

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОГО СТОКА ВОДЫ РЕК БЕЛАРУСИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.А. Волчек, О.И. Грядунова

Введение

На территории Беларуси имеется свыше 20,8 тыс. рек, и только 0,5 % из них входят в систему государственного мониторинга по водному кадастру Республики Беларусь (табл. 1). Поэтому при проектировании водохозяйственных объектов, как правило, приходится иметь дело с реками неохваченными систематическими наблюдениями. В этом случае прибегают к косвенным методам определения гидрологических характеристик рек.

Таблица 1 – Распределение пунктов наблюдений в зависимости от площади водосбора и продолжительности наблюдений

Продолжительность наблюдений, годы	Площадь водосбора, км ²						всего
	до 500	501–1000	1001–5000	5001–10000	10001–20000	более 20000	
до 20	6	1	8	1	4	3	23
21–30	14	2	5	-	2	-	23
31–40	6	-	4	2	-	1	13
41–50	8	6	7	-	-	2	23
более 51	4	3	11	4	5	15	42
Итого	38	12	35	7	11	21	124

Наиболее густо гидрометрическая сеть размещена в речных бассейнах с площадью водосборов до 5000 км², в среднем по республике один пост приходится на 1674 км². Неравномерно распределены гидрометрические посты и по бассейнам главных рек Беларуси (табл. 2), минимальная площадь на один пост приходится в бассейне р. Западный Буг, максимальная – р. Неман.

Таблица 2 – Распределение пунктов наблюдений в пределах водосборов главных рек Беларуси

Бассейн	Площадь бассейна в пределах Республики Беларусь, км ²	Количество постов	Площадь, приходящаяся на один пост, км ²
Западная Двина	33200	18	1844,0
Неман	46000	24	1916,7
Западный Буг	10400	11	945,5
Днепр	63700	36	1769,4
Припять	52700	35	1505,7

Состояние вопроса

Рекомендуемые в настоящее время методы расчета минимального стока неизученных рек не всегда позволяют получить результаты требуемой точности. Особенно это касается

малых рек, которые, как правило, обладают своеобразными физико-географическими условиями и могут сильно отличаться от зональных. В таблице 3 представлены методы расчета минимального стока рек при отсутствии данных наблюдений.

Таблица 3 – Модели расчета минимальных расходов воды при отсутствии данных наблюдений

Автор	Год	Модель
М.Э. Шевелев [1]	1937	$q_{\min} = \alpha \cdot A^n \cdot q_{\text{год}}^m$
Н.Д. Антонов [2]	1941	$q_{\min} = q_{\text{год}}(\alpha \cdot A^n - b)$
А.М. Сотченко [3]	1947	$q_{\min} = \alpha(q_{\text{год}} - 0,2) \cdot d^n$
Б.В. Поляков [4]	1947	Модульный коэффициент $K = \frac{q_{\min}}{q_{\text{год}}}$
Д.А. Данович [5]	1950	$q = a + 0,51 \cdot \lg A$
А.М. Норватов [6, 7]	1950, 1956	$q = f(A)$
Н.П. Чеботарев [8]	1954	$Q_{\min} = B \cdot \bar{Q}_{\text{год}}^m \cdot A^r - \frac{P_1}{A^n}$
К.А. Ключева [9]	1961	$q_{\min}^{\text{л-о}} = b \cdot \lg A \pm a; q_{\min}^3 = b \cdot \lg A \pm a$
А.М. Владимиров [10]	1966	$Q_{\min} = a \cdot A^n; Q_{\min} = a \cdot A^n + b; Q_{\min} = a \cdot (A + c)^n$
К.А. Лысенко [11]	1966	$q = f(\Delta H)$
«Указания...» [12]	1966	$\bar{Q}_{\min} = a(A + c)^n$
А.Г. Курдов [13]	1968	$Q_{\min} = B_0(A - A_0)^n$
Р.Г. Задорожная [14]	1975	$q = f(\Delta H)$
В.М. Евстигнеев, А.В. Христофоров [15]	1983	$q_{\text{год}} = \alpha H_{\text{ср}} + B$
Пособие к СНИП [16]	1999	$Q_{95\%} = q_{\text{л}} \cdot 10^{-3} \cdot (A - A_{1\text{кр}})^{1,07};$ $Q_{95\%} = q_{\text{з}} \cdot 10^{-4} \cdot (A - A_{1\text{кр}})^n$

Примечание: Q_{\min} – расход воды минимального стока, $\text{м}^3/\text{с}$; $q_{\text{год}}$ – среднегодовой модуль стока, $\text{л}/\text{с км}^2$; q_{\min} – минимальный модуль стока, $\text{л}/\text{с км}^2$; q_{\min}^3 – модуль зимнего минимального стока, $\text{л}/\text{с км}^2$; $q_{\min}^{\text{л-о}}$ – модуль летне-осеннего минимального стока, $\text{л}/\text{с км}^2$; A – площадь водосбора, км^2 ; $H_{\text{ср}}$ – средняя высота водосбора, м ; ΔH – эрозионный врез русла реки, м

Для территории Беларуси впервые расчет минимального стока рек был выполнен Д.А. Данович в 1950 г., но выводы и рекомендации этой работы основаны на небольшом объеме статистического материала, поэтому предложенные уравнения дают значительные ошибки [5].

Работы А.М. Норватова и А.М. Владимирова выполнены с учетом физико-географических и гидрогеологических условий, но для всей Европейской части СССР, поэтому они требуют определенных уточнений [6, 7, 17, 18, 19, 20].

На основании большого статистического материала и анализа физико-географических условий в 1961 г. К.А. Ключева провела районирование территории Беларуси по однотипным

условиям формирования минимального стока (8 районов) и предложила уравнения для расчетов минимального стока при отсутствии данных наблюдений. В основу положена связь среднего многолетнего суточного минимального летнего и зимнего модулей стока от величины площади водосбора. Параметры a и b определяются с помощью вспомогательных таблиц. В настоящее время в нормативных документах предложена аналогичная схема.

Все предлагаемые методики расчета минимального стока воды для рек Беларуси были основаны на учете связи модуля минимального стока с площадью водосбора. Интенсивность подземного питания рек определяется не только водообильностью питающих горизонтов, но и их количеством, а последнее определяется глубиной эрозионного вреза русла реки. Между глубиной эрозионного вреза (ΔH) и величиной площади водосбора (A) существует зависимость, что подтверждает рис. 1 и которую можно представить уравнением вида:

$$\Delta H = A + \beta \quad (1)$$

Несмотря на разобшенность точек на графике наблюдается тенденция увеличения эрозионного вреза с увеличением площади водосбора. Эта зависимость рассматривается в работах А.М. Норватова, К.А. Ключевой.

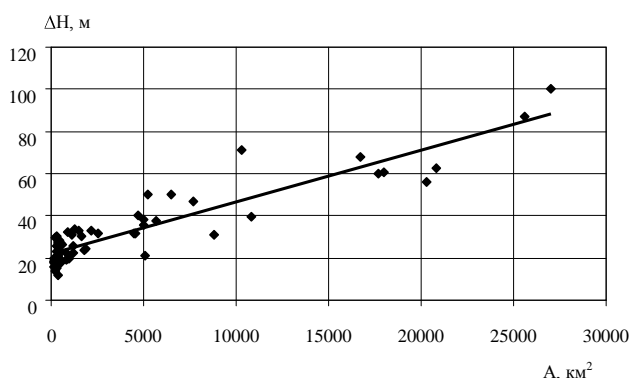


Рисунок 1 – Изменение эрозионного вреза русла рек от площади водосбора

Для практических целей интерес представляет минимальный сток больших расчетных обеспеченностей ($p = 80...97\%$), поэтому для их определения необходимы коэффициенты вариации и асимметрии.

Расчету коэффициента изменчивости посвящено много работ и рекомендуется ряд эмпирических формул (табл. 4).

Таблица 4 – Модели расчета коэффициента изменчивости минимальных расходов воды при отсутствии данных наблюдений

Автор	Год	Модель
Н.Д. Антонов [2]	1941	$C_v = a \cdot C_{v,год}^b$
Д.А. Данович [5]	1950	$C_{v,l} = a - 0,131 \cdot \lg A$
“Указания ...” [12]	1966	По табличным данным

А.Г. Курдов [13]	1970	$C_v = \frac{\sigma}{Q_{\min}}$
А.М. Владимиров [10]	1966	По табличным данным

Примечание: Q_{\min} – минимальный расход воды, m^3/c ; C_v – коэффициент вариации

Исходные данные и методика исследования

В основу исследования положены временные ряды минимальных 30-суточных расходов воды летне-осенней и зимней межени по 124 речным створам с периодом наблюдений от 20 до 120 лет с площадями водосборов от 6 до 101000 km^2 опубликованные Департаментом по гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Временные ряды обрабатывались стандартными статистическими методами. Проведенный анализ статистической структуры рядов минимального стока подтвердил случайный и независимый их характер. Выборочные значения коэффициентов автокорреляции $r(l)$ для минимального летне-осеннего стока изменяются в пределах от -0,45 до 0,88, а для минимального зимнего стока – от -0,46 до 0,81; как правило, являясь незначимыми (при уровне $\alpha = 5\%$). При оценках однородности, выявленные неоднородные ряды были исключены. Средние многолетние значения стока по имеющимся рядам были определены с относительной ошибкой не превышающей 10 %.

В качестве характеристики, определяющей интенсивность формирования стока, был использован показатель эрозионного вреза [21, 22]:

$$\Delta H = H_{водсб} - H_{ств}, \quad (2)$$

где $H_{водсб}$ – средняя высота водосбора, m ; $H_{ств}$ – отметка среднего наименьшего за период межени уровня воды в замыкающем створе, m .

Пространственная структура эрозионного вреза рек Беларуси (ΔH) представлена на рис. 2 [22, 23]. Из рисунка видно, что величина эрозионного вреза рек изменяется в больших пределах от 10 до 95 m , наибольшие величины приурочены к возвышенностям, а наименьшие к Белорусскому Полесью. В бассейне р. Западная Двина глубина эрозионного вреза достигает 23,5–68,4 m , средний эрозионный врез составляет 40 m , небольшие величины приурочены к Полоцкой низине, а на северо-востоке увеличиваются в районе Городокской и Витебской возвышенностей. Наиболее расчленен бассейн р. Неман ($\Delta H_{cp} = 51 m$), так как бассейн «окружен» возвышенностями (Ошмянская, Минская, Новогрудская, Слонимская, Волковыская, Гродненская, Копыльская). Глубины эрозионного вреза колеблются от 15 до 87 m . Наименьшие глубины эрозионного вреза приурочены к бассейну р. Западный Буг ($\Delta H_{cp} = 22 m$). Бассейн р. Днепр находится на Центрально-Березинской, где глубина эрозионного вреза составляет 15–25 m , и Оршано-Могилевской равнинах (эрозионный врез составляет 40–70 m). Бассейн р. Припять характеризуется широким спектром глубины эрозионного вреза от

12 (р. Неслуха) до 100 м (р. Горынь). Преобладающая глубина составляет 15–25 м, но в отдельных местах достигает 40–50 м (р. Уборть). Возрастает глубина эрозионного вреза р. Припять до 75 м в районе Мозырской возвышенности.

На территории Беларуси модуль минимального стока варьирует от 0,21 до 5,66 л/(с км²): большие величины приурочены к возвышенностям, меньшие к низменностям. Летне-осенний минимальный сток меньше зимнего в 0,5–2,0 раза. Наибольший модуль стока отмечается в бассейне р. Неман ($q_{лет\ ср} = 2,66$ л/(с км²), $q_{зим\ ср} = 2,79$ л/(с км²)), наименьший в бассейне р. Припять ($q_{лет\ ср} = 1,10$ л/(с км²), $q_{зим\ ср} = 1,56$ л/(с км²)) (рис. 3).

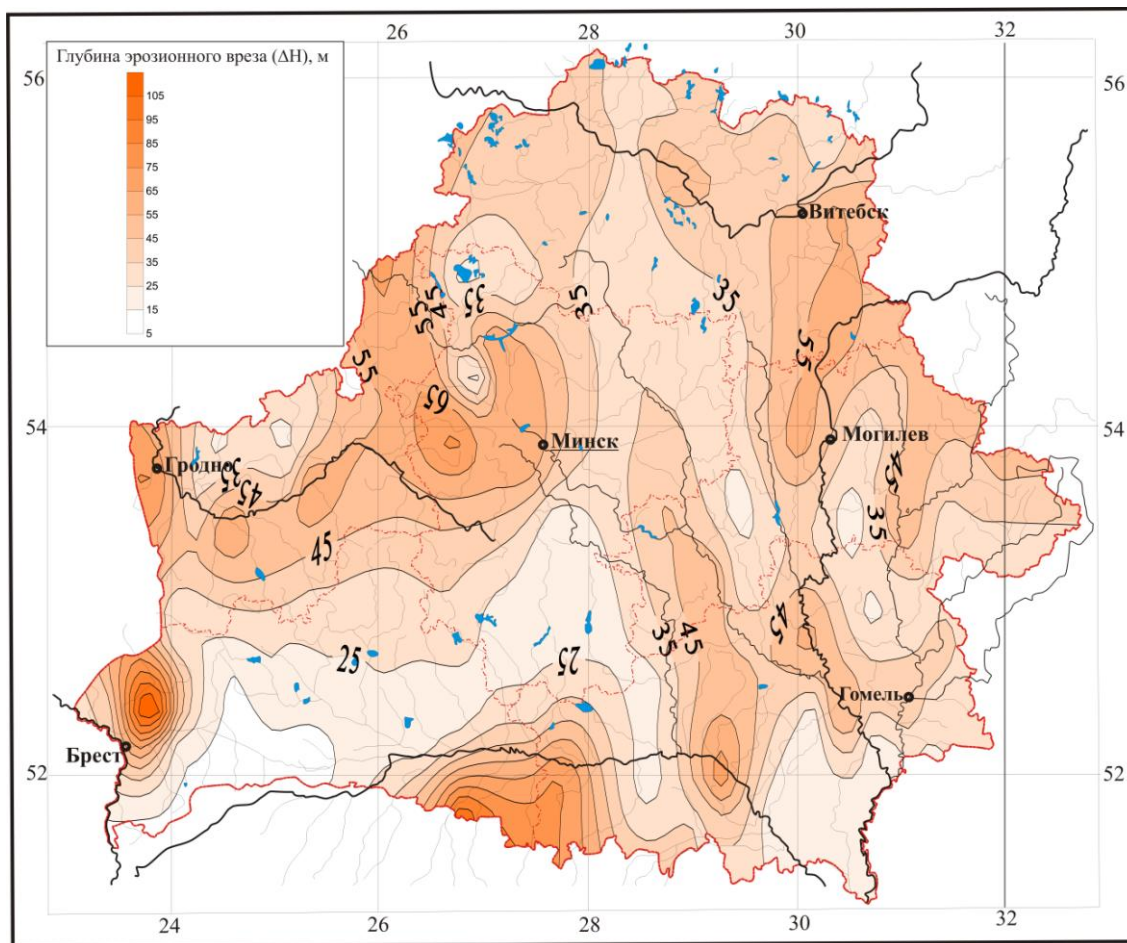


Рисунок 2 – Карта глубины эрозионного вреза рек Беларуси

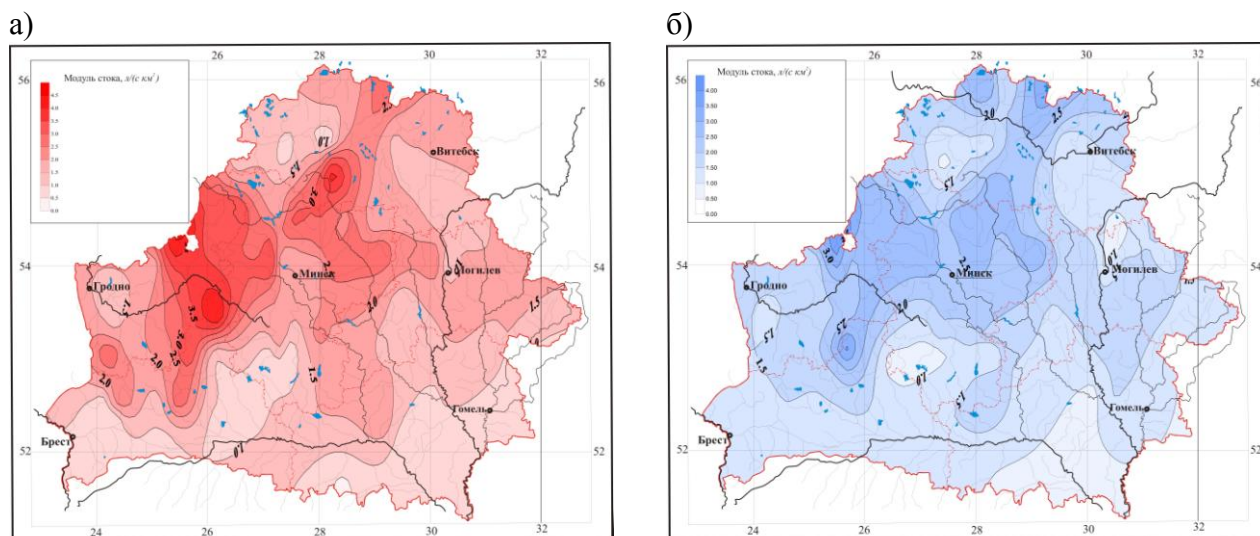


Рисунок 3 – Модули минимального стока воды рек Беларуси а – летне-осеннего и б – зимнего

При изучении изменения модуля минимального стока рек Беларуси и анализа карт глубины эрозионного вреза, подземного стока в реки, поверхности грунтовых вод была обнаружена хорошо выраженная связь модулей зимнего и летне-осеннего минимального стоков с показателями эрозионного вреза русла реки ΔH , которая аппроксимируется линейными зависимостями типа:

$$q_{\min}^{л-о(з)} = \mu_{л-о(з)} \cdot \Delta H^{л-о(з)} \pm \Delta g_{\min}^{л-о(з)}$$

где $q_{\min}^{л-о(з)}$ – минимальные модули стока летне-осенней (зимней) межени, л/(с км²), $\mu_{л-о(з)}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность питания реки подземными водами в летне-осеннюю (зимнюю) межень, приходящийся на единицу эрозионного вреза, (л/с км²)/м; $\pm \Delta g_{\min}^{л-о(з)}$ – параметр, характеризующий среднюю многолетнюю инфильтрацию воды в глубокие водоносные горизонты, или средние многолетние значения недренуемого грунтового стока ($-\Delta g_{\min}^{л-о(з)}$), либо величину дополнительного питания речного стока подземными водами ($+\Delta g_{\min}^{л-о(з)}$) вследствие их разгрузки в речную сеть.

Результаты и их обсуждение

Зависимость модуля минимального летне-осеннего стока от эрозионного вреза русла реки представлена на рис. 4. Имеющий место разброс точек вдоль линии регрессии (рис. 5) свидетельствует о больших различиях физико-географических условий формирования минимального стока. Построение графиков зависимости модуля минимального стока ($q_{\min}^{л-о(з)}$) от эрозионного вреза реки (ΔH) проводилось для каждого гидрогеологического района,

водоносные горизонты которого имеют одинаковую по территории водность (рис. 5). В случае большой пестроты водообильности слагающих горизонтов проводилось дробление районов, а при схожести объединялись в один. При этом было выделено 6 районов для летне-осенней межени и 3 района для зимней межени (рис. 6).

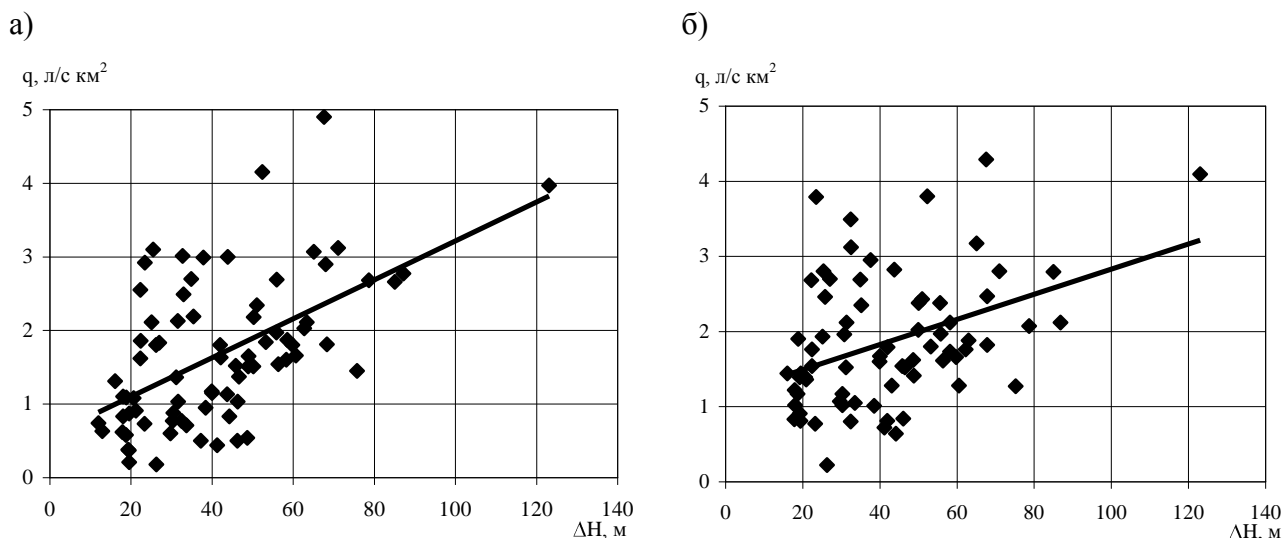
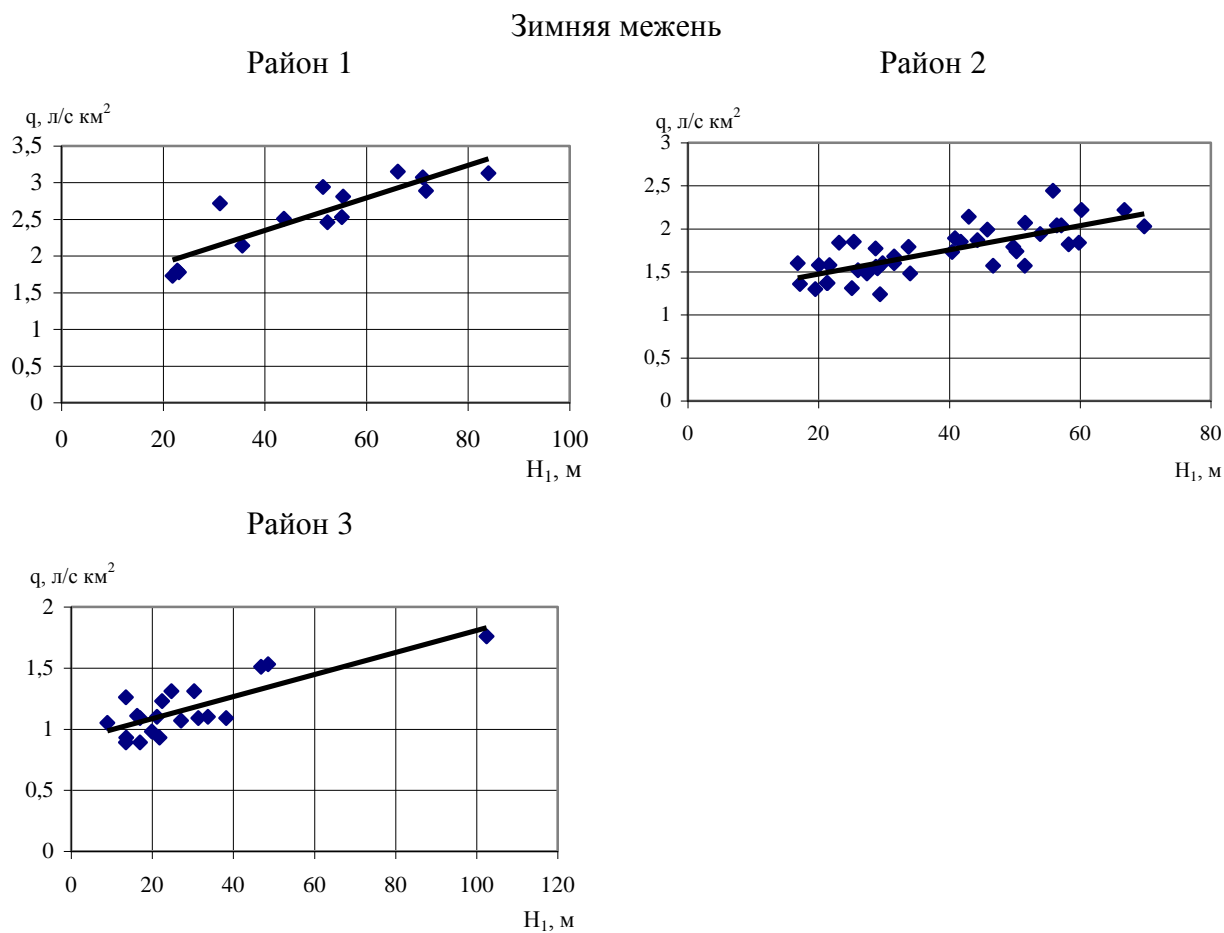


Рисунок 4 – Зависимость модуля минимального стока от глубины эрозионного вреза русла реки а – летне-осеннего, б – зимнего



Летне-осенняя межень

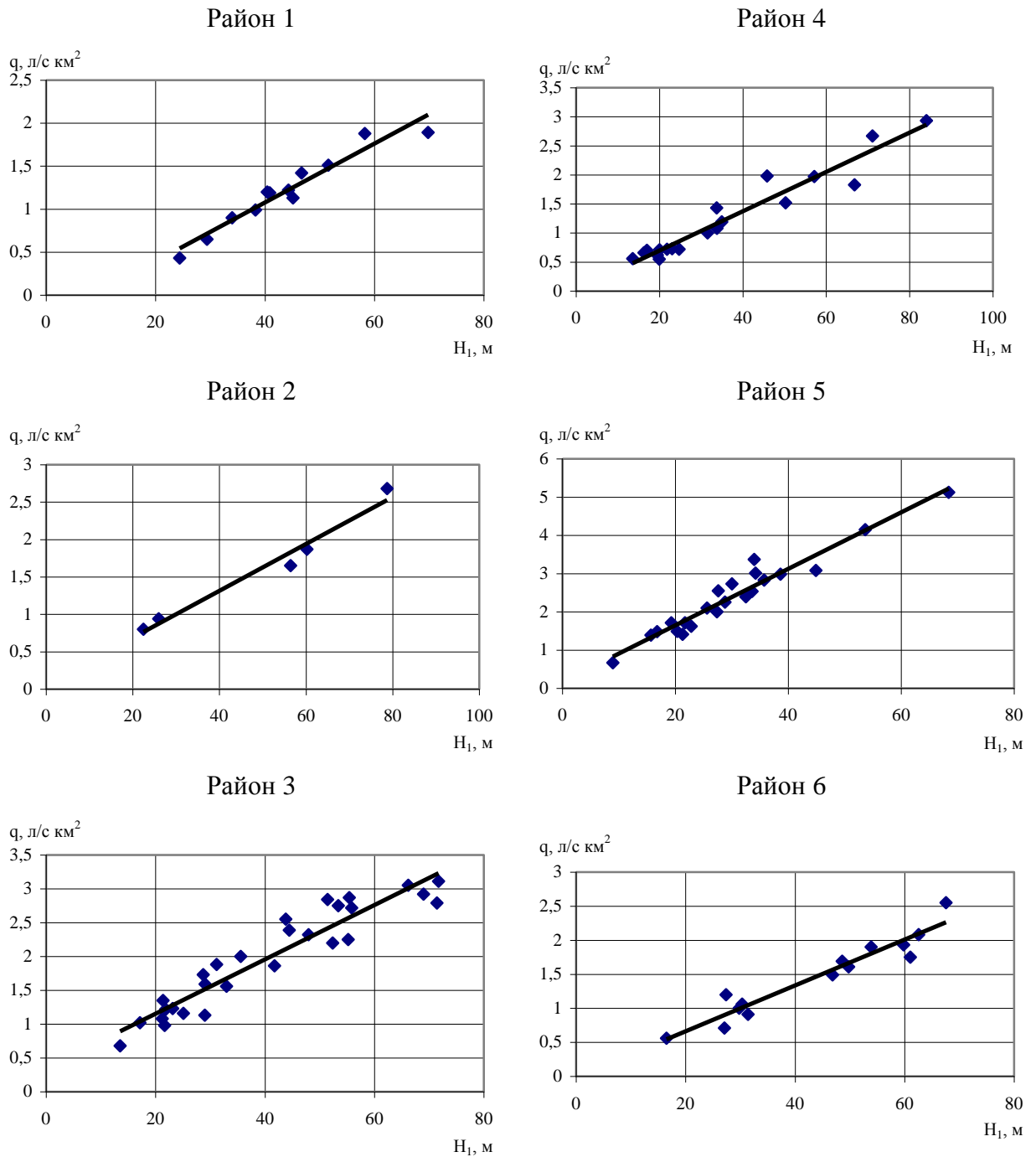


Рисунок 5 – Зависимость модулей минимального стока воды от глубины эрозионного вреза русла реки по районам

На основе анализа графических связей величин минимального стока с глубиной эрозионного вреза были получены для отдельных районов следующие параметры моделей (табл. 5).

Таблица 5 – Параметры моделей для расчета модуля минимальных расходов воды рек Беларуси

Район	Межень					
	Летне-осенняя			зимняя		
	μ	Δg	r	μ	Δg	r
Район 1	0,0342	-0,2911	0,97	0,0222	1,4581	0,88
Район 2	0,0313	0,0618	0,99	0,014	1,1943	0,75
Район 3	0,0402	0,3500	0,95	0,0090	0,9048	0,81
Район 4	0,0338	0,0209	0,97			
Район 5	0,0739	0,1662	0,97			
Район 6	0,0336	-0,0122	0,96			

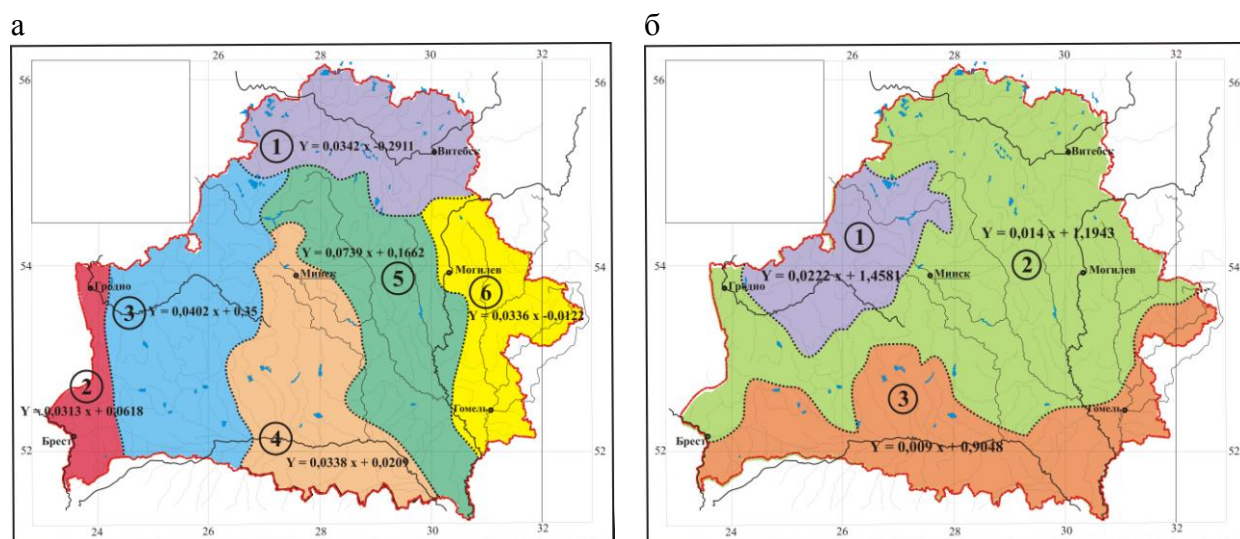


Рисунок 6 – Карта районов однотипной зависимости $q = f(\Delta H)$: а – летне-осенняя межень, б – зимняя межень

Границы районов проводились по границам резкой смены гидрогеологических комплексов с учетом границ бассейнов рек.

В *летне-осенний период* на территории Беларуси выделяется шесть районов (рис. 6 а) с различными условиями разгрузки подземных вод в реки.

Район 1 находится на севере республики и охватывает белорусскую часть бассейна р. Западная Двина. Эрозионный врез рек изменяется от 24 до 70 м, а средний составляет 44 м. В этом районе много переуглубленных русел, которые сложены моренными суглинками. Минимальный сток формируется главным образом водами верхнедевонских отложений. Средняя величина модуля среднемноголетнего подземного стока из верхнедевонских отложений составляет 1,2 л/(с км²). Мощность четвертичных отложений колеблется от 50 до 150 м, из них наиболее водообильными являются подморенные и межморенные флювиогляциальные пески и супеси. Воды четвертичных отложений имеют подчиненное значение в формировании подземного стока этого района [24, 25, 26]. Модуль

подземного стока составляет $2,5 \text{ л/(с км}^2\text{)}$. Модуль летне-осеннего минимального стока варьирует от $0,43$ до $1,89 \text{ л/(с км}^2\text{)}$, средний составляет $1,2$.

Район 2 протягивается узкой полосой вдоль западной границы республики и охватывает бассейн р. Западный Буг и частично бассейн р. Неман, эрозионный врез изменяется от 22 до 79 м , средний – $48,8 \text{ м}$. Мощность четвертичных отложений составляет $150\text{--}200 \text{ м}$. Основными водоносными горизонтами и комплексами являются четвертичные отложения, подчиненную роль играют палеоген-неогеновые и меловые отложения. Модули среднемноголетнего подземного стока колеблются от $1,5$ до $4,0 \text{ л/(с км}^2\text{)}$. Модуль летне-осеннего поверхностного стока варьирует от $0,8$ до $2,68 \text{ л/(с км}^2\text{)}$, средний – $1,59$.

Район 3 занимает западную часть Беларуси, охватывает бассейн р. Виляя, большую часть бассейна р. Неман и верхнее течение р. Припять. Для северной части района характерны большие абсолютные ($200\text{--}250 \text{ м}$) и относительные высоты, что обуславливает большие значения эрозионного вреза до 72 м , средний – $40,4 \text{ м}$. К югу абсолютные отметки высот снижаются и составляют $130\text{--}145 \text{ м}$. Основными водоносными горизонтами являются четвертичные отложения, подчиненную роль играют палеоген-неогеновые отложения. Модули среднемноголетнего подземного стока колеблются от $1,0$ на юге района до $5,5 \text{ л/(с км}^2\text{)}$ в бассейне р. Виляя. Данный район характеризуется максимальными значениями модуля летне-осеннего минимального стока $3,0\text{--}4,0 \text{ л/(с км}^2\text{)}$, средний – $1,97$.

Район 4 располагается в центральной части Беларуси, и охватывает бассейн р. Припять. Абсолютные отметки высот уменьшаются при движении с севера на юг от 300 до 130 м . Эрозионный врез изменяется от 16 (р. Вить) на юге до 84 м (р. Исlochь) на севере района, а средний составляет 36 м . Основной подземный сток в районе формируется за счет вод четвертичного водоносного комплекса. Величина модуля среднемноголетнего подземного стока изменяется от $0,5$ до $2 \text{ л/(с км}^2\text{)}$. Модуль поверхностного летне-осеннего минимального стока изменяется от $0,56$ до $2,93 \text{ л/(с км}^2\text{)}$, а средний – $1,24$.

Район 5 расположен в бассейнах рр. Березины и Друти и занимает Центрально-березинскую равнину и Гомельское Полесье. Высоты земной поверхности района уменьшаются от 220 м на севере до 130 м на юге. Основное формирование подземного стока происходит за счет четвертичных отложений, а подчиненное значение имеет сеноман-альбский водоносный горизонт. Мощность четвертичных отложений составляет $50\text{--}100 \text{ м}$, а эрозионный врез рек составляет в среднем 30 м . Среднемноголетний модуль летне-осеннего минимального стока составляет $2,39 \text{ л/(с км}^2\text{)}$.

Район 6 располагается на востоке республики и дренируется р. Днепр и его левыми притоками. В бассейнах рр. Ипути, Беседи основное значение в подземном питании рек имеет сеноман-альбский водоносный горизонт, на остальной территории района

четвертичные отложения. Эрозионный врез рек в среднем составляет 44 м, а модуль минимального стока – 1,46 л/(с км²).

В *зимний период* на территории Беларуси выделяется три района (рисунок 7) с различными условиями разгрузки подземных вод в реки

Район 1 занимает бассейны рр. Неман и Вилии и представляет собой область краевых ледниковых образований сожского ледникового покрова. Для него характерны сильная расчлененность рельефа (эрозионный врез рек составляет от 22 до 84 м, средний – 49 м), большая мощность четвертичных отложений, относительно устойчивый и высокий минимальный сток ($q_{\min}^{л-о(з)} = 2,55 \text{ л/(с км}^2\text{)}$).

Район 2 простирается на большей части республики и включает в себя бассейны рек Западная Двина, Днепр, Березина. Глубина эрозионного вреза изменяется от 17 до 69 м, средний – 38,7 м; модуль стока варьирует от 1,24 до 2,44 л/(с км²), средний – 1,74.

Район 3 расположен на юге и юго-востоке республики и занимает область Белорусского Полесья. Характеризуется плоскоравнинным рельефом. Подземный сток здесь замедленный и невысокий, среднемноголетний зимний минимальный сток изменяется от 0,89 до 1,76 л/(с км²). Глубина эрозионного вреза рек колеблется от 9 до 102 м (р. Горынь), средний – 28 м.

Проверка полученных данных осуществлялась на независимых материалах и дала хорошие результаты, отклонение фактических данных от рассчитанных составляет в среднем 5–20 % в зависимости от района (рис. 7). Коэффициент корреляции летне-осеннего минимального стока составляет 0,95; а зимнего минимального стока – 0,82.

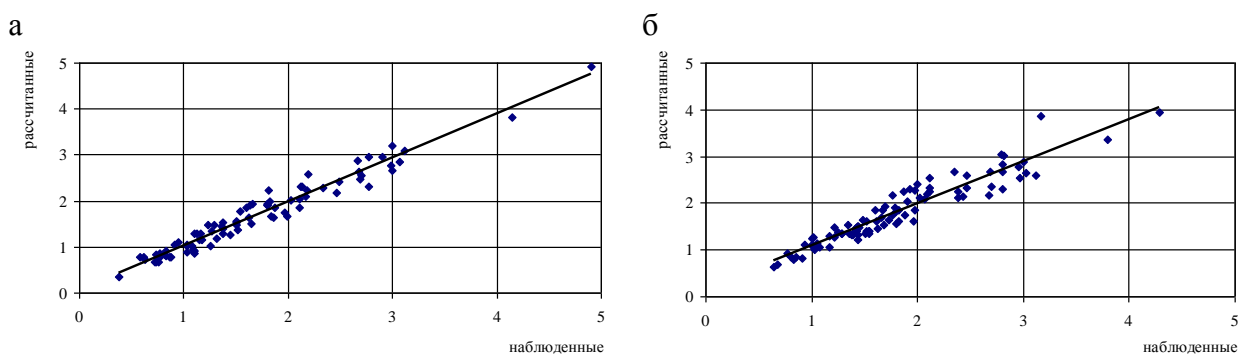


Рисунок 7 – Сопоставление рассчитанных и измеренных величин минимального стока:

а – летне-осенняя межень, б – зимняя межень

Величина изменчивости минимального стока определяется многими факторами. Коэффициент вариации минимального стока меньше:

- на реках, где доля подземного стока больше,
- на больших реках, чем на малых,
- на реках зарегулированных озерами, водохранилищами.

На территории Беларуси коэффициент вариации летне-осеннего минимального стока

рек изменяется от 0,12 до 4,00; а зимнего – от 0,17 до 1,91. Для определения изменчивости 30-дневного минимального стока выполнено обобщение величин Cv за летне-осенний и зимний периоды и представлено уравнением:

$$Cv = Cv'_{q \rightarrow 0} - \alpha q$$

где $Cv'_{q \rightarrow 0}$ – коэффициент вариации для модуля стока при $q \rightarrow 0$.

Для выделенных районов однотипной зависимости коэффициента вариации от модуля стока, были определены средние величины Cv за летне-осенний и зимний периоды, составлены карты (рис. 10). Исследования показывают, что большим значениям модуля минимального стока рек соответствуют меньшие величины коэффициента изменчивости, что подтверждается рис. 9.

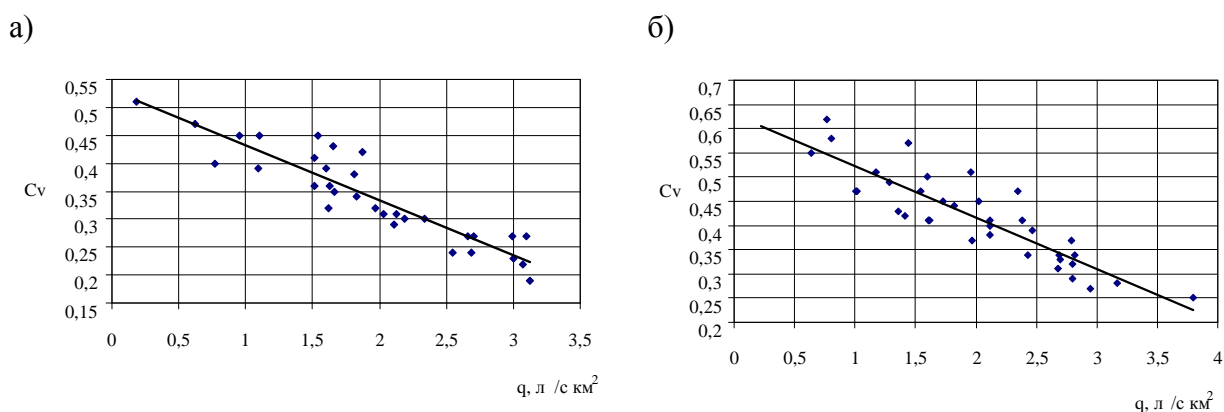


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента вариации от модуля минимального стока а – летне-осеннего и б – зимнего

На рис. 10 приведены однотипные районы для определения коэффициента вариации минимального стока за летне-осенний период 3 района, а для зимнего – 7.

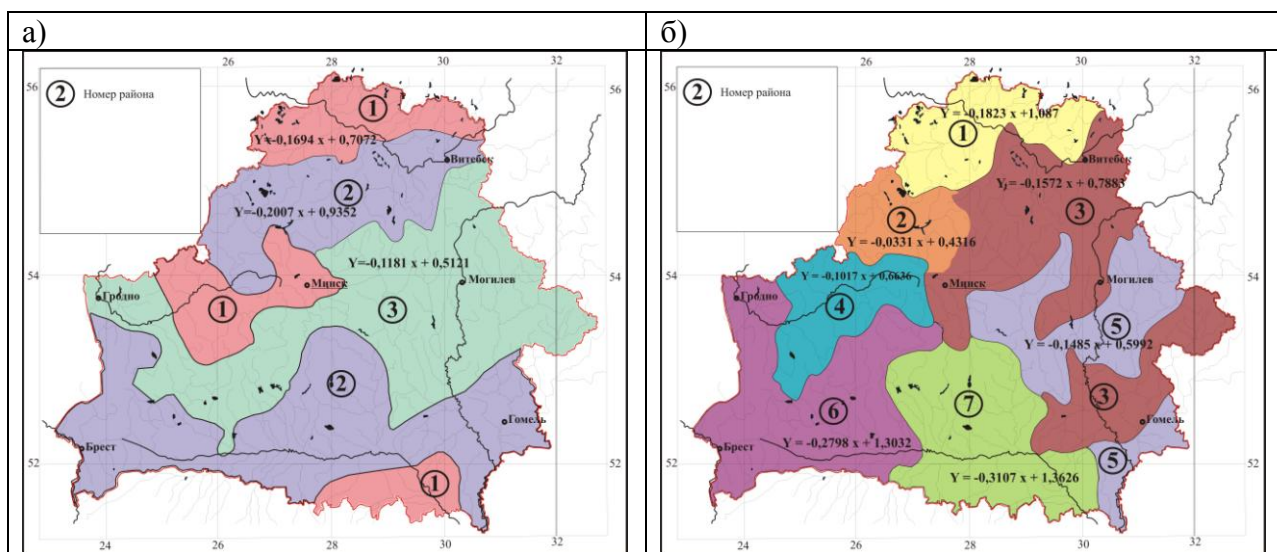


Рисунок 9 – Карты районов для определения коэффициента вариации: а – летне-осенняя межень, б – зимняя межень

Параметры математических моделей представлены в табл. 7.

Таблица 7 – Параметры моделей для расчета коэффициента изменчивости минимальных расходов воды

Зона	Минимальный сток					
	летне-осенний			зимний		
	α	Cv'	r	α	Cv'	r
1	-0,2007	0,9352	0,940	-0,1823	1,0870	0,963
2	-0,1694	0,7072	0,950	-0,0331	0,4316	0,587
3	-0,1181	0,5121	0,908	-0,1572	0,7883	0,845
4				-0,1017	0,66636	0,952
5				-0,1485	0,5992	0,954
6				-0,2798	1,3032	0,907
7				-0,3107	1,3626	0,834

Величина коэффициента асимметрии (Cs) обычно определяется по соотношению его с коэффициентом вариации (Cv). Для увлажненных районов (север республики и Белорусская гряда) принято считать $Cs/Cv = 2$, для более засушливых районов (Полесье) $Cs/Cv = 1,5$ [10].

Пример расчета

Расчет модуля стока по приведенной методике выполняется по следующему алгоритму:

1. По карте определяется местоположение изучаемой реки. В случае отсутствия изображения ее на карте местоположение определяется с помощью координат гидрологического створа или путем нахождения на карте других ориентиров, характеризующих ее положение (реки, принимающей ее; населенный пункт). р. Улла – с. Промыслы левый приток р. Западная Двина, координаты створа Промыслы $\varphi = 54^{\circ}59'$ с.ш. $\lambda = 29^{\circ}09'$ в.д.

2. По карте (рис. 2) определяется глубина эрозионного вреза $\Delta H = 50$ м.

3. Район находится по карте (рис. 6) в соответствии с местоположением изучаемой реки, затем по таблице 5 находится модель соответствующая данному району. Район **I в**, модель $q_{\min}^{л-о} = 0,0342 \cdot \Delta H - 0,2911 = 1,42$ л/с км².

4. Для расчета коэффициента вариации по карте (рис. 9) устанавливается район, где расположена искомая река (район 2), по таблице 7 определяем модель $Cv = -0,1694 \cdot q + 0,7072 = 0,47$.

5. Так как исследуемая река находится на севере республики принимаем соотношение $Cs/Cv = 2$, $Cs = 0,93$.

Полученная методика сравнивалась с методикой К.А. Ключевой. Сравнение было проведено на материалах наблюдений, независимых для обеих методик, 18 пунктам (летне-осенний и зимний минимальный сток), равномерно расположенным по территории Беларуси. Это позволило получить оценки погрешностей (табл. 8)

Таблица 8 – Оценка погрешностей методов расчета минимального стока

Авторы методики	А.А. Волчек, О.И. Грядунова	К.А. Ключева
Относительная ошибка, e	29 %	52 %

Проведенные исследования показали возможность использования новых, физически более обоснованных методов расчета летне-осеннего и зимнего минимального стока неизученных рек, основанных на связи модуля стока с мощностью дренируемой рекой толщи почво-грунтов.

Выводы

Предлагаемая методика позволяет определить минимальный сток при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и дает приемлемые для практики результаты. Использование ее в совокупности с другими методиками позволит существенно уточнить величины минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для сложных гидрогеологических условий.

По условиям формирования минимальных расходов воды рек Беларуси в зависимости от эрозионного вреза русел для летне-осенней межени выделено 6 однородных районов и для зимней межени 3 однотипных района.

Для выделенных районов получены математические модели расчета минимальных расходов воды слабоизученных рек Беларуси для летне-осенней межени и зимней межени.

Полученные модели могут использоваться для расчета не только минимальных расходов воды меженных периодов, но и для определения экологического и свободного стоков.

Список литературы

- 1 Шевелев, М.Э. Метод расчета обеспеченных минимумов речного стока / М.Э. Шевелев. – Метеорология и гидрология, 1937. – № 8.
- 2 Антонов, Н.Д. Минимальный сток рек Европейской части СССР / Н.Д. Антонов // Труды НИУ ГУГМС. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1941. – Сер. IV, вып. 2.
- 3 Сотченко, О.М. Минимальный сток рек УССР / О.М. Сотченко, Г.О. Чиппинг // Гидрологические расчеты. – Киев, 1947.
- 4 Поляков, Б.В. Гидрологический анализ и расчеты / Б.В. Поляков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1946. – 480 с.
- 5 Данович, Д.А. Анализ минимального стока и обуславливающих его факторов на примере рек Белорусской ССР / Д.А. Данович // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1950. – Выпуск 27 (81). – С. 96-130.

6 Норватов, А.М. Минимальный сток малых рек в связи с подземным питанием / А.М. Норватов // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1950. – Вып. 27 (81). – С. 58-85.

7 Норватов, А.М. Минимальный сток малых рек Европейской территории СССР / А.М. Норватов // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1956. – Выпуск 52 (106). – С. 42-74.

8 Чеботарев, Н.П. Теория и метод определения минимального стока / Н.П. Чеботарев // Труды Всесоюз. Совещ. по изучению стока, регулированию стока и зимнему режиму. – Москва, 1954. – С. 34-38.

9 Ключева, К.А. Районирование территории БССР по однотипным условиям формирования минимального стока рек / К.А. Ключева // Сборник работ по гидрологии. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1961. – № 2. – С. 131-136.

10 Владимиров, А.М. Особенности формирования и расчет минимального стока малых рек СССР / А.М. Владимиров // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. – Выпуск 133. – С. 148-174.

11 Лысенко, К.А. Минимальный сток рек Украины и Молдавии / К.А. Лысенко // Труды УкрНИГМИ. – Киев, 1966. – вып. 64. – С. 143-154.

12 Владимиров А.М. Об «Указаниях по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» / А.М. Владимиров. – Метеорология и гидрология, 1967. – С. 91–93.

13 Курдов, А.Г. Минимальный сток рек (основные закономерности формирования и методы расчета) / А.Г. Курдов. – Воронеж: ВГУ, 1970. – 252 с.

14 Задорожная, Р.Г. О влиянии средней высоты бассейна и глубины вреза на минимальный сток в бассейне Тисы / Р.Г. Задорожная // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР, Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени науч.-иссл. ин-т гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова – Москва, 1975. – Выпуск 3: Комплексное использование водных ресурсов. – С. 107-115.

15 Евстигнеев, В.М. О методическом подходе к расчетам минимальных летне-осенних расходов средних рек при отсутствии материалов наблюдений (на примере Забайкалья) / В.М. Евстигнеев, А.В. Христофоров // Водные ресурсы. – 1983. – № 5. – С. 17-25.

16 Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик». – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2000. – 174 с.

- 17 Владимирова, А.М. Минимальный сток рек СССР / А.М. Владимирова. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1970. – 214 с.
- 18 Владимирова, А.М. Об «указаниях по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» / А.М. Владимирова // Метеорология и гидрология. – 1967. – № 2. – С. 91-93.
- 19 Владимирова, А.М. Связь минимального стока малых рек севера Европейской территории СССР с подземным питанием / А.М. Владимирова // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1964. – Выпуск 114. – С. 119-136.
- 20 Владимирова, А.М. Сток рек в маловодный период года / А.М. Владимирова. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. – 295 с.
- 21 Сакович, В.М. Исследование роли эрозионного вреза в формировании минимального стока рек (на примере рек бассейна р. Шелони) / В.М. Сакович // Водные ресурсы Северо-Западного региона России: сборник научных трудов / РГГМУ; под ред. А.М. Владимировой, В.Н. Воробьева – Санкт-Петербург: Изд. РГГМУ, 1999. – Выпуск 121. – С. 45-48.
- 22 Волчек, А.А. Минимальный сток малых рек Беларуси как функция эрозионного вреза русловой сети / А.А. Волчек, М.Ю. Калинин, О.И. Грядунцова // Водные ресурсы (информационные материалы) РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». – 2005. – № 20. – С. 59-65.
- 23 Кадацкая, О.В. Ландшафтные воды в условиях техногенеза / О.В. Кадацкая. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 347 с.
- 24 Куделин, Б.И. Подземный сток на территории СССР / Б.И. Куделин. – Москва: Изд-во Московского университета, 1966. – 303 с.
- 25 Зецкер, И.С. Гидрогеологическое районирование крупных речных бассейнов по условиям формирования подземного стока в реки (на примере бассейна реки Западной Двины) / И.С. Зецкер, А.П. Лавров // ДАН БССР, 1963. – Т. VII, № 8. – С. 548-551.
- 26 Распопов, М.П. Районирование подземных вод равнины Европейской части СССР по условиям их стока в реки / М.П. Распопов // Труды Государственного гидрологического института. – Ленинград, 1950. – Вып. 27 (81). – С. 5-56.