

Е.В. Гайдукова

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФРАКТАЛЬНОЙ
РАЗМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЧНОГО СТОКА К ВОЗМОЖНЫМ
КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ**

E.V. Gaidukova

**DIAGNOSIS OF SENSITIVITY OF FRACTAL DIMENSION OF PERENNIAL
RIVER RUNOFF TO POSSIBLE CLIMATE CHANGE**

Рассматриваются результаты применения установленной ранее закономерности влияния многолетней нормы приземной температуры воздуха на фрактальную размерность годового стока для наиболее вероятных климатических сценариев на середину XXI в. Выявлено географическое смещение зон с высокой фрактальной размерностью, в которых использование традиционных одномерных вероятностных распределений стока может привести к уменьшению гидрологической надежности проектируемых и эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: фрактальная размерность, норма температуры приземного воздуха, климатические сценарии.

We consider the results of the previously established regularities of influence long-term rates of surface temperature on the fractal dimension of the annual runoff for the most likely climatic scenarios for the mid-XXI-st century. Identified geographic shift in areas of high fractal dimension, in which the use of the traditional one-dimensional probability distributions drain can lead to a reduction in the reliability of hydrological designed and operated hydro-technical structures.

Key words: fractal dimension, norm of temperature of air, climatic scripts.

Введение

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ установлено, что существует достаточное число рядов годового речного стока, которые имеют фрактальную размерность больше единицы [1]. Ее значение, округленное до ближайшего большего целого значения, показывает размерность пространства вложения, которую можно интерпретировать как число фазовых переменных необходимых для построения модели формирования стока. До сих пор при моделировании процесса формирования стока учитывалась одна фазовая переменная — речной сток в виде расходов воды, модулей или слоев стока. Однако для многолетнего годового стока в работах [2, 3] было показано, что при статистическом описании реакции некоторых речных бассейнов на внешнее воздействие необходимо учитывать три фазовые переменные, помимо расхода воды еще испарение и изменение суммарных влагозапасов в почвогрунтах. Игнорирование еще двух фазовых переменных может привести к получению ненадежных значений характеристик речного стока при проектировании,

строительстве и эксплуатации гидротехнических объектов. Это может произойти, в частности, из-за потери устойчивости старших моментов одномерного распределения [4].

В статье рассматривается решение задачи о сценарной оценке географического распределения зон формирования гидрологических процессов, в которых необходимо учитывать больше одной фазовой переменной. Учет только одной фазовой переменной в этих зонах может привести к непредсказуемости вероятностного процесса формирования речного стока. По наиболее вероятным климатическим сценариям [5] спрогнозировано и закартировано смещение зон возможного катастрофического формирования речного стока.

Используемая диагностическая зависимость

Для построения диагностической зависимости использовалась информация о фрактальных размерностях многолетних рядов годового стока и среднегодовых нормах температуры приземного воздуха [2]. Вычисление фрактальных размерностей рядов расходов воды проводилось по методике, основанной на теореме Такенса и вычислении корреляционного интеграла. Алгоритм расчета подробно изложен в учебнике [6] и учебном пособии [7].

Были выбраны посты, замыкающие зональные площади водосборов, с продолжительностью наблюдений не менее 20 лет в среднем до 1990 г. Посты расположены практически во всех климатических зонах; тем самым информация о климатической составляющей диагностической зависимости освещает максимально возможный диапазон норм среднегодовой температуры приземного воздуха на Земле. Всего было отобрано 756 станций.

По всем рядам годового стока были рассчитаны фрактальные размерности. Оказалось, что максимальная фрактальная размерность равняется 4,80 (р. Сок – г. Сургут (РФ)), минимальная – 0,11 (г. Oранже – st. Uppington (ЮАР)), а средняя фрактальная размерность для выбранных бассейнов равняется 1,38. Размерность пространства вложения равняется единице у 38 % рядов, двум – у 46 % и больше двух – у 16 %.

Для выявления статистически значимой зависимости между фрактальной размерностью и многолетней нормой температуры воздуха строились графики связи этих гидрометеорологических характеристик. Поле точек аппроксимировалось полиномиальными зависимостями. При таком виде аппроксимации была возможность повышать значение коэффициента детерминации R^2 , показывающего тесноту связи линии тренда с полем точек (данных):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{(\sum Y_i^2) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

где Y_i – текущее значение поля данных; \bar{Y}_i – среднее значение переменных; n – число точек.

Для обобщения зависимости применена методика [8], позволяющая осреднять значения, формирующие поле точек. Были найдены средние значения фрактальной размерности для каждой градации температур равной двум градусам по Цельсию. Несмотря на коэффициент R^2 равный 0,77 при аппроксимации полиномом шестого порядка, нижний предел диапазона норм температур был уменьшен до -5°C , так как в диапазоне от -17 до -5°C недостаточно точек для получения надежных осредненных значений.

На рис. 1 показана зависимость фрактальной размерности от нормы температуры приземного воздуха. Видно, что при увеличении температуры от -5 до $4,5^\circ\text{C}$ увеличиваются и значения фрактальных размерностей. Далее, по графику, с увеличением температуры фрактальная размерность уменьшается.

Для надежного описания процесса формирования годового стока в речных бассейнах со среднегодовой температурой воздуха более 19°C требуется одна фазовая переменная, т.е. в качестве динамического ядра стохастической модели может выступать одно дифференциальное уравнение первого порядка. Для речных бассейнов, находящихся в климатических зонах, для которых характерны среднегодовые температуры воздуха в диапазоне от -5 до 19°C — система из двух дифференциальных уравнений либо, возможно, нелинейное уравнение.

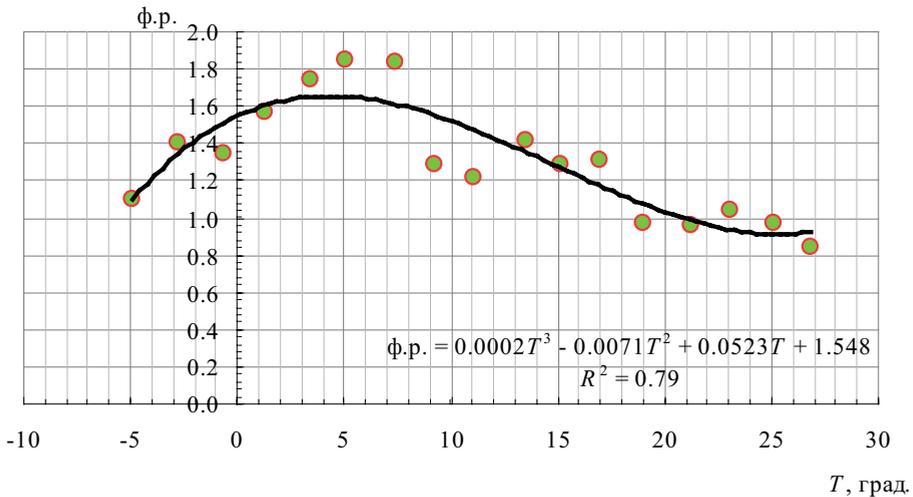


Рис. 1. Зависимость фрактальной размерности от нормы приземной температуры воздуха

Имея зависимость, представленную на рис. 1, можно находить зоны наибольших фрактальных размерностей по норме температуры приземного воздуха. Такой температурной зоной является диапазон от $1,6$ до 7°C . При этом надо иметь в виду, что осредненную линию на рис. 1 окружает интервал неопределенности, допускающий с определенной вероятностью значения фрактальной размерности больше двух (отдельные «точки», как уже указывалось, достигают значений больше четырех).

Выявление географического смещения зон с высокой фрактальной размерностью для наиболее вероятных сценариев на 2040–2060 гг.

Было использовано четыре климатических сценария [9]: COMMIT, SRA1B, SRB1, SRA2. Сценарий COMMIT называют «идеальным» сценарием, по нему предполагается неизменная скорость роста концентрации парниковых газов соответствующая индустриальному периоду XX в. вплоть до 2000 г. Остальные три сценария относятся к так называемым политическим сценариям: они учитывают экономическое и политическое развития стран. Сценарий SRA1B предполагает очень быстрое экономическое развитие и рост численности населения до середины XXI в., приводящие к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере. После, примерно, 2050 г. по этому сценарию развиваются новые и более эффективные технологии с альтернативными источниками энергии, которые приводят к снижению концентрации парниковых газов. Сценарий SRB1 похож на сценарий SRA1B, но с более быстрым экономическим развитием и ростом численности населения. По сценарию SRA2 происходит непрерывное увеличение численности населения на земле и локальный экономический рост, приводящие к медленному развитию новых технологий и, как следствие, к замедленному темпу уменьшения концентрации парниковых газов.

На рис. 2 представлена современная зона с плохо предсказуемым формированием стока при использовании только одной фазовой переменной. Зона распространяется в основном от 30 до 60° северных широт, захватывает почти всю Европейскую территорию России, большую часть Европы, половину США и Канады, а также Казахстан, Монголию, Китай. В южном полушарии зона имеет небольшое распространение по территории Перу, Боливии, Аргентины и Австралии. Кроме того, есть опасные территории в Исландии, Гренландии, Японии (речь идет об опасном диапазоне температур; рек с зональным формированием стока там может и не быть).

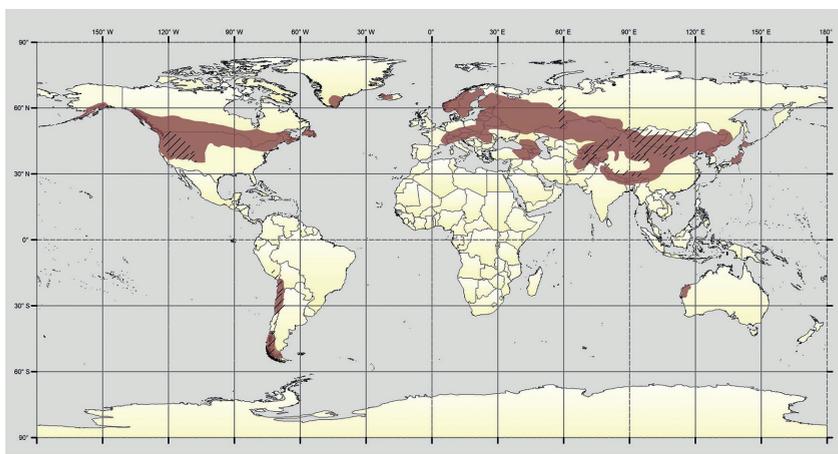


Рис. 2. Наиболее вероятные (по фактическим данным) регионы с плохо предсказуемым процессом формирования многолетнего годового стока при использовании модели с одной фазовой переменной (штриховые области – горные районы)

По сценарию Commit (рис. 3) получено, что полоса сузится по сравнению с рис. 2. На Европейской территории России зона будет включать южные районы. В Европе, катастрофичными, с точки зрения прогнозирования стока, останутся реки Белоруссии, Украины, Польши, и реки, относящиеся к бассейну Средиземного моря, таких государств как Греция, Словения, Швейцария. Зона будет захватывать часть Германии и Австрии, а также Великобритании. Регионы, находящиеся в Южной Америке, расширились по сравнению с современной ситуацией: опасная зона формирования стока захватила большие территории Боливии и Аргентины. Опасные бассейны исчезнут в Австралии, Японии, Гренландии.

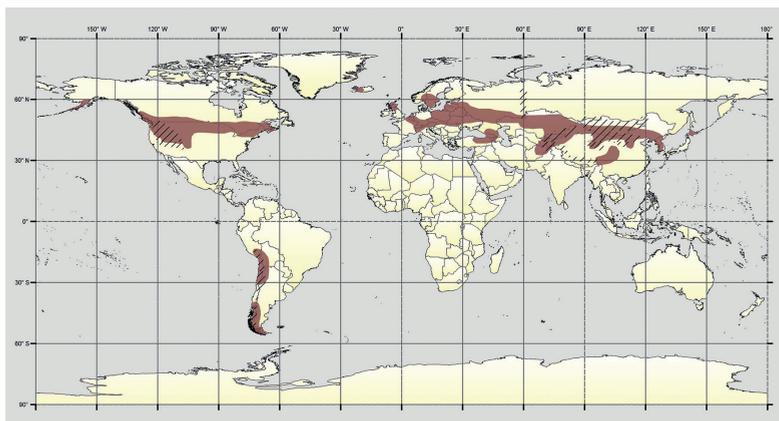


Рис. 3. Наиболее вероятные регионы с плохой предсказуемостью формирования многолетнего годового стока по модели HadCM3 климатического сценария Commit на 2050 г.

По «политическим» сценариям SRA1B, SRB1 и SRA2 (рис. 4, а–в) получено, что географические распределения опасных зон не сильно различаются друг от друга, но отличны от распределения, полученного по сценарию Commit. Например, в Европе по сравнению со сценарием Commit наблюдается уменьшение зон риска: остаются только Германия и Австрия.

По сценарию SRA1B (рис. 4а) наибольшие изменения по сравнению с современной ситуацией ожидаются в Евразии: зона риска сузится и будет охватывать страны Прибалтики, южные районы Российской Федерации, северные территории Казахстана, Монголии, Китая; в Европе «опасными» будут бассейны рек Германии, Австрии и Великобритании. В Северной Америке неблагоприятная полоса сдвинется на север и охватит большую часть Канады. Изменения будут и на Аляске: зона значительно «расползется» по побережью.

Отличия сценария SRB1 (рис. 4б) от SRA1B заключаются в том, что увеличатся площади, подверженные возможным катастрофическим ситуациям, в Южной Америке – Боливия и Аргентина, и изменятся очертания неблагоприятной зоны в Северной Америке.

Так как рассматривается сценарная оценка зон плохо предсказуемого формирования стока на 2050 г., то сценарий SRA2 дает практически идентичные результаты со сценарием SRA1B (рис. 4в). По описанию этих сценариев подразумевается одинаковая тенденция в изменении концентрации парниковых газов до середины XXI в.

Значительные отличия в распространении неблагоприятной зоны наблюдаются только на Аляске и западном побережье Северной Америки.

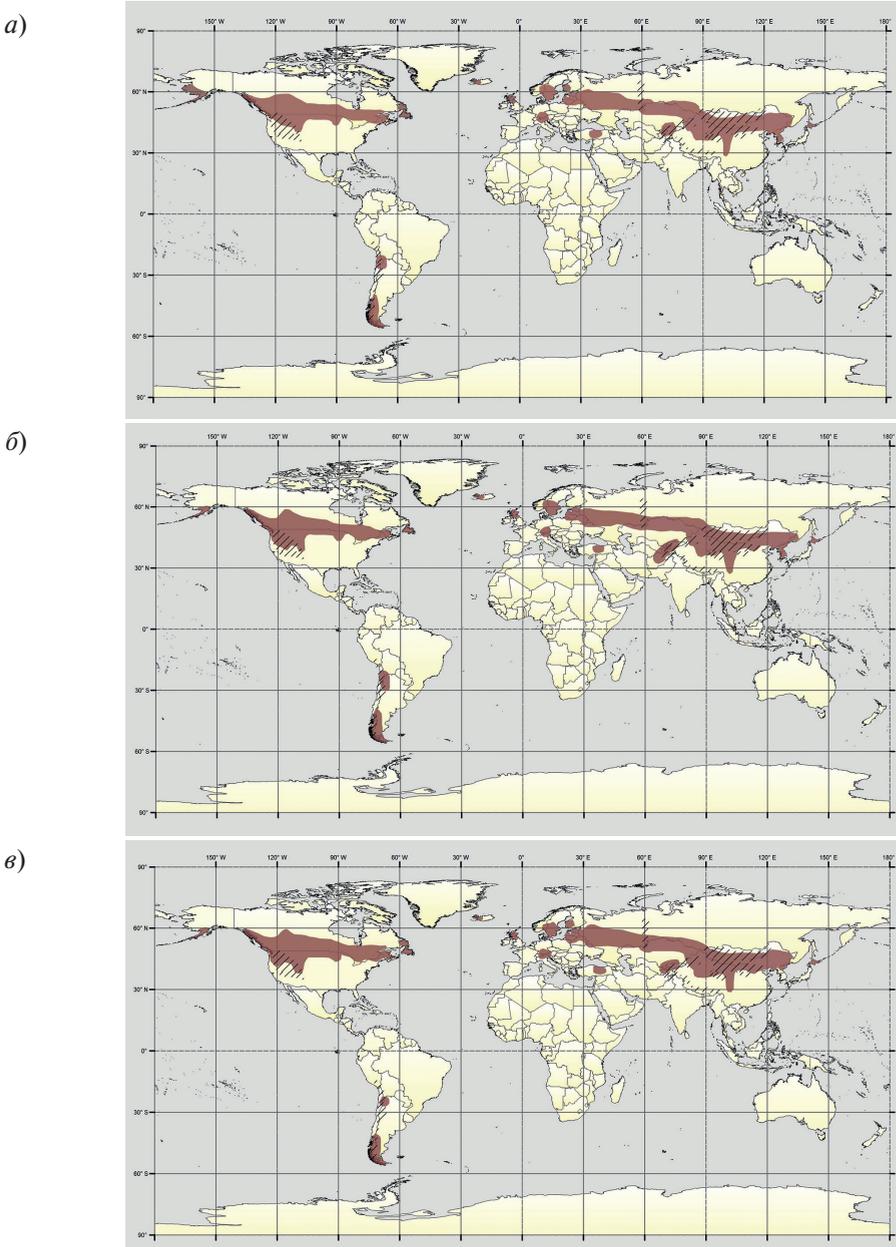


Рис. 4. Наиболее вероятные регионы плохо предсказуемого формирования многолетнего годового стока по модели HadCM3 климатических сценариев SRA1B (а), SRB1 (б), SRA2 (в) на 2050 г.

Выводы

В статье рассмотрена методика применения зависимости фрактальной размерности рядов многолетнего годового стока от норм температуры приземного воздуха (фрактальная размерность параболически зависит от нормы приземной температуры воздуха, достигая наибольших значений в диапазоне температур 1?6–7 °С) для выявления регионов, в которых применение модели формирования многолетнего стока на основе только одно фазовой переменной может создать проблемы, связанные с неустойчивостью ее решений.

С использованием этой закономерности были построены географические карты, показывающие смещение зон плохо предсказуемого формирования многолетнего стока по нескольким климатическим сценариям на 2050 г. Эти карты представляют прогностический интерес, так как позволяют уже в настоящее время давать практические рекомендации по обеспечению надежности проектируемых гидротехнических сооружений и других водохозяйственных объектов.

Исследования финансировались Министерством образования и науки Российской Федерации (грант № 14.В37.21.0678).

Литература

1. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куасси А.Б.Г. Фрактальная диагностика речного стока для устойчивого описания многолетних колебаний гидрологических характеристик. // Метеорология и гидрология, 2008, № 4, с. 73–80.
2. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В. Влияние климатической нормы приземной температуры воздуха на фрактальную размерность рядов многолетнего речного стока. // Доклады Академии наук, 2011, т. 439, № 6, с. 815–817.
3. Коваленко В.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование зависимости фрактальной размерности рядов многолетнего стока от климатической нормы приземной температуры воздуха. // Доклады Академии наук, 2012, т. 444, № 6, с. 666–670.
4. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л., Голованова Е.Ю. Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока. // Гидротехническое строительство, 2013, № 2, с. 38–43.
5. Гайдукова Е.В. Определение усредненной климатической сценарной модели для долгосрочной оценки характеристик многолетнего речного стока. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 18–25.
6. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е, испр. и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
7. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть III. Частично инфинитное моделирование» (на базе языка C++ Builder). – СПб.: изд. РГГМУ, 2013. – 102 с.
8. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 423 с.
9. The IPCC Assessment Reports // [Электронный ресурс]: IPCC, 2009. – Режим доступа: [http://www.ipcc.ch].