

диагностика процесса подпора и его прогноз необходимы при проектировании сооружений и в процессе режимных наблюдений в период наполнения водохранилища.

1. **Жабин В. Ф., Карпенко Н. П., Ломакин И. М.** Формирование гетерогенной среды и регулирование режима грунтовых вод в задачах природообустройства: монография. – М.: МГУП, 2013. – 208 с.

2. **Шестаков В. М.** Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. – М.: МГУ, 1965. – 233 с.

3. **Шестаков В. М., Невечера И. К.,**

**Авилина И. В.** Методика оценки ресурсов подземных вод на участках береговых водозаборов. – М.: МГУ, 2009. – 192 с.

Материал поступил в редакцию 11.11.2014.

**Карпенко Нина Петровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока»  
E-mail: prkkaarpenko@yandex.ru

**Ломакин Иван Михайлович**, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока»

**Жабин Виктор Федорович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

УДК 502/504:532.546

**ИОФИН З. К.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный технический университет», г. Вологда

## **ВОДНОБАЛАНСОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОСБОРОВ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДА ( НА ПРИМЕРЕ РЕК ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*В статье выполнена оценка основных членов уравнения водного баланса – суммарного испарения и инфильтрации – для условий Вологодской области. Работа выполнена с помощью линейно-корреляционной модели впервые для оценки слоя инфильтрации в грунтовые воды для исследуемой территории. Отмечается, что в линейно-корреляционной модели на первый план выступает правомерность использования линейной зависимости речного стока от атмосферных осадков и физическая обоснованность модели с точки зрения существующих гидрологических закономерностей на основе генетической теории стока. Это обстоятельство является привлекательным для практического использования линейно-корреляционной модели. В результате исследований установлено, что значения слоев суммарного испарения, вычисленные по линейно-корреляционной модели, оказались меньше примерно в 1,5 раза. Это обстоятельство объясняется включением в суммарное испарение слоя инфильтрации. Максимальные величины суммарного испарения достигали значений 333 мм (р. Сухона – г. Тотьма), 296 мм (р. Сухона – д. Рабаньга). При таких значениях слоев испарения слою инфильтрации минимальны и составили 37 и 14 мм.*

*Уравнение водного баланса, суммарное испарение, инфильтрация в грунтовые воды, линейно-корреляционная модель.*

*In the article assessment of main members of the water balance equation is fulfilled – total evaporation and infiltration – for the conditions of the Vologda region. The work is fulfilled by means of a linear-correlation model for the first time for assessment of the infiltration layer into ground water for the investigated area. It is stated that in the linear-correlation model the legality of usage of linear dependence of the river flow from atmospheric precipitation is brought into the foreground as well as physical substantiality of the model from the point of view of existing hydrological regularities on the basis of the genetic theory of runoff. This circumstance is attractive for the practical usage of the linear-correlation model. As a result of researches it is established that the values of the total evaporation layers calculated according to the linear-correlation model were less by approximately 1,5 times. This circumstance is explained by inclusion of the infiltration layer into the total evaporation. Maximal values of the total evaporation reached the values 333 mm (r. Sukhona – town Totjma), 296 mm (r. Sukhona – v. Rabanjga). With these values of evaporation layers infiltration layers are minimal and were 37 and 14 mm.*

*Equation of water balance, total evaporation, infiltraton into ground water, linear-correlation model.*

Целью данной работы является демонстрация возможностей нового метода водного баланса – линейно-корреляционной модели. Возможности нового метода достаточно широки: он позволяет определять до 8 параметров уравнения водного баланса. Поэтому представляется интересным практическое применение линейно-корреляционной модели водного баланса (ЛКМ).

При использовании ЛКМ на первый план 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. Эти положения правомерности рассмотрены и обоснованы в работе [3].

Сущность ЛКМ заключается в определении потерь атмосферных осадков при трансформации их в речной сток и потерь самого речного стока в процессе его формирования. Коль скоро такие потери генетически заключены в процессе формирования речного стока при выпадении атмосферных осадков на водосбор, то, используя график зависимости речного стока от атмосферных осадков, определены следующие виды потерь, обоснованные в генетической теории стока. К ним относятся: суммарный слой впитывания за период водообразования  $R_T$ ; слой впитывания за период спада стока после конца водообразования  $R_r$ ; слой впитывания после конца стока за счет объемов воды, оставшихся в замкнутых понижениях  $R_0$ . Эти три вида впитывания составляют слой суммарного испарения  $E$ .

Значения слоев впитывания и соответственно испарения составляют потери атмосферных осадков. Что же касается потерь стока, то они возникают в процессе его формирования. Согласно генетической теории стока [1] на инфильтрацию затрачиваются потери стока [3].

Как оказалось, точность оценки параметров водного баланса по существующему трехчленному уравнению водного баланса (атмосферные осадки, речной сток, суммарное испарение) зависит от слоя инфильтрации.

Система организации наблюдений и измерений как за суммарным испарением, так и инфильтрацией достаточно объ-

емная. Возможно эти параметры потому и не измеряются на гидрометрической сети, что представляют определенные сложности проведения наблюдений. Отсутствие качественных методик для определения рассмотренных параметров ставят исследователей водного баланса в сложное положение.

Как известно, уравнение водного баланса для многолетнего периода, предложенное М. А. Великановым [2], имеет вид:

$$P = Y + E + U \pm d, \quad (1)$$

где  $P$  – слой атмосферных осадков, выпадающих на водосбор, мм;  $Y$  – слой речного стока, мм;  $U$  – слой инфильтрации в подземные воды, мм;  $d$  – слой водообмена между соседними бассейнами подземным путем.

Инфильтрация  $U$  и водообмен  $d$  не могут быть определены и использованы в уравнении (1). На практике эти параметры не принимаются во внимание и уравнение (1) превращается в трехчленное (атмосферные осадки, речной сток и суммарное испарение).

Это сказывается на точности вычислений. По данным [4] ошибка, например, вычисления суммарного испарения составляет до 90 %. Такой результат не может считаться приемлемым. Тем не менее, трехчленное уравнение используется на протяжении многих десятилетий, принося в результаты вычислений огромные ошибки, которые в свою очередь влекут дополнительные капиталовложения при водохозяйственном строительстве.

В этом смысле ЛКМ аналитически, без проведения дополнительных изыскательских работ, позволяет выполнять оценки речного стока, инфильтрации, суммарного испарения с точностью, не превышающей точность измерения самой исследуемой величины. Это обстоятельство является привлекательным для практического использования ЛКМ.

В качестве материалов в статье использовались экспериментальные данные наблюдений на стоковых станциях России: Валдайского филиала ГГИ, Нижнедевицкой, Подмосковной, Приморской.

В работе использовался метод сравнения, когда вычисленные водно-балансовые величины сравниваются по абсолютной величине с экспериментальными данными. При этом для

вычисления водно-балансовых параметров используется метод ЛКМ.

Сущность ЛКМ состоит в том, что величина речного стока отличается от величины атмосферных осадков, выпадающих на водосбор, величиной потерь. На этом свойстве основывается ЛКМ. Если обратиться к графическому изображению зависимости речного стока от атмосферных осадков, можно выделить на нем генетические составляющие водного баланса (рис. 1).

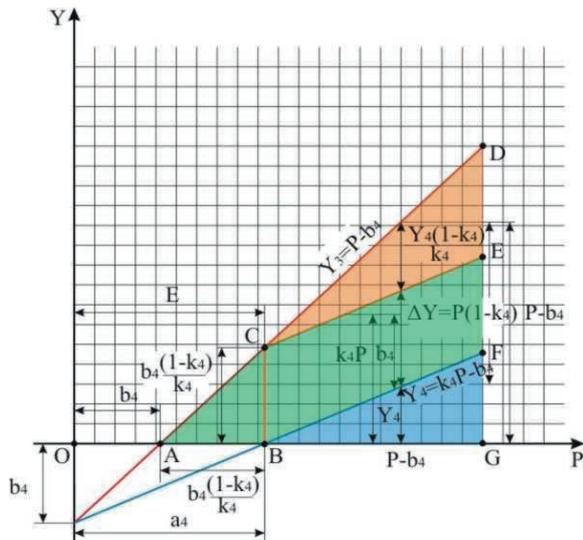


Рис. 1. Графическое изображение элементов водного баланса при отрицательном « $b$ »

Перечень параметров и зависимостей, входящих в ЛКМ, включает:

1.  $b_4$  — свободный член уравнения прямой с физической точки зрения учитывает слой впитывания в почву в процессе водообразования  $R_T$  и слой впитывания после конца стока за счет объема воды, оставшейся в замкнутых понижениях (слой поверхностного задержания)  $R_0$ ;

2.  $k_4$  — коэффициент регрессии или угловой коэффициент зависимости слоя стока от слоя атмосферных осадков, показывает, какая доля атмосферных осадков переходит в сток;

3.  $E = b_4 + b_4(1 - k_4)/k_4 = b_4/k_4$  — суммарное испарение, формирующееся под влиянием параметров  $b_4$  и  $k_4$ , т. е.  $b_4$  отражает накопление влаги в почве до момента полного ее насыщения; это потери атмосферных осадков  $P$  при трансформации их в сток; величина  $k_4$  — слой стекающей воды от выпадающих осадков, является

показателем потерь стока;

4.  $U = Y_4(1 - k_4)/k_4$  — слой инфильтрации в грунтовые воды представляет собой потери стока  $Y_4$  в процессе его формирования;

5.  $E_{\text{вп}} = E_c + k_e Y_4$  — слой испарения с водной поверхности.

6. Параметр  $d$  уравнения (1) — водообмен рассматриваемого бассейна с соседним; в условиях выраженного водораздела поверхностного стока  $d$  отражает водообмен преимущественно подземным путем; так как в данной работе не рассматривается проблема водообмена и дополнительной инфильтрации  $d$  в уравнении (1) опущен.

Часть параметров, не имеющих отношения к содержанию данной статьи и входящих в состав ЛКМ, здесь не показана. Индекс  $y$  параметров означает порядковый номер рассмотренных корреляционных уравнений при выводе параметров ЛКМ. По приведенным зависимостям впервые выполнены вычисления воднобалансовых параметров для рек Вологодской области. Результаты вычисления водно-балансовых параметров для рек бассейна р. Северной Двины Вологодской области приведены в таблице.

Максимальные величины суммарного испарения достигают значений 333 мм (р. Сухона — г. Тотьма), 296 мм (р. Сухона — д. Рабаньга). При таких значениях слоев испарения слой инфильтрации минимальны и составляют 37 и 14 мм, соответственно, максимальные значения инфильтрации могут быть 296 мм (р. Святиевка — д. Горбицево). Взаимосвязь слоя суммарного испарения со слоем инфильтрации обратно пропорциональная: с увеличением слоя испарения уменьшается слой инфильтрации и наоборот. Корреляционная связь слоя суммарного испарения со слоем инфильтрации приведена на рис. 2.

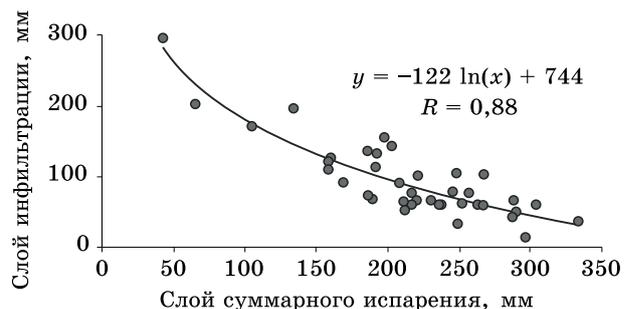


Рис. 2. Зависимость слоя инфильтрации от слоя испарения

Воднобалансовые параметры, полученные по ЛКМ для рек Вологодской области

| Река – пункт             | Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup> | Кол-во лет в использованном периоде наблюдений | Уравнение зависимости речного стока от атмосферных осадков | Коэффициент корреляции, $R_n$ | Осадки $P$ , мм | Сток $Y$ , мм | Суммарное испарение $E$ , мм | Инфильтрация $U$ , мм |
|--------------------------|---|--|--|-------------------------------|-----------------|---------------|------------------------------|-----------------------|
| Сухона – Рабаньга        | 15550                                   | 132  | $y = 0,95x - 282$  | 0,97                          | 570             | 264           | 296                          | 14                    |
| Сухона – Тотьма          | 34800                                   | 133  | $y = 0,88x - 293$  | 0,96                          | 635             | 269           | 333                          | 37                    |
| Сухона – Каликино        | 49200                                   | 69   | $y = 0,81x - 201$  | 0,98                          | 587             | 275           | 105                          | 172                   |
| Уфтюга – Маланьевская    | 618                                     | 34   | $y = 0,82x - 152$  | 0,94                          | 589             | 333           | 185                          | 73                    |
| Уфтюга – Богородское     | 768                                     | 30   | $y = 0,83x - 175$  | 0,95                          | 589             | 316           | 211                          | 65                    |
| Кубена – Троице-Еналское | 1110                                    | 73   | $y = 0,89x - 171$  | 0,98                          | 595             | 300           | 208                          | 90                    |
| Кубена – Кубенская       | 4860                                    | 56   | $y = 0,82x - 146$  | 0,97                          | 587             | 293           | 236                          | 60                    |
| Сямжена – Сямжа          | 1700                                    | 46   | $y = 0,68x - 135$  | 0,98                          | 610             | 256           | 248                          | 105                   |
| Сить – Козлиха           | 1540                                    | 46   | $y = 0,82x - 181$  | 0,95                          | 589             | 306           | 220                          | 67                    |
| Вологда – Мягрино        | 1270                                    | 23   | $y = 0,84x - 178$  | 0,97                          | 536             | 273           | 212                          | 52                    |
| Вологда – Макарово       | 636                                     | 23   | $y = 0,6x - 112$   | 0,93                          | 522             | 206           | 186                          | 137                   |
| Масляная – Семшино       | 246                                     | 39   | $y = 0,99x - 261$  | 0,97                          | 586             | 303           | 249                          | 34                    |
| Ема – Новое              | 179                                     | 64   | $y = 0,92x - 220$  | 0,94                          | 522             | 262           | 169                          | 92                    |
| Тощня – Водогино         | 1020                                    | 28   | $y = 0,99x - 252$  | 0,94                          | 522             | 271           | 189                          | 68                    |
| Б. Ельма – Филогино      | 312                                     | 56   | $y = 0,69x - 109$  | 0,92                          | 510             | 247           | 158                          | 110                   |
| Двиница – Котлакса       | 869                                     | 52   | $y = 0,93x - 232$  | 0,96                          | 692             | 344           | 198                          | 155                   |
| Тиксна – Петрилово       | 234                                     | 33   | $y = 0,77x - 202$  | 0,97                          | 676             | 313           | 304                          | 60                    |
| Толшма – Пузовка         | 1110                                    | 28   | $y = 0,75x - 201$  | 0,97                          | 678             | 308           | 267                          | 103                   |
| Царева – Село            | 1420                                    | 31   | $y = 0,92x - 195$  | 0,96                          | 682             | 350           | 257                          | 77                    |
| Леденга – Юрманга        | 327                                     | 57   | $y = 0,85x - 246$  | 0,96                          | 613             | 279           | 290                          | 49                    |
| Ст. Тотьма – Д. Погост   | 1840                                    | 58   | $y = 0,79x - 194$  | 0,95                          | 608             | 291           | 245                          | 78                    |
| Уфтюга – ур. Колено      | 2360                                    | 32   | $y = 0,83x - 201$  | 0,97                          | 610             | 286           | 266                          | 59                    |
| Стрельна – Анисимово     | 782                                     | 31   | $y = 0,82x - 195$  | 0,98                          | 573             | 275           | 237                          | 60                    |
| В. Ерга – Пихтово        | 274                                     | 50   | $y = 0,84x - 182$  | 0,99                          | 593             | 317           | 217                          | 60                    |
| Ниж. Ерга – д. Загорье   | 550                                     | 79   | $y = 0,80x - 173$  | 0,98                          | 597             | 312           | 217                          | 76                    |
| Юг – Пермас              | 1450                                    | 79   | $y = 0,76x - 174$  | 0,99                          | 590             | 280           | 252                          | 61                    |
| Юг – Кич.Городок         | 8890                                    | 130  | $y = 0,63x - 106$  | 0,99                          | 575             | 267           | 192                          | 114                   |
| Юг – Подосиновец         | 15200                                   | 57   | $y = 0,60x - 111$  | 0,98                          | 573             | 247           | 193                          | 133                   |
| Юг – Гаврино             | 34800                                   | 72   | $y = 0,57x - 76,3$   | 0,99                          | 591             | 258           | 134                          | 197                   |
| Шарженьга – Каликино     | 1480                                    | 63   | $y = 0,82x - 215$  | 0,97                          | 595             | 275           | 160                          | 127                   |
| Кичменьга – Захарово     | 2010                                    | 35   | $y = 0,77x - 176$  | 0,97                          | 596             | 272           | 263                          | 60                    |
| Дорожковка – Дорожково   | 68                                      | 39   | $y = 0,81x - 186$  | 0,98                          | 587             | 283           | 230                          | 67                    |
| Савватиевка – Горбищево  | 35,6                                    | 71   | $y = 0,34x + 17,13$  | 0,97                          | 551             | 202           | 43                           | 296                   |
| Евда – Аксеновская       | 229                                     | 53   | $y = 0,57x - 37,16$  | 0,98                          | 548             | 270           | 65                           | 204                   |
| Вага – Глуборецкая       | 1410                                    | 25   | $y = 0,86x - 247$  | 0,97                          | 603             | 271           | 287                          | 44                    |
| Вага – Филевская         | 13200                                   | 53   | $y = 0,73x - 161$  | 0,98                          | 594             | 274           | 221                          | 101                   |
| Кулой – Хребтовская      | 1740                                    | 34   | $y = 0,80x - 230$  | 0,95                          | 610             | 263           | 288                          | 66                    |
| Вожега – Назаровская     | 1590                                    | 29   | $y = 0,72x - 114$  | 0,94                          | 589             | 314           | 158                          | 122                   |
| Кокшеньга – Моисеевская  | 4410                                    | 49   | $y = 0,65x - 132$  | 0,98                          | 604             | 266           | 203                          | 143                   |

**Заключение**

Значения слоев суммарного испарения, вычисленные по ЛКМ, как и ожидалось, оказались меньше, примерно в 1,5 раза, чем в работе [5]. Это обстоятельство объясняет включение в суммарное испарение слоя инфильтрации [4]. Значения инфильтрации сравнить не с чем из-за отсутствия наблюдений. Инфильтрация получена впервые для данной территории. Насколько велики значения суммарного испарения и инфильтрации, можно увидеть из соотношения этих величин к атмосферным осадкам. Это соотношение суммарных величин испарения и инфильтрации равно  $0,52P$ , что существенно для слоя потерь.

1. **Бэфани А. Н.** Основы теории ливневого стока: Труды Одесского гидрометеорологического института. – Л.: Гидроме-

теоиздат, 1958. – 310 с.

2. **Великанов М. А.** Гидрология суши. – Л.: Гидрометеороиздат, 1948. – 530 с.

3. **Иофин З. К.** Новый подход к определению составляющих водного баланса: Тезисы VI Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеороиздат, 2004. – С. 29–30.

4. **Иофин З. К.** Совершенствование теории формирования элементов водного баланса речных бассейнов. – М.: «Литературное агентство «Университетская книга», 2012. – 196 с.

5. **Водные ресурсы Нечерноземной зоны.** – Л.: Гидрометеороиздат, 1980. – 214 с.

Материал поступил в редакцию 30.03.2015.  
**Иофин Зиновий Константинович,**  
 кандидат географических наук, доцент  
 E-mail: pirit35@yandex.ru  
 Тел. +7 (911) 500-46-46