

Вывод:

1. Так как ширина насыпей, возводимых на биогенных грунтах (торф, сапропель), значительно превышает толщину этих грунтов, поэтому деформации биогенных грунтов происходят без возможности бокового расширения. В связи с этим для расчета применима модель одномерной задачи, что соответствует схеме компрессионного сжатия грунта.

2. Результаты расчетов дают удовлетворительную сходимость расчетных и фактических значений осадки.

3. Сходимость фактических значений осадки с расчетными значениями по органической составляющей выше, чем по формуле без деления на составляющие грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева, Н. В. Компрессионные свойства биогенных грунтов / Н. В. Васильева // Мелиорация переувлажненных земель: сб. науч. тр. Белорус. НИИ мелиорации и луговодства. – Минск, 1997. – Т. 44. – С. 261–265.

2. Черник, П. К. Расчет фазового состава биогенных грунтов / П. К. Черник, Н. В. Васильева // Сб. науч. тр. Белорус. НИИ мелиорации и луговодства. – Минск, 1998. – Т. XXV. – С. 80–88.

3. Васильева, Н. В. Расчет осадки сооружений на биогенных грунтах с учетом их фазового состава / Н. В. Васильева // Весці акад. аграр. навук Респ. Беларусь. – 2001. – № 3. – С. 50–53.

4. Васильева, Н. В. Расчет осадки насыпных сооружений, построенных на биогенных грунтах / Н. В. Васильева // Вестн. БГСХА. – 2021. – № 2. – С. 203–207.

УДК 556.512(476)

ОЦЕНКА НОРМЫ СТОКА МАЛЫХ РЕК БЕЛАРУСИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А. А. ВОЛЧЕК, д-р геогр. наук, профессор
Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

Ключевые слова: река, баланс, сток, норма, водосбор.

Аннотация. Предложена методика для предварительных расчетов годовой нормы стока неизученных рек Беларуси.

Keywords: river, balance, runoff, norm, catchment.

Summary. A technique for preliminary calculations of the annual runoff rate of unexplored rivers of Belarus is proposed.

Для расчета среднего многолетнего стока неизученных рек используется метод водного баланса:

$$\overline{H} = \overline{X} - \overline{E} \pm \Delta \overline{W}, \quad (1)$$

где \overline{H} – средний многолетний слой стока, мм;

\overline{X} – среднемноголетний слой атмосферных осадков, мм;

\overline{E} – средний многолетний слой суммарного испарения, мм;

$\pm \Delta \overline{W}$ – член, характеризующий среднюю многолетнюю инфильтрацию воды в глубокие водоносные горизонты или среднее многолетнее значение недренируемого грунтового стока ($+ \Delta \overline{W}$) либо величину дополнительного питания речного стока подземными водами ($- \Delta \overline{W}$) вследствие их разгрузки в речную сеть.

Вследствие отсутствия методов непосредственного измерения $\pm \Delta \overline{W}$ нет возможности проконтролировать результаты применения балансовых расчетных схем, при этом величина $\pm \Delta \overline{W}$ в большинстве случаев оказывается сопоставимой с погрешностями воднобалансовых расчетов [1, 2]. Это требует анализа погрешностей расчета составляющих водного баланса. Погрешности складываются, с одной стороны, из случайных ошибок измерения самих элементов, вызванных несовершенством измерительных приборов, с другой стороны – несоответствием расчетных схем реальным природным процессам. Следовательно, в уравнении (1) главными являются не случайные ошибки измерения, а систематические ошибки. Систематические ошибки для атмосферных осадков вызваны несовершенством приборов измерения их на сети метеостанций и способами их осреднения по площади бассейна, а для суммарного испарения расчетными схемами определения средней многолетней величины с поверхности бассейна [1, 2].

Для рек, полностью дренирующих грунтовой сток, при отсутствии аномалий среднемноголетний слой стока должен быть равен разности среднемноголетних слоев осадков и испарения. В этом случае близкое соответствие величин норм стока, полученных по уравнению водного баланса и определенных на основании гидрометрических данных, служит критерием правомерности применения воднобалансовой схемы расчета. Отдельные отклонения гидрометрического стока от балансового могут дать представление о влиянии на естественный сток хозяйственной деятельности человека.

Рассмотрим возможный подход к проблеме контроля и минимизации влияния систематических погрешностей определения составляющих водного баланса с помощью регионального обобщения имеющихся гидрометеорологических материалов водосборов Беларуси. Водный баланс рек Беларуси характеризуется следующими средними расчетными величинами: $\bar{X} = 739$ мм, $\bar{E} = 552$ мм, $\bar{H} = 176$ мм, невязка баланса $\Delta \bar{W} = +11$ мм (6,25 % – слоя стока и 1,5 % – слоя атмосферных осадков) [2]. Полученная невязка не выходит за пределы точности воднобалансовых расчетов, что свидетельствует либо о достаточно высокой точности расчетной схемы, либо о случайном сочетании расчетных величин составляющих баланса. Данные отдельных водосборов показывают невязки более значительные и в ряде случаев выходят за допустимы пределы.

Для анализа и построения расчетных зависимостей $\bar{H}_6 = \bar{X} - \bar{E}$ и фактических значений стока $\bar{H}_ф$ по измерениям на сети гидрологических постов использован регрессионный аппарат [3]. При этом в связи с неоднородность формирования водного режима рек 17 водосборов [2] были исключены, а по оставшимся 52 получено уравнение регрессии:

$$H = 1,001 \cdot H_6 - 6,13. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $r = 0,83$, ошибки уравнения $S_H = \pm 17,6$ мм и критерии Фишера $F = 111 > F_{кр(50, 49, 5\%)} = 2,5$.

Уравнение (2) «снимает» систематическую погрешность определения балансовой разницы $(\bar{X} - \bar{E})$, если в пределах рассматриваемой территории при фиксированном наборе водосборов взаимно компенсируется величина $\pm \Delta \bar{W}$. Балансовая разница $(\bar{X} - \bar{E}) = 187$ мм, определенная по зависимости (2) величина $H = 181$ мм, фактический сток – 176 мм. Следовательно, разница между вычисленным по уравнению (2) и фактическим стоком составляет всего 5 мм (2,8 %), что находится в пределах точности определения среднесезонного значения по фактическому ряду. Если $\pm \Delta \bar{W}$ не скомпенсировано в пределах заданной территории, то при малом числе точек в параметрах уравнения регрессии типа (2) может проявиться некоторая составляющая, которая отражает влияние осредненной по фиксированному набору бассейнов величины водообмена.

Анализ 17 исключенных водосборов при определенной сортировке позволил получить следующее уравнение регрессии:

$$H = 1,02 \cdot H_6 - 86,2, \\ (r = 0,96, S_H = \pm 26,4 \text{ мм}, F = 78 > F_{\text{кр}(7, 6, 5\%)} = 3,87). \quad (3)$$

Полученное уравнение регрессии свидетельствует о наличии инфильтрации воды в глубокие водоносные горизонты.

Анализ 9 исключенных водосборов при определенной сортировке позволил получить следующее уравнение регрессии:

$$H = 0,81 \cdot H_6 + 94,0, \\ (r = 0,97, S_H = \pm 19,4 \text{ мм}, F = 40,4 > F_{\text{кр}(3, 2, 5\%)} = 19,7). \quad (4)$$

Полученное уравнение регрессии свидетельствует о наличии дополнительного питания речного стока подземными водами вследствие их разгрузки в речную сеть на этих водосборах.

Разброс точек относительно уравнения (2) складывается из погрешностей определения атмосферных осадков, расчета суммарного испарения и ошибок определения норм стока по гидрометрическим данным. Если отнести все случайные флуктуации стока по уравнению (2) только за счет атмосферных осадков, можно дать оценку погрешности использованной схемы расчета осадков. Коэффициент корреляции между осадками и испарением ($r_{XE} = 0,02$). Средняя величина атмосферных осадков с двумя поправками $\bar{X} = 739$ мм и суммарного испарения $\bar{E} = 552$ мм. Примем частную производную, равной $\partial E / \partial X = 0,3$, как для Нечерноземной зоны России [4]. Величина погрешности суммарного испарения $\delta_E = \frac{\partial E}{\partial X} \cdot \delta X = 0,3 \cdot \delta X$ и погрешности балансовой разности $H_6 = \bar{X} - \bar{E}$

$$\delta_{X-E} = \sqrt{\delta_X^2 - 2 \cdot r_{XE} \cdot \delta_X \cdot \delta_E + \delta_E^2} \cong 1,0004 \cdot \delta_X. \quad (5)$$

Погрешность определения стока по уравнению (4) можно записать как

$$\delta_H = \frac{\partial H}{\partial (X - E)} \cdot \delta_{X-E} = 1,001 \cdot \delta_{X-E} \cong 1,00 \cdot \delta_X = \pm 17,6 \text{ мм}. \quad (6)$$

Отсюда $|\delta_X| < 17,6$ мм.

Погрешность для уравнения (4) рассчитаем при следующих условиях: атмосферных осадков с двумя поправками $\bar{X} = 769$ мм и суммарное испарения $\bar{E} = 542$ мм, $r_{XE} = 0,12$, частная производная равна $\partial E/\partial X = 0,3$. Величина погрешности суммарного испарения $\delta_E = 0,3 \cdot \delta X$ и погрешности балансовой разности

$$H_{\bar{o}} = \bar{X} - \bar{E} - \delta_{X-E} = \sqrt{\delta_X^2 - 2 \cdot 0,12 \cdot 0,3 \cdot \delta_X^2 + 0,09 \cdot \delta_X^2} \cong 1,009 \cdot \delta_X.$$

Погрешность определения стока по уравнению (4) можно записать как $\delta_H \cong 1,05 \cdot \delta_X = \pm 26,4$ мм. Отсюда $|\delta_X| < 25,1$ мм.

Погрешность для уравнения (4) определяется для условий: атмосферных осадков с двумя поправками $\bar{X} = 707$ мм и суммарного испарения $\bar{E} = 560$ мм, коэффициент корреляции между осадками и испарением ($r_{XE} = -0,45$), $\partial E/\partial X = 0,3$. Величина погрешности суммарного испарения $\delta_E = 0,3 \cdot \delta X$ и погрешности балансовой разности

$$H_{\bar{o}} = \bar{X} - \bar{E} - \delta_{X-E} = \sqrt{\delta_X^2 + 2 \cdot 0,45 \cdot 0,3 \cdot \delta_X^2 + 0,09 \cdot \delta_X^2} \cong 1,17 \cdot \delta_X.$$

Погрешность определения стока по уравнению (4) можно записать как $\delta_H \cong 0,95 \cdot \delta_X = \pm 19,4$ мм. Отсюда $|\delta_X| < 20,4$ мм.

При правильном определении составляющих водного баланса и незначительности систематических ошибок должно соблюдаться равенство $H_{\Phi} \approx H_{\bar{o}}$. В нашем случае только уравнение (2) с определенными допущениями соответствует рассматриваемому условию. Величину свободного члена, равную 6,13 мм, можно рассматривать как стокообразующий порог, т. е. та минимальная разница, между осадками и испарением, при которой образуется сток. Линия регрессии уравнения (4) расположена значительно ниже уравнения (2), но проходит почти параллельно. Это свидетельствует о наличии значительных потерь (86,2 мм) при формировании речного стока или существенным завышении атмосферных осадков. Значительное завышение атмосферных осадков мало вероятно, более вероятны локальные особенности формирования речного стока. Линия регрессии уравнения (4) расположено значительно выше двух других линий регрессий. Кроме того, имеет значительный уклон. Это свидетельствует о наличии значительной добавки (94,0 мм) за счет грунтовой подпитки или перетока между водосборами при формировании речного стока или существенном занижении атмосферных осадков. Как и в первом случае, занижение ат-

атмосферных осадков мало вероятно, здесь также проявляются локальные особенности формирования речного стока.

Приведенные данные иллюстрируют факт неизбежной локальности закономерности $\bar{H} = f(\bar{X} - \bar{E})$. Размеры территории, для которых возможно построение таких зависимостей, определяются конкретным характером распределения суммарного испарения и атмосферных осадков, а также требуемой точностью выводов.

В любом случае построение уравнений $\bar{H} = f(\bar{X} - \bar{E})$ дает большие возможности для решения ряда задач региональной гидрологии, в том числе уточнение карт среднего многолетнего стока по метеоданным, выявление местных аномалий в формировании среднего стока.

Если удастся «подогнать» модель к набору рек, дренирующих грунтовой сток, то на графиках $\bar{H} = f(\bar{X} - \bar{E})$ выявятся реки, не дренирующие грунтовой сток. Если модель подогнана к стоку рек неизменным влиянием хозяйственной деятельности, то должны проявиться реки с искаженным средним стоком. Представляется, что такой подход вполне возможен для выявления сильного воздействия хозяйственной деятельности на потенциальные водные ресурсы, характеристикой которых является годовой сток.

Общий вид уравнений (2)–(4):

$$H_p = K_i \cdot (\alpha \cdot H_6 \pm \Delta W), \quad (R = 0,42, F = 5,35), \quad (7)$$

где H_p – расчетный слой речного стока, мм;

K_i – поправочный коэффициент, учитывающий особенности подстилающей поверхности;

α – эмпирический коэффициент.

Поправочный коэффициент (K_i) определяется в зависимости от расчетной формулы и имеет вид:

– для уравнения (2), расчет в нормальных условиях:

$$K_1 = 1,054 - 0,000328 \cdot \lambda - 0,00285 \cdot (A_{\text{общ. забол.}} + 1), \quad (8)$$

где λ – абсцисса центра тяжести водосбора в условной прямоугольной системе, координата с центром в г. Минске, км;

$A_{\text{общ. забол.}}$ – общая за болоченность водосбора, %;

– для уравнения (3), расчет в зоне питания подземных вод:

$$K_2 = 1,231 \cdot \frac{(J_{\text{рек}} + 1)^{0,108}}{(J_{\text{вод}} + 1)^{0,093} \cdot (A_{\text{оз}} + 1)^{0,131}}, \quad (R = 0,86, F = 4,61), \quad (9)$$

где $J_{\text{рек}}$ – уклон реки, ‰;

$J_{\text{вод}}$ – уклон водосбора, ‰;

$A_{\text{оз}}$ – площадь водосбора, занятая озерами, %;

– для уравнения (4), расчет в зоне разгрузки грунтовых вод:

$$K_3 = 0,851 + 0,000118 \cdot A + 0,005269 \cdot A_{\text{сух. лес}}, \quad (R=0,98, F=27,6), \quad (10)$$

где A – площадь водосбора, км²;

$A_{\text{сух. лес}}$ – площадь водосбора, занятая сухим лесом, %.

Проверка модели (7) показала хорошую сходимость наблюдаемых и рассчитанных данных.

Для предварительных расчетов годовой нормы стока неизученных рек Беларуси нами разработана следующая полуэмпирическая модель:

$$H_p = 7,73 \cdot \frac{(X - E)^{0,31} \cdot V^{0,21} \cdot (\varphi + 300)^{0,23}}{(A_{\text{общ. забол}} + 1)^{0,04}}, \quad (R = 0,70, F = 15,2), \quad (10)$$

где V – скорость ветра, м/с;

φ – ордината центра тяжести водосбора в условной прямоугольной системе координат с центром в г. Минске, км;

$A_{\text{общ. забол}}$ – общая заболоченность водосбора, %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстигнеев, В. М. Применение метода водного баланса в региональных обобщениях данных по среднемноголетнему стоку рек / В. М. Евстигнеев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1983. – № 3. – С. 73–79.
2. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.
3. Статистические методы в природопользовании: учеб. пособие / В. Е. Валуев [и др.]. – Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
4. Евстигнеев, В. М. О погрешностях определения составляющих водного баланса речных бассейнов Нечерноземья / В. М. Евстигнеев, К. Ф. Ретеюм, Л. П. Чуткина // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1986. – С. 71–75.