

*З.К. Иофин*

**ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ  
ГРУНТОВОГО ПИТАНИЯ РЕК К ВЕЛИЧИНЕ ИНФИЛЬТРАЦИИ  
НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНОГО БАЛАНСА**

*Z.K. Iofin*

**GENETIC THEORY OF FLOW IN THE PRESENTATION  
OF A NEW FORM OF THE EQUATION OF WATER BALANCE**

*Рассмотрена взаимосвязь линейно-корреляционной модели водного баланса и генетической теории стока. Рассмотрены генетические виды склонового стока и их связь и выражение посредством параметров линейно-корреляционной модели. Представлено обоснование линейности зависимости речного стока от атмосферных осадков.*

*Ключевые слова: уравнение водного баланса, параметры уравнения водного баланса, линейно-корреляционная модель водного баланса, генетическая теория стока, подвешенный склоновый сток (perched sheet flow), подпертый поверхностный склоновый сток (backed-up surface sheet flow), подпертый почвенный сток (backed-up ground flow).*

*Interconnection of the linear correlation model of water balance and the genetic theory of flow is considered. Genetic types of the sheet flow and their connection and expression by the use of parameters of the linear correlation model are considered. Substantiation of linearity of dependence of the river runoff on the precipitation is presented.*

*Key words: water balance equation, water balance equation parameters, linear correlation model of water balance, genetic theory of flow, perched sheet flow, backed-up surface sheet flow, backed-up ground flow.*

***Постановка проблемы***

Линейно-корреляционная модель водного баланса возникла из логического предположения о возможности получения некоторых воднобалансовых параметров при рассмотрении корреляционной зависимости речного стока от атмосферных осадков. Действительно, различие между величинами речного стока и выпадающими на водосбор атмосферными осадками обусловлено потерями как стока, так и атмосферных осадков. Формирование всех видов гидрологических характеристик на водосборе — атмосферных осадков, стока, потерь — имеет теоретическое обоснование. Поэтому при использовании значимой корреляционной зависимости величин речного стока от атмосферных осадков, выпадающих на водосбор, необходимо попытаться получить математические выражения для величин потерь.

Для этой цели предложена линейно-корреляционная модель водного баланса.

В качестве постановки проблемы при использовании линейно-корреляционной модели выступает правомерность использования линейной зависимости речного

стока от атмосферных осадков. А также, что очень важно, физическая обоснованность модели с точки зрения существующих гидрологических закономерностей на основе генетической теории стока.

### ***Объекты и методы исследования***

В качестве объекта исследования приняты линейно-корреляционная модель с ее линейной связью слоя стока со слоем атмосферных осадков, а также состав уравнения водного баланса с точки зрения его физической обоснованности. Коль скоро речь идет о линейности связи «сток—осадки», принципиальным становится вопрос именно линейности этой связи. Этот аспект также является объектом исследования. И, наконец, в качестве объекта исследования рассматривается параметр  $b$  и его связь с генетическими видами стока.

В качестве метода исследования в работе использован метод эмпирического уровня. К методу эмпирического уровня мы отнесли сравнение формальных признаков модели и физического содержания параметров модели, обоснованных теоретически.

### **А. Корреляционные связи.**

Линейно-корреляционная модель водного баланса может применяться при значимой корреляционной связи слоя речного стока от слоя атмосферных осадков. Формально при использовании линейно-корреляционной модели возникают несколько проблем. Одна из них — это допущение о линейности связи речного стока от атмосферных осадков. Это допущение может быть подтверждено следующим логическим обоснованием.

Линейность корреляционной связи слоя стока от слоя атмосферных осадков в одном случае может нарушаться за счет более интенсивного нарастания стока, в другом, наоборот, — более интенсивного нарастания атмосферных осадков. Указанное одностороннее интенсивное нарастание одной из переменных при нормальном (естественном) изменении второй переменной как раз и вызывает несоответствие в форме рассматриваемой линии связи на графике. Так, в случае замедленного нарастания речного стока в начальной фазе с увеличением интенсивности изменения в последующем со значениями, расположенными на оси ординат, и естественного изменения слоя атмосферных осадков на протяжении всей амплитуды, значения которого расположены на оси абсцисс, будет иметь место вогнутая кривая связи.

Выпуклая кривая зависимости слоя речного стока от слоя атмосферных осадков будет иметь место тогда, когда при значительном нарастании интенсивности величин стока, изображаемой в начальной части зависимости и незначительном изменении в последующем, и равномерном изменении интенсивности атмосферных осадков по всей амплитуде.

Эта картина может воспроизводиться тогда, когда по каким-либо причинам заполненные емкости на водосборе осуществляют интенсивный или, незначительный сброс, в начальный период.

В качестве дополнительного стока может появляться сток из поверхностных или подземных емкостей-хранилищ на водосборе, либо перетекание объемов воды из

соседних водосборов. Других причин просто нет. Источниками дополнительного стока могут быть подземные емкости на водосборе в виде карстовых образований или поверхностных источников аккумуляции в виде водохранилищ. Кроме этого, источниками дополнительного стока могут быть слабо выраженные водоразделы, допускающие перетекание стока из одного водосбора в другой. Объемы перетекания условно могут быть отнесены также к емкостям на исследуемом водосборе.

Таким образом, естественный ход изменения речного стока и атмосферных осадков в виде прямой линии нарушают различного рода емкости на водосборе.

Рассматривая графики связи «сток–осадки», необходимо отметить еще одну характерную особенность. Это положительное значение свободного члена  $b_5$  в уравнении прямой, связывающей рассматриваемые переменные (рис. 1). Свободный член уравнения при положительном  $b_5$  отсекает на оси ординат отрезок выше нулевой координаты по ординате.

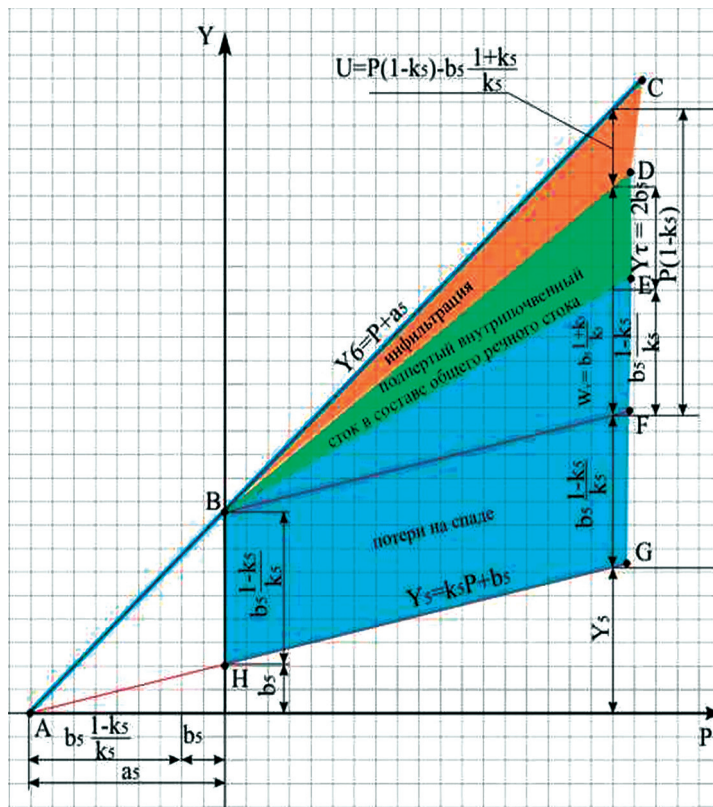


Рис. 1. Графическое изображение элементов водного баланса при положительном  $b$

Как показано в работе [4], отрезок  $b$  независимо от знака характеризует суммарную величину впитывания за период водообразования и слой впитывания после конца

стока за счет объемов воды, накопленных в понижениях. Последний иногда называют поверхностным задержанием стока на водосборе.

Отрезок  $b_3$  также характеризует слой впитывания, но еще до начала выпадения атмосферных осадков. Такой слой впитывания мог быть создан за счет подъема уровня грунтовых вод до дневной поверхности или до уровня, близкого к дневной поверхности. Других причин формирования слоя впитывания еще до выпадения атмосферных осадков, на наш взгляд, не существует.

В этом случае происходит так называемая пассивная аккумуляция, процесс, который входит в состав естественных условий формирования стока [1]. До процесса активного водообразования, когда появляется на поверхности водосбора микроручейковая сеть, формируется отрезок с отрицательным значением  $b_4$  в уравнении зависимости стока от осадков (рис. 2). С другой стороны, процесс водообразования может происходить и в условиях, когда уровень грунтовых вод находится вблизи дневной поверхности. Эти условия характеризуют заполненную емкость к началу водообразования и вызывают к жизни отрезок зависимости стока от осадков с положительным значением свободного члена в уравнении прямой  $b_5$ .

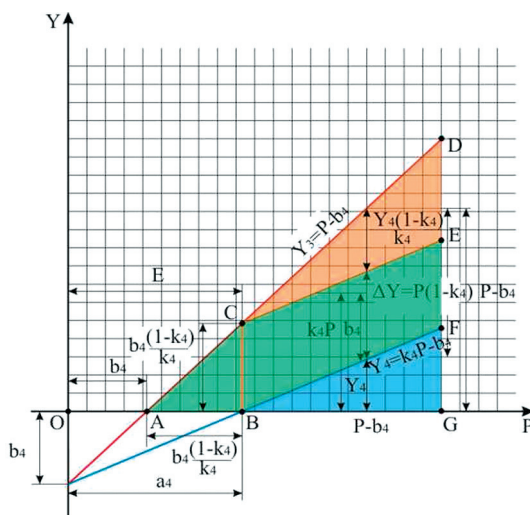


Рис. 2. Графическое изображение элементов водного баланса при отрицательном  $b$

При отрицательном  $b_4$  создаются условия для формирования водообразования в виде микроручейковой сети на поверхности водосбора. При этом происходит накопление слоя впитывания в толще почвогрунтов. При положительном  $b_5$  процесс водообразования происходит значительно быстрее, но в отличие от наиболее распространенного в равнинных условиях подвешенного стока возникает другой вид речного стока — подпертый внутриводосборный сток.

Необходимо отметить, что параметр  $b$  отражает генетический вид склонового стока и никак не влияет на форму графика связи «сток—осадки».

Говоря о линейной связи стока с осадками, автор работы [5] также считает такую зависимость линейной.

Коль скоро необходимо оперировать корреляционной зависимостью, возникает вопрос о качестве корреляционной связи: не всегда эта связь оказывается удовлетворительной по тесноте расположения точек на графике. Иными словами, речь идет о значимости коэффициента корреляции. В работе [2] показано, что практически всегда значимая корреляционная зависимость может быть получена при использовании равнообеспеченных величин переменных.

### **Б. Уравнение прямой линии как разновидность уравнения водного баланса.**

Отправной точкой для установления подобия двух уравнений — уравнения прямой и уравнения водного баланса — послужил вид этих двух уравнений [4]. Уравнение, связывающее сток  $Y$  и атмосферные осадки  $P$ :

$$Y_3 = P - b_4, \quad (1)$$

которое идентично уравнению водного баланса вида

$$Y = P - E, \quad (2)$$

где  $E$  — суммарное испарение с поверхности водосбора.

Оба уравнения, отражая водный баланс, являются уравнениями прямой.

Но недостатком водного баланса, выраженным прямыми (1) и (2), является недоучет некоторых видов потерь. Показать это можно, используя известное в гидрологии понятие стокообразующих атмосферных осадков  $P_{ст}$ . Стокообразующие осадки — это осадки, выпадающие с момента начала стока. Говоря об уравнении прямой (1) с коэффициентом регрессии  $k$ , равным 1, нужно сказать, что оно отражает, скорее, идеальные условия водного баланса, чем реальные. Это утверждение об идеальных условиях водного баланса следует из того, что сток не может быть равен выпадающим на водосбор атмосферным осадкам  $P_{ст}$ . А при  $k = 1$  имеет место равенство  $Y = P_{ст}$ . Поэтому реальный сток с водосбора и реальный водный баланс отражается уравнением с  $k \leq 1$  [4]:

$$Y_4 = k_4 P \pm b. \quad (3)$$

Знак перед свободным членом  $b$  является показателем, отражающим генетический вид стока. В варианте (3), если под  $b$  иметь в виду  $b_4$ , то знак при  $b_4$  всегда отрицательный, а при  $b_5$  — всегда положительный. Параметр  $b$  со своим знаком и соответствующий генетический вид стока рассмотрен ниже.

Как известно, речной сток с водосбора подразделяется на склоновый и русловой. Поскольку основную долю в стоке составляет склоновый сток, рассмотрим виды склонового стока.

Согласно генетической теории стока [1], разнообразные сочетания природных условий (климатических, геоморфологических, почвенных, геологических) создают

достаточно большое качественное различие видов паводочного стока. В свою очередь, серии паводочного стока создают значительную часть годового стока.

**Подвешенный поверхностный сток** является одним из них. Этот вид стока возникает за счет превышения интенсивности осадков над интенсивностью впитывания. Процесс образуется из первоначального накопления слоя впитывания в почву, когда интенсивность впитывания превышает интенсивность атмосферных осадков. С накоплением влаги в почве, снижением интенсивности впитывания и определенной интенсивности дождя происходит образование влаги на поверхности земли, формируется процесс водообразования, с накоплением которого появляется поверхностный сток. В результате образования предельной полевой влагоемкости в почве и продолжающегося дождя образованный поверхностный сток не имеет контакта с грунтовыми водами, а поэтому называется подвешенным.

**Почвенный сток равнин.** Этот вид стока образуется за счет более высокой проницаемости почв по сравнению с материнской породой.

**Подпертый поверхностный сток подтопленных низменностей.** Образуется за счет неглубокого залегания грунтовых вод, поднимающихся до поверхности при обильных осадках.

**Подпертый почвенный сток равнин.** Возникает при подтоплении почвенных горизонтов грунтовыми водами. Этот вид стока связан с подпертым поверхностным стоком.

**Поверхностно-почвенный сток болотных массивов.** Сток, осуществляемый как поверхностным путем во время паводков, так и почвенным путем во время межени. Не имеет большого веса в общем стоке, поскольку площади болот, как правило, ограничены.

**Контактный сток с горных склонов.** Возникает в рыхлом слое почвогрунтов по контакту с подстилающим водоупором.

**Подпертый поверхностный сток с горных склонов.** Сток, гидравлически связанный с контактными.

### *Результаты исследования и обсуждение*

Указанные виды склонового стока возникают при определенных физических процессах, происходящих на водосборе. С точки зрения генетической теории формирования речного стока [1], рассмотренный ранее вариант с отрицательным  $b_4$  физически отражает подвешенный поверхностный сток, возникающий за счет поверхностного водообразования. Под поверхностным водообразованием понимается избыток интенсивности дождя над интенсивностью поверхностных потерь. Этот вид стока не связан с находящимся глубоко уровнем грунтовых вод. Он как бы подвешен в почвенном слое.

Положительное значение  $b_5$  обязано своим происхождением существующему предварительно перед началом стока зааккумулированному объему воды на водосборе. Этот объем может быть создан как в емкости почвогрунтов, так и в емкости водохранилищ на водосборе. Отсюда и положительное значение  $b_5$ , то есть до начала стока в почве водосбора уже есть некоторый объем воды. В этой связи возможно сочетание подпертого поверхностного стока и подпертого почвенного стока (внутрипочвенного) либо только внутрипочвенного стока. Подпертый почвенный сток осуществляется внутрипочвенным путем за счет сравнительно большого объема воды в почве.

Итак, уравнение (3) в качестве уравнения водного баланса отражает большинство видов склонового стока, характерных для равнинных рек. На основе уравнения (3) разработана линейно-корреляционная модель водного баланса [4].

Используя уравнение прямой линии (3), по модели получены такие элементы водного баланса, как впитывание за период водообразования, поверхностное задержание стока на водосборе, потери стока на спаде половодий и паводков после конца водообразования, слой инфильтрации, слой суммарного испарения, слой испарения с водной поверхности. Кроме этого, при высоком стоянии уровня грунтовых вод модель позволяет определить внутрипочвенный сток.

Покажем основные зависимости линейно-корреляционной модели, по которой могут быть получены перечисленные выше водно-балансовые характеристики. Полностью доказательство и вывод зависимостей приведен в [4].

Параметр уравнения  $b_4$  отражает суммарное впитывание за период водообразования, а также впитывание после конца стока за счет объема воды, оставшейся в замкнутых понижениях, то есть аккумуляцию выпадающих осадков в понижениях до начала и после окончания водообразования.

Коэффициент регрессии  $k_4$  показывает долю атмосферных осадков, идущих на водообразование и сток.

В работе [2] показано, что

$$a_4 = b_4 + b_4 \frac{1 - k_4}{k_4} = E$$

представляет суммарное испарение, а

$$Y_4 \frac{1 - k_4}{k_4} = U$$

слой инфильтрации.

Если следовать уравнению водного баланса в составе [4]

$$P = Y + E + U,$$

то интересен будет вопрос о том, получен ли будет баланс из параметров линейно-корреляционной модели.

В уравнении (12)  $E$  — суммарное испарение с речного бассейна за вычетом конденсации;  $U$  — слой инфильтрации в подземные воды;  $Y$  — слой речного среднегодового стока.

Итак,

$$\begin{aligned} P &= Y_4 + b_4 + b_4 \frac{1 - k_4}{k_4} + Y_4 \frac{1 - k_4}{k_4} = \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 (1 - k_4) + Y_4 (1 - k_4)}{k_4} = \\ &= \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 (1 - k_4) + Y_4 (1 - k_4)}{k_4} = \frac{Y_4 k_4 + b_4 k_4 + b_4 - b_4 k_4 + Y_4 - Y_4 k_4}{k_4} = \\ &= \frac{b_4 + Y_4}{k_4} = \frac{b_4 + k_4 P - b_4}{k_4} = P. \end{aligned}$$



В результате нами получено тождество.

Рассмотрим зависимости для водно-балансовых параметров, полученных по линейно-корреляционной модели при положительном  $b_5$ .

Само значение  $b_5$  не меняет физического смысла, поскольку не имеет значения, когда заполнены почвогрунты: до начала водообразования или в процессе водообразования. Это накопленные слои впитывания за период водообразования и слои впитывания после конца стока за счет объемов воды, оставшихся в замкнутых понижениях.

Суммарное испарение также не меняет структуры своего математического выражения и равно

$$a_5 = E = \frac{Y_5}{k_5} - P = \frac{Y_5 - k_5 P}{k_5} = \frac{b_5}{k_5} = b_5 + b_5 \frac{1 - k_5}{k_5}.$$

Проверим соответствие указанных балансовых составляющих слою атмосферных осадков.

Единственный параметр, которого коснулось изменение, — это слой инфильтрации. Выражение получило следующий вид:

$$P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} = U - \text{инфильтрация.}$$

Проверим соответствие указанных балансовых составляющих слою атмосферных осадков:

$$\begin{aligned} P &= Y_5 + b_5 + b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} + \left[ P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k} \right] = Y_5 + b_5 + b_5 \frac{1 - k_5}{k_5} + P(1 - k_5) - b_5 \frac{1 + k_5}{k_5} = \\ &= b_5 + b_5 \left( \frac{1 - k_5}{k_5} - \frac{1 + k_5}{k_5} \right) + P - k_5 P = Y_5 + b_5 - 2b_5 + P - k_5 P = \\ &= Y_5 - b_5 + P - k_5 P = Y_5 - Y_5 + P. \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили тождество.

### ***Заключение***

Итак, рассмотрено уравнение прямой (3) и зависимости для водно-балансовых параметров, выведенных на основе линейно-корреляционной модели и уравнения (3).

Как и следует из теории стока, суммарное впитывание в почву  $b_4$  определяет процессы суммарного испарения и стока. Кроме этого, изменение коэффициента регрессии  $k_4$  отражает нарастание слоя инфильтрации при уменьшении  $k_4$  или снижение слоя инфильтрации при увеличении  $k_4$ .

Измененное математическое выражение для слоя инфильтрации при  $b_5$  по сравнению с выражением при  $b_4$  физически оправдано. Различие в математических выражениях вызвано тем, что при высоком стоянии уровня грунтовых вод процесс инфильтрации существенно отличен от процесса при глубоком залегании грунтовых вод.



Зависимости получены для ряда видов склонового стока, что объединяет идею линейно-корреляционной модели с генетическими видами стока. Важным в полученных зависимостях является охват не только подвешенного склонового стока, характерного для отрицательного значения  $b_4$ , но и подпертого поверхностного и подпертого почвенного стоков. Последние виды стока отражаются в положительном значении  $b_5$ .

Отмеченные зависимости для воднобалансовых элементов, совместно с математическим выражением для внутрипочвенного стока, получены впервые и адекватно отражают физические процессы, происходящие на водосборе.

### Литература

1. *Бефани А.Н.* Вопросы региональной гидрологии: Паводочный сток. — К.: УМК ВО, 1989. — 132 с.
2. *Великанов М.А.* Водный баланс суши. — М.: Гидрометеиздат, 1940. — 140 с.
3. *Великанов М.А.* Ошибки измерения и эмпирические зависимости. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 303 с.
4. *Иофин З.К.* Новый подход к определению составляющих водного баланса // Труды VI Всесоюз. гидрологич. съезда, секц. 3, ч. I. — Л.: Гидрометеиздат, 2008, с. 62–67.
5. *Исмайлов Г.Х., Федоров В.М.* Исследование водного баланса речных бассейнов: основные проблемы и возможные решения // Труды VI Всесоюз. гидрологич. съезда, секц. 3, ч. I. — Л.: Гидрометеиздат, 2008, с. 53–57.
6. *Оппоков Е.В.* Осадки, сток и испарение в бассейне Днепра выше Киева (по новейшим данным) // Исследование рек СССР, 1935, вып. 7, с. 38–54.