

УДК [556.535.3+556.16.06](861)

С.Э.Ф. Эспития, Е.В. Гайдукова, В.В. Коваленко**КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РАСХОДОВ ВОДЫ НА РЕКАХ КОЛУМБИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ**Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
oderiut@mail.ru**S.E.F. Espitia, E.V. Gaidukova, V.V. Kovalenko****SHORT-TERM FORECAST OF RIVER DISCHARGE FOR COLOMBIA WITH THE FRACTAL DIAGNOSIS**

В статье рассматривается метод краткосрочного прогнозирования речного стока, основанный на динамических моделях первого и второго порядка. Выбор порядка модели делается после проведения фрактальной диагностики, которая показывает необходимое число фазовых переменных в модели. Выявлено, что для большинства рек Колумбии надежные прогнозы с заблаговременностью одни сутки получаются при использовании модели первого порядка. Полученные выводы позволяют выбрать оптимальный порядок дифференциального уравнения для надежного прогнозирования.

Ключевые слова: прогноз водности рек, фрактальная размерность, порядок модели, Колумбия.

The method of short-term forecasting of river flow, based on dynamic models of first and second orders, is considered. Selection of the model order is made after the fractal diagnosis, which shows the necessary number of state variables in the model. It was found that for the majority of the Colombian rivers reliable forecasts with a lead time of one day are obtained using a first-order model. The obtained conclusions allow choosing a more optimal order of the differential equation for reliable forecasting.

Keywords: forecast of runoff, the fractal dimension, the model order, Colombia.

Введение

Реки Колумбии отличаются резкоменяющейся водностью, которая связана с режимом выпадения осадков. Для примера на рис. 1 показан гидрограф суточных расходов воды реки Магдалена с января 1998 г. по декабрь 2000 г. Видно

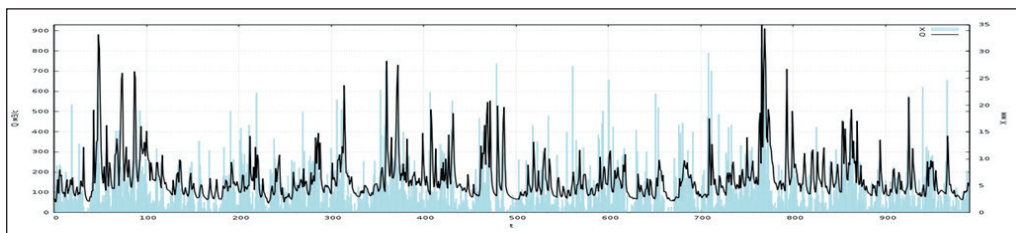


Рис. 1. Гидрограф реки Магдалена (Колумбия)

присутствие многоводных периодов в году и относительно маловодных, но на фоне этих периодов имеются краткосрочные дождевые паводки. Кроме того, на количество осадков оказывает влияние Ла-Нинья или Эль-Ниньо [8].

Целью статьи является апробация методологии краткосрочного прогнозирования речного стока на водосборах Колумбии. Применяемая методология (см., например, [1, 4, 5]) была разработана на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ. В ее основе лежат следующие этапы: выбор модели по числу переменных с помощью фрактальной диагностики, параметризация модели, задание прогнозных значений внешнего метеорологического воздействия, прогноз стока с заданной заблаговременностью. Особенностью методологии является как раз фрактальная диагностика, позволяющая рассчитать фрактальную размерность процесса и, как следствие, определить порядок модели в виде дифференциального уравнения. При сложном характере формирования стока модель может оказаться неспособной уловить особенности гидрологического режима в изменившихся условиях (например, период паводка). Именно знание фрактальной размерности процесса стока позволяет выбрать (и изменить в случае необходимости) порядок дифференциального уравнения для надежного прогнозирования.

Используемые методики и исходные данные

Для краткосрочного прогнозирования водности рек наиболее подходящими являются модели первого и второго порядка соответственно [7]:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\dot{X}}{\tau}; \quad (1)$$

$$\tau_2 \frac{d^2Q}{dt^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k\tau_1}Q = \frac{1}{\tau_1} \dot{X}, \quad (2)$$

где Q — расход (модуль, слой) стока; $\dot{X}$ — интенсивность осадков; k — коэффициент стока; τ — время релаксации речного бассейна; τ_1 — время добегания поверхностного стока; τ_2 — время добегания подземного стока.

Схема краткосрочного прогноза показана на рис. 2. Для параметризации модели берутся 15 суток (или 30 суток), предшествующие дню выпуска прогноза. Параметры модели считаются оптимальными, если соотношение S/σ_Δ минимально, а число оправдавшихся поверочных прогнозов P (%) максимально [2]:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{n_{\text{ип}} - m}}, \quad (4)$$

где σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины за период заблаговременности (1 сутки); Δ_i — изменение прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза; $\bar{\Delta}$ — среднее значение этих изменений; n — число изменений; S — среднеквадратическая погрешность поверочных прогнозов; Q_i и Q'_i — соответственно, фактическое и предсказанное значения; $n_{\text{пр}}$ — число прогнозов; m — число степеней свободы, равное числу постоянных коэффициентов в прогностическом уравнении.

Прогноз считается оправдавшимся, если абсолютная величина его погрешности меньше или равна допустимой $\delta_{\text{доп}} = \pm 0,674\sigma_{\Delta}$.

Погрешности определения S и σ_{Δ} зависят и от числа прогнозов $n_{\text{пр}}$, поэтому учитывались следующие условия эффективности методики прогнозирования [2]: при $n_{\text{пр}} \leq 15$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,70$; при $15 < n_{\text{пр}} < 25$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,75$; при $n_{\text{пр}} \geq 25$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$.

По периоду параметризации проводится фрактальная диагностика, показывающая число фазовых переменных, необходимых для надежного прогноза, т. е. размерность прогностической модели первого или второго порядка. Считается, что порядок модели сохранится и на период заблаговременности прогноза. Дается прогноз с заблаговременностью 1 сутки, затем при прохождении суток период параметризации сдвигается к дате выпуска прогноза — применяется так называемая динамическая параметризация [2].

Фрактальная диагностика проводится с использованием метода, основанного на расчете корреляционной размерности. Такой вид фрактальной размерности легко рассчитать, если временной ряд представить как точки, разбросанные по области пространства [строятся зависимости расходов воды со сдвижкой во времени $l(Q(t), Q(t+l), Q(t+2l), \dots)$]. Для определения корреляционной размерности необходимо подсчитать количество точек, попарные евклидовы расстояния, между

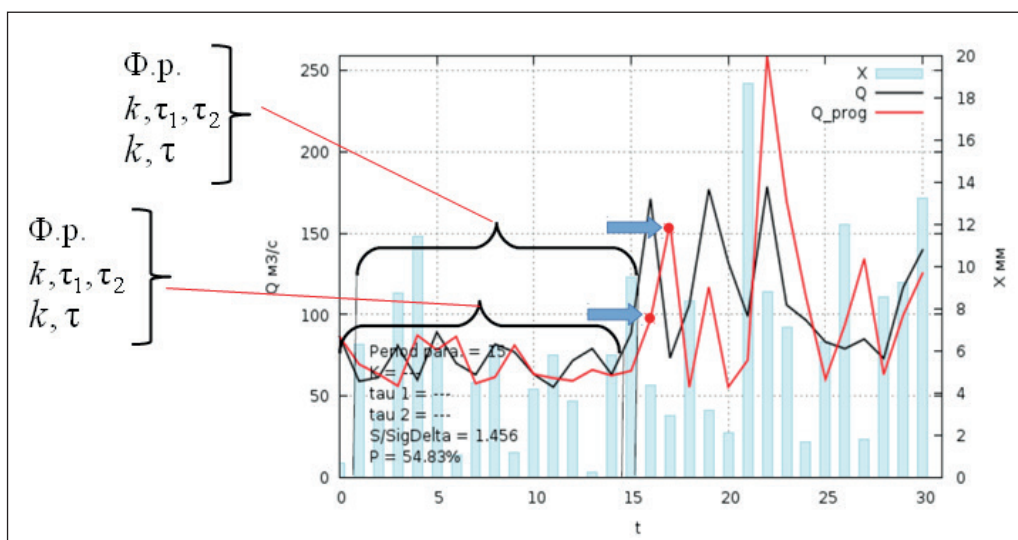


Рис. 2. Схема краткосрочного прогноза

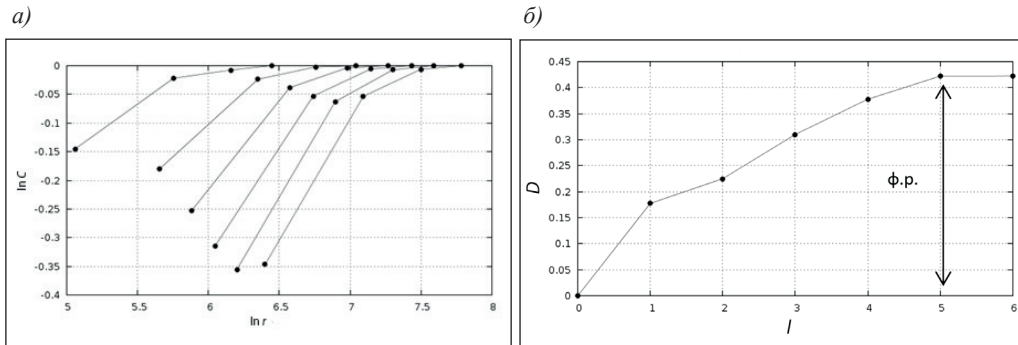


Рис. 3. Визуализация расчета фрактальной размерности (ф. р.)

которыми меньше заданного расстояния r . При изменении r меняется относительная доля $C(r)$ таких точек. Величина $C(r)$ называется корреляционной суммой (или корреляционным интегралом) и определяется как отношение числа точек, попарные расстояния между которыми меньше r , к общему числу точек (рис. 3, а).

Корреляционная размерность определяется как [3]:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} (\ln C(r) / \ln r). \quad (5)$$

Размерности рассчитываются для последовательных сдвижек во времени l , и результатом считается неизменяющееся значение размерности (рис. 3, б).

Объектами исследования являются бассейны Колумбии (рис. 4 а и б).

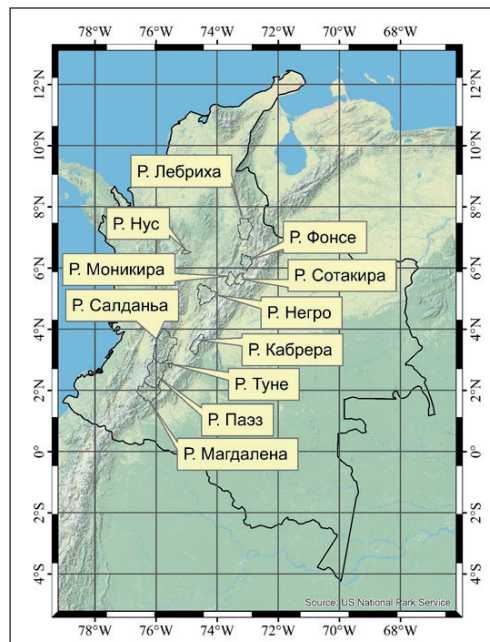


Рис. 4 а. Местоположение изучаемых водосборов на территории Колумбии

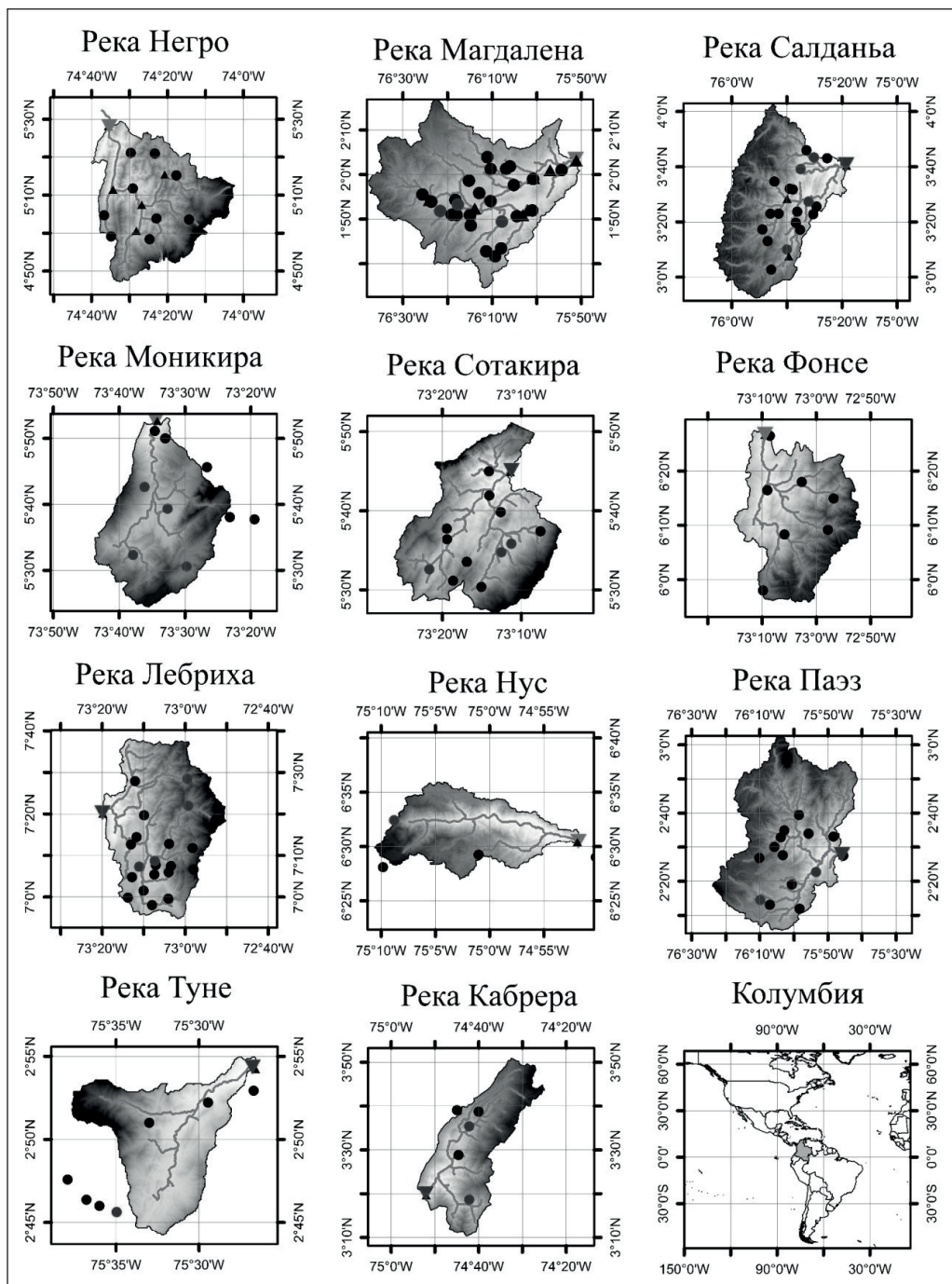


Рис. 4 б. Карта расположения метеорологических станций на изучаемых водосборах

Площади (F) выбранных водосборов представлены в табл. 1. По площадям водосборов видно, что некоторые реки относятся к малым, данная особенность может сказаться на результатах фрактальной диагностики и прогнозирования.

Таблица 1

Площади изучаемых водосборов

Водосбор реки	F , км ²	Водосбор реки	F , км ²	Водосбор реки	F , км ²
Негро	3115	Сотакира	765	Паэз	3456
Магдалена	3982	Фонсе	1560	Туне	340
Салданья	5416	Лебриха	3102	Кабрера	1300
Моникира	375	Нус	950		

Результаты фрактальной диагностики и краткосрочных прогнозов

Наиболее характерные примеры применения рассматриваемого метода к водосборам Колумбии показаны в табл. 2. Представлены результаты параметризации, период которой для рек Лебриха и Туне составил с 01.02.1994 по 02.03.1994 г., для остальных рек — с 01.02.2000 по 02.03.2000 г. (период параметризации в 15 суток сдвигался ко дню выпуска прогнозов, всего сделано 15 таких сдвижек через сутки).

Из табл. 2 видно, что фрактальная размерность рядов расходов воды близка к единице, т. е. незначительно меньше или больше единицы. При округлении до ближайшего большего целого фрактальной размерности [3, с. 384], например 1,01, получаем размерность пространства вложения (р.п.в.), показывающую число фазовых переменных в модели, равную двум, т. е. модель второго порядка. Возникает вопрос оценки погрешности вычисления фрактальной размерности, который поможет по-другому взглянуть на дробные части размерностей.

Оценивая результаты фрактальной диагностики по всем рекам, отметим, что размерность пространства вложения, равная двум, встречается в 32 % случаев, а поверочные прогнозы по модели второго порядка не дают лучших результатов по сравнению с моделью первого порядка.

В некоторых случаях фрактальная размерность не может быть определена, т. к. кривая насыщения не стабилизируется. Но следует отметить, что в таких случаях ординаты кривой насыщения не превышают двух, т. е. прогнозная модель должна быть максимум второго порядка.

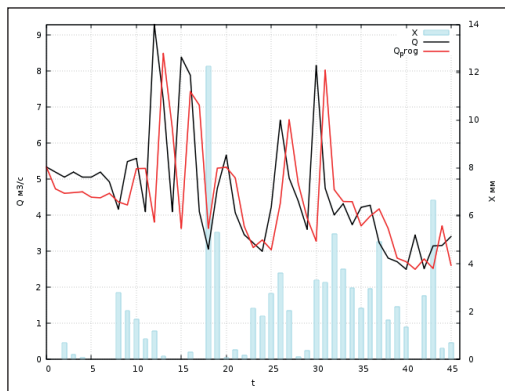
Оценка результатов прогнозирования с использованием динамических моделей различных порядков показала, что модель первого порядка дает более надежные прогнозы, хотя отличия незначительны (табл. 3). Это связано, скорее всего, с тем, что при заблаговременности прогноза одни сутки осадки не успевают добежать до замыкающего створа водосбора в виде подземного стока (рис. 5). В данном случае применялась динамическая параметризация с периодом в 30 суток, в табл. 3 приведена оценка ряда в 15 прогнозов.

Таблица 3

Оценка прогноза расходов воды на реках Колумбии

Водосбор реки	S/σ_{Δ}		P	
	I порядок	II порядок	I порядок	II порядок
Негро	0,64	0,80	80,0	70,0
Магдалена	0,89	1,08	66,7	70,0
Салданья	1,11	1,28	63,3	60,0
Моникира	1,34	1,38	70,0	66,7
Сотакира	1,17	1,15	80,0	76,6
Фонсе	1,33	1,53	46,7	53,3
Лебриха	0,75	0,77	80,0	86,7
Нус	0,41	0,63	93,3	93,3
Паэз	0,62	0,96	80,0	76,7
Туне	0,66	1,37	83,3	76,7
Кабрера	1,28	1,32	70,0	43,3

а)



б)

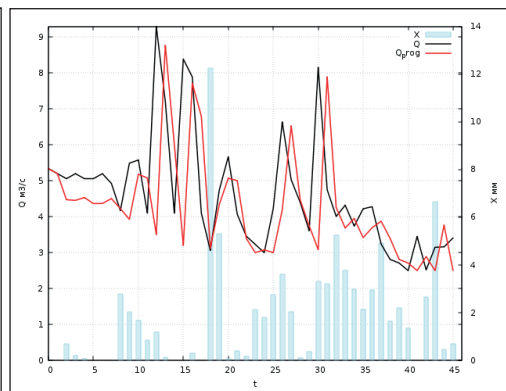


Рис. 5. Пример прогноза расходов воды по модели первого (а) и второго (б) порядков, р. Моникира

Выводы

В ходе выполнения данного исследования было экспериментально доказано, что для условий формирования суточного стока рек Колумбии более надежные результаты дает дифференциальное уравнение (модель) первого порядка.

Дальнейшие исследования будут направлены на апробацию на речных бассейнах Колумбии методики, позволяющей прогнозировать суточные вероятностные характеристики [6].

Исследования финансируются Министерством образования и науки РФ по теме: «Чувствительность многолетнего речного стока и основных водозависимых отраслей экономики к изменениям климата (№ 5.6293.2017/8.9).

Литература

1. Коваленко В.В. Моделирование природных процессов: динамические системы, топология и катастрофы: учеб. пос. — СПб.: РГГМУ, 2014. — 42 с.
2. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Методические указания по дежурству в учебном бюро гидрологических прогнозов. — СПб.: РГГМУ, 2013. — 30 с.
3. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. — СПб.: РГГМУ, 2006. — 559 с.
4. Коваленко В.В. Философско-методологические основания частично инфинитного моделирования в гидрологии: учеб. пос. — СПб.: РГГМУ, 2014. — 38 с.
5. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В., Громова М.Н., Шевнина Е.В., Девятков В.С. Методика фоновое краткосрочного прогнозирования изменения водности // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. — С. 65–70.
6. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Девятков В.С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 18. — С. 10–20.
7. Эспития Э.Ф., Качалова А.Е. Краткосрочные прогнозы расходов воды рек Колумбии различными методами, принятыми в России // XI Межд. Большой геогр. фестиваль (БГФ-2015) студ. и мол. ученых. 2015. — С. 509–514.
8. Poveda G. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria // Rev. Acad. Colomb. Cienc.: Vol. XXVIII, № 107 junio de 2004. P. 201–221 (In Spanisch).