

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННО-ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СТОКА

Т.А. Зырянова, О.В. Ловцкая

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г.Барнаул

Имеющиеся ряды наблюдений за стоком представляют собой отдельные реализации поля геофизического процесса формирования речного стока, характеризующегося функцией, зависящей от времени (t) и пространственных координат (x). В таких рядах содержится в неявном виде вся информация о факторах, определяющих величину стока. Весьма привлекательной кажется мысль о возможности районирования этих факторов и выделения наиболее значимых из них. Одним из способов такого анализа может служить метод главных компонент [1], в гидрологии известный как метод разложения полей по естественно-ортогональным функциям [2,3]. Он позволяет представить функцию $F(t,x)$ в виде суммы произведений функции $X_h(x)$ и $T_h(t)$

$$F(t, x) = \sum (X_h(x) \cdot T_h(t)), \quad (1)$$

где число створов $h=1,2,3\dots m$.

Функции $X_h(x)$ зависят от координат точек и являются собственными векторами корреляционной матрицы совокупностей значений стока F_{ij} . Каждому собственному вектору отвечают коэффициенты разложения $T_h(t)$, которые не зависят от географического положения створа и изменяются только во времени

$$T_{ij} = \sum (F_{ij} X_{hj}) / \sum X_{hj}^2 \quad (2)$$

Зная величину собственных векторов и вычислив по известным значениям стока временные коэффициенты, мы получаем возможность восстановления пропущенных членов ряда. Выяснив физический смысл собственных векторов, т.е. идентифицировав их с гидрографическими или иными постоянными во времени характеристиками створов, можно рассчитать сток неизученных рек, а, определив зависимость временных коэффициентов от основных стокообразующих (т.н. внешних) факторов и зная прогноз последних, – прогнозировать и сток.

Возможность расчета речного стока с помощью этого метода рассмотрена на примере весеннего стока некоторых рек Алтая, Салаира и Бийско-Чумышской возвышенности и годового стока рек бассейна Катунь, Бии и Чарыша. Расчет выполнялся пакетом STATISTICA 6.0 [4]. По рядам исходных данных (слой стока за период весеннего половодья в первом случае и модули годового стока – во втором), заданных в виде матрицы, в столбцах которой представлены значения стока в разных створах, рассчитывается корреляционная матрица. Собственные числа λ этой матрицы позволяют определить точность представления полей в разложении (1)

$$d = \sum_{h=1}^{m_1} \square / \sum_{h=1}^m \square,$$

где m – общее количество членов разложения, m_1 – часть из них. Знаменатель характеризует дисперсию всего поля, заданного в m точках, числитель – часть этой дисперсии, отраженную первыми m_1 членами разложения. Относительная погрешность вычисления стока зависит от числа принимаемых в расчет членов разложения $\square = \sqrt{1-d}$. Погрешность расчета по первой составляющей, дающей 55-70% информации о весеннем стоке рек, равна 55 - 65%. Увеличение числа составляющих до 4-5 уменьшает погрешность до 15 -30%. Для достижения приемлемой (порядка 15%) относительной погрешности необходимо использование около половины членов разложения. При анализе годового стока в бассейне Бии и Катунь (23 створа) 15%-ная погрешность достигается учетом первых 9 членов разложения.

Определение физического смысла функций $X_h(x)$ по графикам зависимости их от гидрографических характеристик бассейна дает не вполне удовлетворительные результаты. Однозначно установлена лишь физико-географическая обусловленность некоторых собственных векторов матрицы слоя весеннего стока предгорных районов: второго вектора (X_2) – средней высотой водосбора, X_4 – величиной залесенности водосбора (рис 1). Прослеживается прямая зависимость вектора X_3 от среднего уклона водосбора половины принятых в расчет створов. Территориальная изменчивость первого вектора слабая в области предгорий и в бассейне Бии. Для рек бассейна Катунь его вариация значительно больше. Здесь по резко отличающейся величине X_1 выделяются в обособленный район реки ледникового питания (исключение р. Актру). Большое отклонение X_1 р.Клык – с.Бийка от среднбассейнового значения, вероятно, можно объяснить наличием на водосборе карстующихся пород.

Тесной зависимостью первого вектора матрицы модулей годового стока (7 постов в бассейне Чарыша и 23 поста в бассейне Бии и Катунь) от гидрографических характеристик, как и в случае весеннего стока, не выявлено. По Бие и ее притокам значения X_1 уменьшаются от -0.19 в верховьях до -0.25 в нижнем створе (Бийск). Подобное распределение, но менее выраженное, и в бассейне Катунь. Исключениями являются р.Солтонка (бассейн Бии) и реки ледникового питания в бассейне Катунь (Ку- черла, Чаган) с высокими значениями X_1 (-0.12 и 0.08 соответственно). В бассейне Чарыша просматривается связь вто-

рого и третьего вектора с высотой и залесенностью водосборов. Исключение из расчетов данных по Усть-Кумиру приводит к увеличению тесноты связи. Зависимость гидрографических характеристик рек бассейна Бии и Катуня со значениями второго – четвертого векторов не установлена.

Для идентификации временных коэффициентов T_i их хронологический ход сопоставлен с колебаниями основных стокообразующих факторов – снегозапасов в виде суммы осадков за холодный период, суммы увлажняющих осадков за август-октябрь, суммы осадков за период весеннего половодья, средней температуры воздуха периода снеготаяния (рис. 2). Значения первого временного коэффициента T_1 обусловлены снегозапасами, их связь определяется коэффициентом корреляции $R = -0.52$. Кроме того, достаточно хорошая синхронность в колебаниях T_1 и средней температуры воздуха в апреле-мае ($R = 0.45$). Коэффициенты T_2-T_4 слабо зависят от стокообразующих факторов. Таким образом, нивелирование различий в изменениях стока и метеозлементов разных физико-географических зон путем осреднения по большой территории не приводит, в данном случае, к положительным результатам.

Изменение исходной матрицы, например, разделение ее по отдельным районам, приводит к появлению других взаимообусловленных связей. В частности, для весеннего стока рек Предалтайской равнины и среднегорий Алтая зависимость T_1 от снегозапасов слабее ($R = -0.47$), здесь появляется другой существенный фактор - осадки за период половодья ($R = -0.43$). И, по-прежнему, прослеживается синхронность в колебаниях T_1 и средней температуры воздуха за апрель-май. Хронологический ход второго временного коэффициента может быть сопоставлен с изменениями осеннего увлажнения почвы, третьего - с зимними осадками. Для рек высокогорий определяющим для величины весеннего стока является температурный режим лета.

Однако во всех случаях низкие значения коэффициентов корреляции не дают возможности надежной идентификации временных коэффициентов со стокообразующими факторами, что делает проблематичным, наряду с отсутствием прогноза метеозлементов, возможность прогноза весеннего стока.

Проверка методики осуществлена на материалах наблюдений за весенним стоком р.Маралихи у с.Куйбышево ($F=1100$ кв.км, $H=480$ м, $f_d=15\%$). Для расчетов использованы первые четыре элемента разложения матрицы, составленной из значений стока рек предгорий Алтая, Салаира и Бийско-Чумышской возвышенности. Средняя величина отклонений рассчитанных значений весеннего стока от фактических составляет -8%, изменяясь от -36 до 30%.

Таким образом, метод главных компонент может использоваться для восстановления рядов речного стока на всей рассматриваемой территории. Расчет весеннего стока неизученных рек достаточно надежен для рек предгорий Алтая, где возможна идентификация собственных векторов корреляционной матрицы с гидрографическими характеристиками водосборов. В условиях Горного Алтая с различными и резко отличающимися друг от друга факторами формирования поверхностного стока, затрудняющими подбор аналогов даже для близко расположенных рек, метод не имеет преимуществ перед другими методами инженерной гидрологии. Разрабатываемый в ИВЭП метод русловой трансформации позволит вычислять сток с учетом местных особенностей.

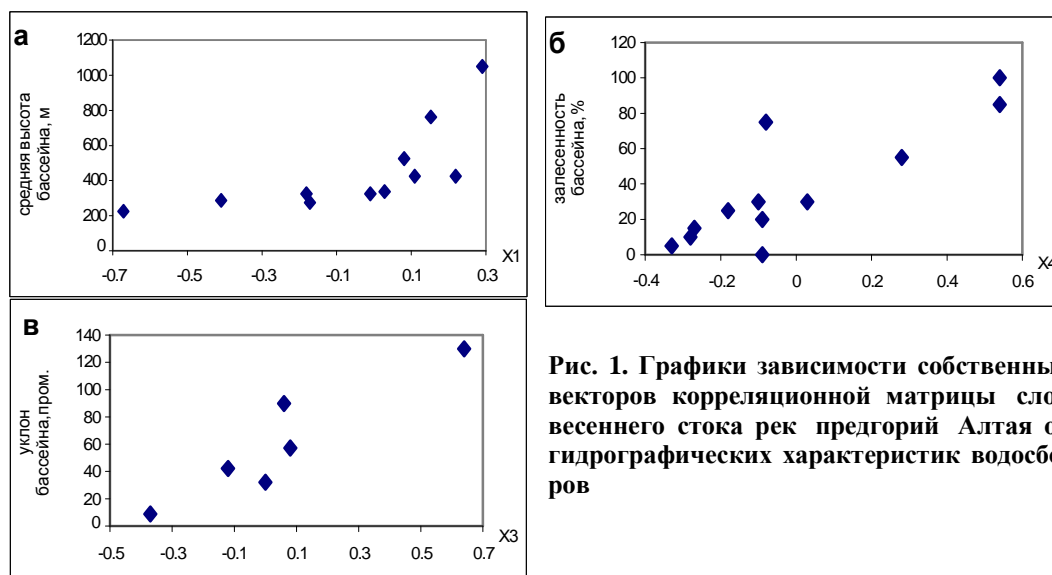


Рис. 1. Графики зависимости собственных векторов корреляционной матрицы слоя весеннего стока рек предгорий Алтая от гидрографических характеристик водосборов

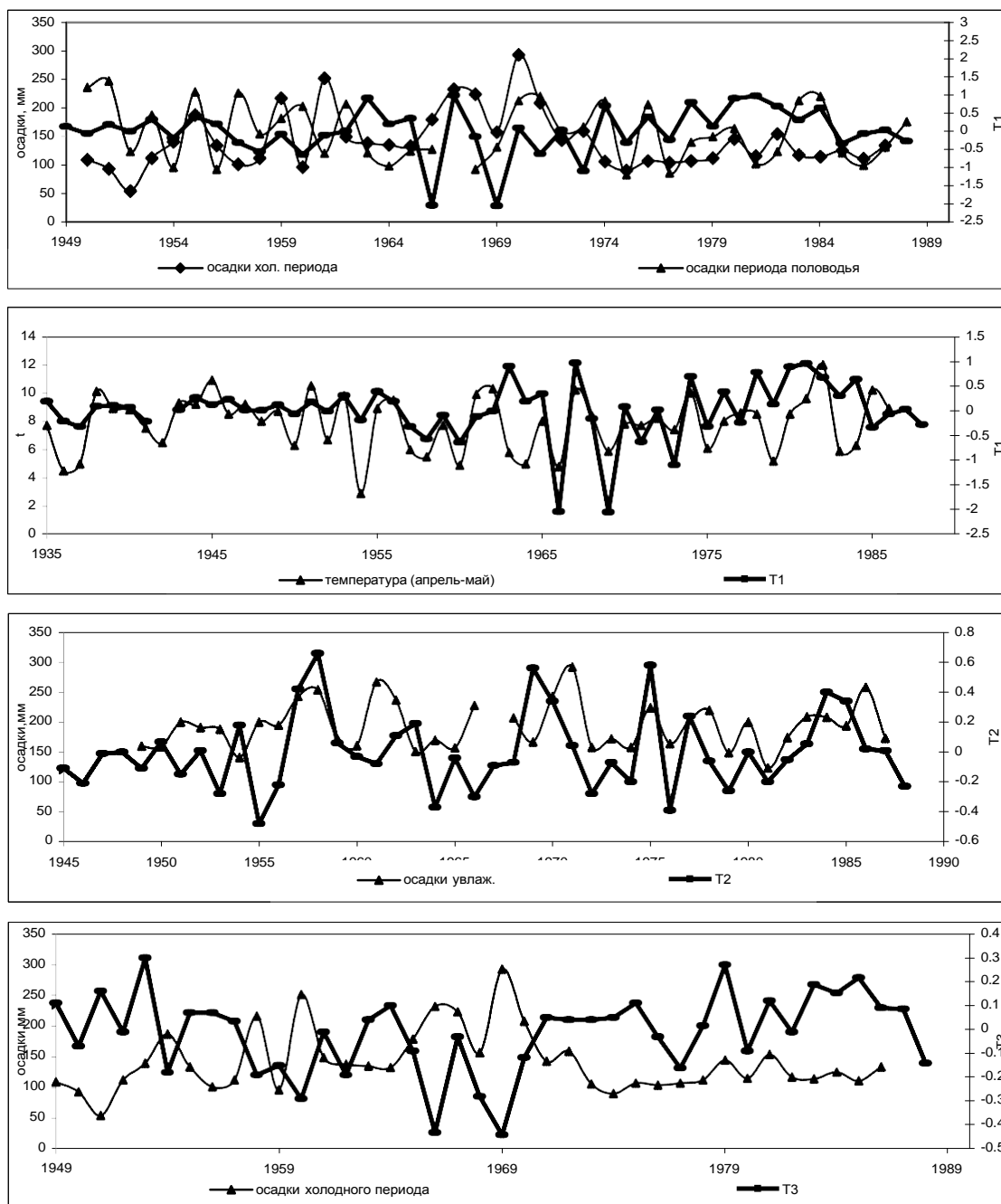


Рис.2. Хронологические графики колебаний временных коэффициентов T_i и основных стокообразующих факторов.

Литература

1. Дж. С.Дэвис Статистический анализ данных в геологии. Кн.2. – М.: Недра, 1990. – 427 с.
2. Карасев И.Ф., Савельева Е.И. Разложение гидрологических полей по естественно-ортогональным составляющим и расчет слоев весеннего стока неизученных рек // Сборник трудов / Рос. Гос. Гидрометеорол. ин-т. – 1992. - С.76-83.
3. Карасев И.Ф. Учет речного стока при отсутствии гидрометеорологических данных методом разложения функций на естественно-ортогональные составляющие // Труды / Гос. Гидрол. ин-т. – 1987. – Вып. 328.
4. StatSoft, Inc. (2001). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.