

Н. А. Бегалишвили, Г. Г. Сванидзе, Н. Цинцадзе.

## О ГИДРОЛОГИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ В РАНДОМИЗИРОВАННЫХ ОПЫТАХ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ КОНВЕКТИВНЫХ ОСАДКОВ

Одной из основных задач в проблеме исследования возможности искусственного изменения режима атмосферных осадков в бассейнах горных рек Восточной Грузии с целью увеличения водных ресурсов водохранилищ (естественных и искусственных) является разработка методов оценки эффекта воздействия на основе данных гидрометрических измерений. Даже в том случае, когда основная оценка эффекта осуществляется на основе данных осадкомерных наблюдений, для достижения основной цели проектов необходимо рассмотреть вопрос определения количества дополнительных водных ресурсов, получаемых в результате активных воздействий на облака и, следовательно, рассмотреть возможность применения гидрологических методов оценки эффективности воздействий.

Эти методы привлекательны тем, что опытный бассейн вместе с водохранилищем является как бы интегральным измерительным пунктом осадков, выпадающих над площадью водосбора, с помощью которого можно будет уловить изменение стока в результате экспериментов по засеву облаков. Сравнительно небольшая площадь и значительный уклон водосбора могут служить предпосылками к использованию - этой системы для эффективного контроля за результатами воздействия. Однако существуют и недостатки, характерные для применения стока в целях оценки эффекта воздействия: сравнительно большие погрешности измерения расходов воды, большая изменчивость естественных течений, нестационарность процесса речного стока и др.

В предварительной стадии проектов увеличения осадков "Иори" и "Паравани" (1979-1980 гг.), выполняемых на горных полигонах Восточной Грузии, основной план экспериментов предусматривал "непрерывный" засев конвективных облаков теплого сезона года. В качестве экспериментальных единиц (э.е.) были рекомендованы сезонные суммы осадков и расходы воды в реках опытной (ОТ) и контрольной (КТ) территорий полигонов. Их основным преимуществом является сравнительно меньшая изменчивость, простота получения исходных данных, недостатками - небольшой объем э.е., ограниченные возможности классификации данных, необходимость непрерывного воздействия в течение всей единицы. При использовании сезонных осадков и стока длительность обоих э.е. совпадает. В таком случае двойная оценка эффекта воздействия могла оказаться достаточно убедительной. Однако сравнительно малая величина эффекта (не более 10-20% от сезонных сумм осадков), наблюдаемая естественная изменчивость осадков и стока, а также короткий период экспериментирования не позволили получить значимые оценки эффекта воздействия на основе метода исторической регрессии.

Действительно, пусть  $y$  есть фактическое количество осадков (расходов воды) на ОТ,  $\hat{y}$  - вероятное количество осадков (расходов) на ОТ, которое определяется на основе соответствующего уравнения регрессии,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение относительно линии регрессии или ошибка уравнения регрессии ( $\sigma^2 = \sigma_y^2(1 - r^2)$ ); здесь  $\sigma_y^2$  - величина дисперсии осадков (стока) на ОТ,  $r$  - коэффициент корреляции). Тогда статистическую значимость оценки эффекта воздействия можно определить, вычисляя значения параметра Стьюдента.

$$t = \frac{|y - \hat{y}|}{\sigma} \quad (1)$$

Применение критерия Стьюдента оправдано тем, что при использовании среднего сезонного количества осадков и расходов воды за длительный период наблюдения распределения близки к нормальному. Проверка близости эмпирических распределений к нормальному по критериям  $\chi^2$  и Колмогорова подтвердила это положение.

Если воздействие проводится в течение  $K$  лет, то изменчивость (дисперсия) относительно линии регрессии уменьшится в  $K$  раз, что, возможно, позволит получить оценку на заданном уровне значимости. Оценим число  $K$ , исходя из неравенства

$$\frac{|y - \hat{y}|}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{k}}} \geq t_\alpha \quad (2)$$

где  $t_\alpha$  - табличное значение параметра Стьюдента для заданного уровня значимости  $\alpha$ . Из (2) следует, что

$$k = \left( \frac{\sigma}{|y - \hat{y}|} t_\alpha \right)^2 \quad (3)$$

При условном увеличении сезонных осадков на 5% от многолетней нормы  $\bar{y}$  для условий Иорского полигона имеем  $|y - \hat{y}| = 0,05y'$ ,  $\sigma = 0,1\bar{y}$ ,  $t_\alpha = 2,04$  ( $\alpha = 0,05$ ) и  $K \geq 16$  лет. При увеличении сезонных осадков на 10% -  $K \geq 4$  лет, при увеличении на 20% -  $K \geq 1$  года.

Аналогичная оценка периода экспериментирования по гидрологическим данным дает следующие результаты. Исходя из значения величины многолетней нормы расхода воды в створе р.Иори - с.Леловани, можно принять для сезона  $\sigma = 0,3\bar{y}$ . При 10%-ном увеличении

сезонного стока'  $K \geq 36$  лет для  $\alpha = 0,05$  и  $K \geq 25$  лет для  $\alpha = 0,10$ . Только при увеличении сезонных расходов на 20% можно получить значимую оценку за время экспериментирования порядка 5-10 лет.

Из (3) видно, что переход к месячным осадкам и стоку (т.е. увеличение изменчивости) приведет к увеличению продолжительности эксперимента. В условиях, когда на формирование стока идет часть выпавших на водосборе осадков (средний сезонный коэффициент стока составляет величину 0,3-0,5), величину прибавки к сезонным расходам следует ожидать не более 5-10%. Это в свою очередь также увеличивает продолжительность эксперимента. Наконец, следует принять во внимание, что осуществить непрерывный засев в течение всего сезона практически не удастся, что также увеличивает время экспериментирования.

Исходя из вышеизложенного, для осуществления объективного контроля и оценки эффекта воздействия необходимо было перейти к рандомизированному засеву, а метод регрессии применить в качестве вспомогательного.

С 1981 г. на Иорском и Параванском полигонах были начаты рандомизированные эксперименты. Случайному выбору подвергался 12-часовой интервал (полусутки) с вероятностью, равной 2/3 в пользу воздействия. Поэтому необходимо было исследовать возможность применения гидрологических методов оценки эффекта воздействия применительно к рандомизированному плану экспериментов. Так как основная оценка эффекта воздействия выполнялась по полусуточным осадкам, то естественным образом для гидрологической оценки был выбран объем (или модуль) стока, формирующийся за счет этих осадков..

Объем стока определялся выделением ливневого пика на комплексном гидрографе реки опытного бассейна, соответствующего осадкам э.е., и интегрированием гидрографа по времени в течение существования пика. В частности, прежде всего фиксировался расход воды р.Иори  $q_0$  в момент начала  $j$ -й э.е. В дальнейшем, если наблюдалось увеличение стока, то воздействие считалось результативным: значения расходов  $q_i$  через каждые  $\Delta\tau$  интервалы времени (временной шаг интегрирования) были не меньше, чем  $q_0$ , т.е.  $q_i - q_0 \ i = 1, 2, \dots, n_j$ . Здесь  $q_n = q_0$ ,  $t_j = n_j \Delta\tau$  - есть промежуток, времени, необходимый для достижения стоком расчетного створа от самых отдаленных участков водосбора. Иначе,  $t_j$  представляет собой время добегания или время существования единичного ливневого пика, сформировавшегося осадками  $j$ -й э.е.

Следовательно, объем единичного пика, образовавшийся за счет, осадков  $j$ -й э.е. и прошедший через расчетный створ, равен

$$\omega_j = \sum_{t=0}^{n_j} [(q_1 - q_0) + (q_{t-1} - q_0)] \frac{\Delta\tau}{2} \quad (4)$$

На графике расходов воды увеличение стока выражается в виде пикового пика (рисунок), началом которого является значение ординаты расхода реки в момент начала отсчета э.е. Объем этого пика и вычислялся по выражению (4).

Если расходы  $q_i$  были меньше, чем  $q_0$  ( $q_i < q_0$ ), т.е. наблюдалось уменьшение стока для  $j$ -й э.е., то принимали  $\omega_j = 0$ . В этом случае воздействие (если оно проводилось) считалось безрезультативным с гидрологической точки зрения. Возможно, в результате засева и наблюдалось увеличение осадков, однако их величина и условия формирования стока были такими, что не привели к увеличению расходов воды в гидрометрическом створе.

Суммарный объем стока, сформировавшийся за счет осадков опытной или контрольной групп э.е., можно вычислить путем суммирования

$$W_k = \sum_{j=1}^{N_k} \omega_j$$

где индекс  $k=1$  отнесен к опытной группе, а  $k=2$  - к группе контроля;  $N_k$  - число э.е. в  $k$ -й группе.

Так как общие количества э.е. в группах из-за рандомизации практически не совпадают, то вместо  $W_k$  рассмотрим средние объемы стока  $V_k$  или расходы воды  $Q_k$ :

$$V_k = \frac{W_k}{N_k} = \sum_{j=1}^{N_k} \frac{\omega_j}{N_k} \quad (6)$$

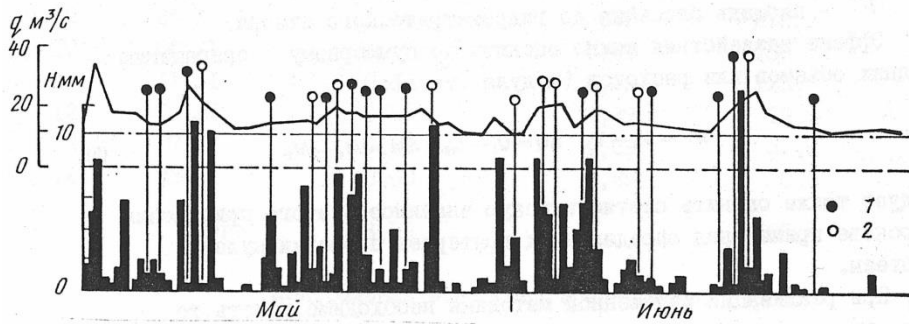
$$Q_k = \frac{W_k}{(N_k \sum_{j=1}^{N_k} t_j)} = \sum_{j=1}^{N_k} \frac{\omega_j}{(N_k \sum_{j=1}^{N_k} n_j \Delta\tau)} \quad (7)$$

При сравнении интенсивности стокообразования на ОТ и КТ вместо средних расходов необходимо перейти к средним значениям модуля стока  $M_k = \frac{Q_k}{F} = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\omega_j}{FN_k \sum_{i=1}^{N_k} n_j \Delta\tau}$  (8)

где  $F$  - площадь бассейна до гидрометрического створа.

Эффект воздействия можно оценить по суммарному приращению средних объемов или расходов (модуля стока):

$$\Delta V = V_1 - V_2, \quad \Delta Q = Q_1 - Q_2, \quad \Delta M = M_1 - M_2. \quad (9)$$



Совмещенный график колебания расходов воды  $q$  и осадков  $H$  (комплексный гидрограф) р.Иори в створе с.Леловани за май-июнь 1982 г.:  
 1 - дни с воздействием, 2 - контрольные дни

Следует также оценить статистическую значимость этого приращения на основе применения определенных критериев проверки нулевой гипотезы.

При реализации изложенной методики необходимо учесть то обстоятельство, что длительность паводочного пика на гидрографе зависит от условий формирования стока. Время существования пика может в несколько раз превышать э.е. Паводочный пик может сформироваться осадками нескольких э.е., т.е. представлять собой результат наложения друг на друга (сумму) единичных пиков (рис. 1). Если все э.е., относящиеся к данному пику, окажутся или из группы контроля, или из опытной группы, то объем этого пика, естественно, войдет в суммарный объем стока соответствующей группы. Если же паводочный пик сформировался осадками нескольких э.е., относящихся к разным группам, то в этом случае необходимо выделить из объема пика вклад осадков каждой э.е., иначе говоря, определить объемы единичных пиков.

Для этой цели можно применить математические модели формирования стока [2, 4]. Примером такой модели является генетический метод построения гидрографа по известному ходу поступления дождя на водосбор, который заключается в последовательном суммировании элементарных объемов (расходов) стока, сформировавшихся в разных частях бассейна и одновременно проходящих через створ измерений [1, 3].

При этом учет времени добегания элементарных объемов стока до рассматриваемого створа реки производится путем построения на плане (карте) водосбора схемы изохрон - линий точек, равноудаленных от замыкающего створа по времени добегания. С помощью схемы изохрон определяется распределение единичных площадей водосбора, дающих сток в течение заданного времени. Аналитическим выражением метода является генетическая формула стока, выражающая закономерность стока воды с водосбора к замыкающему створу,

$$q_i = \int_0^{t_i} h \frac{\partial f}{\partial \tau} d\tau, \quad (10)$$

где  $q_i$  - расход воды в  $i$ -й момент времени с начала паводка;

$h$  - модуль склонового притока в данный момент времени;  $t_i$  - время добегания;  $f$  - площадь, заключенная между смежными изохронами;  $\tau$  - переменная интегрирования (время).

В ряде случаев (10) можно записать в упрощенном виде в форме многочлена (1):

$$q_1 = h_1 f_1 + h_2 f_{i-1} + \dots + h_1 f_1 = \sum_{k=1}^{k=i} h_k f_{i-k+1} = \sum_{k=1}^{k=i} h_{i-k+1} f_k \quad (11)$$

где  $h_i$  - интенсивность дождя;  $f_i$  - части площади водосбора, заключенные между соседними изохронами стока.

Для примера рассмотрим оценку эффективности воздействия рандомизированных экспериментов, проведенных на Иорском полигоне в мае-июне 1982 г. На рис. 1 представлен соответствующий наблюдаемый комплексный гидрограф. Полусуточные осадки определены путем осреднения данных 12 измерительных пунктов, расположенных на водосборе выше гидрометрического створа/Как видно из рисунка\* за рассмотренный период было зафиксировано 24 э.е. - из них 14 с воздействием и 10 - контрольных. Объемы паводочных пиков за 6-12 мая и 1-6 июня были вычислены интегрированием гидрографа по времени и отнесены соответственно к группам воздействия и контроля. В остальных случаях может быть применен генетический метод. Исходными данными являются: площадь водосбора  $F=494 \text{ км}^2$ ; длина водотока  $L=43 \text{ км}$ ; сведения о каждом условном дожде продолжительностью 12 ч и суммарным слоем осадков  $H_j$

Расчетную среднюю скорость руслового добегания (м/с) оценим по формуле (1):

$$\bar{V}_p = \frac{\alpha}{\frac{1}{3} Q_{max}^{1/4}} \quad (12)$$

где числовой коэффициент  $\alpha = 0,15$  зависит от средней шероховатости русла (по всей длине реки) и устанавливается по специальным таблицам (см. [1]);  $I$  - средний уклон выравненного профиля, %;  $Q_{max}$  максимальный средний суточный расход. При значениях  $I=10\%$  и  $\bar{Q}_{max} = 25 - 30 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис.1) получаем  $\bar{V}_p = 1 \text{ м/с}$ . Общее время добегания равно

$$\tau = \frac{L}{\bar{V}_p} = 12 \text{ ч} \quad (13)$$

Таким образом, для условий Морского полигона время добегания равно продолжительности условной водоотдачи (12 ч э.е.). В этом случае следует назначить расчетный интервал времени порядка 2 ч ( $\tau = 5\Delta\tau, 6\Delta\tau$ ). Поэтому необходимо иметь соответствующий график водоотдачи (плювиограмму дождя). Не располагая такими данными, упростим задачу: с учетом объемного коэффициента стока, характеризующего каждый паводочный пик, определил объем стока, формирующийся в результате дождя отдельной э.е. (объем единичного пика) по выражению

$$\omega_j = \alpha H_j F \quad (14)$$

Входящий в (14) объемный коэффициент стока определим по формуле

$$\alpha = \frac{\omega}{F \sum_i H_i} \quad (15)$$

Здесь  $\omega$  - объем паводочного пика (куда входит данный единичный пик), вычисленный интегрированием наблюденного гидрографа;  $\sum_i H_i$  - суммарный слой осадков тех э.е., которые сформировали данный пик.

Так как после каждой э.е. следовали буферные полусутки, осадки которых (если они наблюдались) не входили в опытную и контрольную группы при-оценке эффекта воздействия по дождевым измерениям, то соответствующий этим полусуткам объем стока также был исключен из групп гидрометрических данных.

Для контроля точности вычислений были сопоставлены величины объемов всех паводочных пиков, полученные интегрированием наблюденного гидрографа (на основе (4)) и рассчитанные по выражению (14). Расхождение составило не более 1-2%. Следовательно, точность вычислений, вполне приемлема и можно ограничиться применением формул (14), (15), а не (10), (11) и не применять метод изохрон (в данном конкретном случае).

Результаты вычислений сведены в таблицу. Суммарный опытный объем стока, сформировавшийся за счет осадков э.е. с воздействием, составил  $W_1=5195,4$  тыс.м<sup>3</sup>; суммарный контрольный объем -  $W_2=3417,2$  тыс.м<sup>3</sup>. Средний опытный объем стока, приходящийся на одну э.е., равен  $V_1=371,1$  тыс.м<sup>3</sup>, контрольный -  $V_2=341,7$  тыс.м<sup>3</sup>. Увеличение объема стока составило  $\Delta V=29,4$  тыс.м<sup>3</sup> или около 10% контрольного среднего объема стока одной э.е.

**Осадки э.е., коэффициент стока паводочных пиков, объемы единичных пиков**

№ 5 э.е.	Дата	$H_j$ мм	$\alpha$	$\omega_j$ тыс.м <sup>3</sup>
<b>Опытные э.е. (с воздействием)</b>				
I	05 V 1982	1,14	0,24	135,2
2	06 V	1,39	0,24	164,8
3	08 V	0,23	0,24	27,3
4	14 V	5,44	0,38	1021,2
5	18 V	0,43	0,38	80,7
6	20 V	6,88	0,38	1291,5
7	21 V	2,66	0,38	499,3
8	22 V	1,84	0,38	345,4
9	24 V	1,44	0,38	270,3
10	06 VI	6,17	0,39	1188,7
II	11 VI	0,65	0,39	125,2
12	16 VI	0,09	0,39	12,9
13	17 VI	0,23	0,29	32,9
14	23 VI	0,00	0,29	0,0
	Всего	28,59		5195,4
<b>Контрольные э.е. (без воздействия)</b>				
I	09 V 1982	0,23	0,24	27,3
2	17 V	1,76	0,38	330,4
3	19 V	6,87	0,38	1282,6
4	26 V	0,00	0,38	0,0
5	01 VI	3,43	0,17	281,7
6	03 VI	5,75	0,17	482,9
7	04 VI	0,00	0,17	0,0
8	07 VI	2,93	0,39	564,5
9	10 VI	1,03	0,39	198,4
10	18 VI	1,73	0,29	250,0
	Всего	23,78		3417,2

Статистическая оценка значимости полученного расхождения с применением критериев Стюдента, отношения правдоподобия и метода выборочных сумм показала, что эффект зафиксирован с достоверной

вероятностью до 0,90. Следовательно, необходимо продолжать эксперименты для увеличения числа э.е. и, принять меры для уменьшения межгрупповой дисперсии оцениваемых величин.

#### **Список литературы**

1. Клибашев К.П., Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 460 с.
2. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю. Г. Формирование речного стока. - М.: Наука, 1983.- 216 с.
3. Р о ш М. Гидрология суши. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 184 с.
4. Сванидзе Г. Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 296 с.