельного воспроизведения совокупности взаимосвязанных процессов с годовой ритмикой в работе предложена модель совокупности взаимосвязанных периодически коррелированных случайных процессов.



3. Разработана вероятностная модель динамических систем с совокупностью климатических показателей на входе и совокупностью гидрологических процессов на выходе, учитывающая годовой ход этих процессов. Оценка параметров модели проводится по авто и взаимным спектрам входа и выхода.
4. В работе предложен параметрический метод оценивания авто и взаимных спектров.
5. Разработанная модель передаточной функции использована для исследования закономерностей взаимосвязи гидрологических (уровень и температура поверхности воды озера, речной сток) и климатических (температура воздуха, атмосферные осадки) процессов.
6. При изучении механизма формирования годового стока р. Риони под влиянием температуры воздуха и атмосферных осадков показано, что максимальный вклад в изменчивость расходов воды вносят осадки текущего и двух предшествующих лет. При этом модель с двумерным входом лучше описывает изменчивость стока, чем модели с одномерными входами.
7. Модельное воспроизведение климатических и гидрологических процессов показывает на возможность наличия долгопериодного сигнала в рядах наблюдений. При годовом осреднении низкочастотный сигнал усиливается.
8. Выполнены расчеты изменения уровня Ладожского озера в случае изменения климата. Показано, что существенные изменения уровня связаны с отклонением температуры воздуха от средних многолетних норм в летний (июнь, июль, август) сезон и осадков в мае, июне, августе и октябре. Значительные отклонения уровня Ладожского озера могут произойти за счет перераспределения среднемесячных показателей даже без заметных отклонений среднегодовых значений климатических показателей от их среднемноголетних норм.

Основные результаты диссертационной работы отражены в публикациях:

1. А.С. Григорьев, Ю.А. Трапезников. Параметрическое оценивание взаимных спектров. Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 1998, №4, с. 54-56
2. Ю.А. Трапезников, А.С. Григорьев, М.А. Хорбаладзе. Уровень Ладожского озера под влиянием климатических факторов. В кн. Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2000, с.358-365.
3. Г.Т. Фрумин, О.А. Черных, И.В. Бовыкин, Ю.А. Трапезников, А.О. Румянцев, А.С. Григорьев. Оценка экологически допустимых уровней содержания

- металлов в Ладожском озере. Экологическая химия. 1998, т. 7, вып. 1, с. 13-19.
4. Г.Т. Фрумин, И.В. Бovyкин, О.А. Черных, А.С. Григорьев, А.О. Румянцев. Разработка нового подхода к регламентированию поступления металлов в водные объекты. Региональная экология. 1998, №2, с. 80-83.
  5. Г.Т.Фрумин, Н.Л. Крыленкова, А.С. Григорьев. Оценка экологически допустимых уровней воздействия фенолов на водную систему "Ладожское озеро – река Нева – восточная часть Финского залива". Межакадемический информационный бюллетень "Медународная академия", 1999, №13-14, с.95-98.
  6. A.S. Grigoriev. The Model of Seasonal and Annual Variability of Hydrometeorological Processes. NATO Advanced Research Workshop (ARW). STOCHASTIC MODELS OF HYDROLOGICAL PROCESSES AND THEIR APPLICATIONS TO PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL PRESERVATION. Moscow, Russia, November 23-27, 1998, p.115-118.
  7. A.S. Grigoriev and Yu.A. Trapeznikov. The Parametrical Estimation of the Cross Spectra of Hydrological Processes. NATO Advanced Research Workshop (ARW). STOCHASTIC MODELS OF HYDROLOGICAL PROCESSES AND THEIR APPLICATIONS TO PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL PRESERVATION. Moscow, Russia, November 23-27, 1998, p.119-122.
  8. G.T. Frumin, I.V. Bovykin, O.A. Tchemykh, A.S. Grigoriev, A.O. Rummyantsev. New Approach to Estimation of Ecological Permissible Concentrations of Metals in Water Bodies. ABSTRACTS of the First Russian SETAC Symposium. Risk Assessment for Environmental Contamination. 14-17 June, 1998, Saint-Petersburg, Russia, p.55.
  9. Frumin G.T., Susareva O.M., Barkan L.V., Tchemykh O.A., Bovykin I.V., Rummyantsev A.O., Grigoriev A.S. New Indices for Water Quality Assessment. In book Environmental Indices Systems Analysis Approach. EOLSS Publishers Co Ltd, 1999, Great Britain, p.382-392.