

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ**WATER RESOURCES****ВОДНЫЯ РЭСУРСЫ**

УДК 504.05/.06:711.4

О. Г. Савич-Шемет, Е. В. Гапанович

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: savichoks@yandex.ru*

КЛИМАТОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЧНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТОКА РЕК ОРШАНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Аннотация. Представлены многолетние изменения расходов рек Оршанского артезианского бассейна. Показано, что основными факторами, влияющими на условия формирования стока, являются прежде всего климатические, геоморфологические и гидролого-гидрогеологические условия региона. На территории Оршанского артезианского бассейна выявлено статистически значимое снижение стока за весеннее половодье и уменьшение его доли в годовом стоке (мощность отрицательного тренда составила от 5,4 до 22,0 %). Выявлено значительное увеличение доли зимнего стока в годовом распределении для рек Оршанского артезианского бассейна. В результате построения двухфакторных регрессионных моделей связи зимних расходов и расходов воды весеннего половодья установлено, что увеличение доли зимнего стока рек связано с повышением температуры воздуха холодных месяцев, с увеличением частоты оттепелей, прохождением зимних паводков. Полученные результаты свидетельствуют, что подземный сток в зимнюю межень увеличился. Обусловлено это мягкими зимами, наличием частых оттепелей и достаточным увлажнением территории.

Ключевые слова: речной бассейн, речной сток, расход воды весеннего половодья, мощность тренда, динамическая норма ряда

O. G. Savich-Shemet, E. V. Gapanovich

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: savichoks@yandex.ru*

CLIMATOGENIC CHANGES IN THE RIVER AND UNDERGROUND RIVER FLOW OF THE ORSHA ARTESIAN BASIN

Abstract. The article presents long-term changes in the flow rates of the rivers of the Orsha Artesian basin, it is shown that the main factors influencing the conditions of flow formation are primarily climatic, geomorphological and hydrological-hydrogeological conditions of the region. On the territory of the Orsha Artesian basin, a statistically significant decrease in runoff during the spring flood and a decrease in its share in the annual runoff were revealed (the power of the negative trend ranged from 5.4 to 22.0 %). A significant increase in the share of winter runoff in the annual distribution for the rivers of the Orsha Artesian basin was revealed. As a result of constructing two-factor regression models of the relationship between winter expenditures and spring flood water expenditures, it was found that an increase in the share of winter river runoff is associated with an increase in the air temperature of the cold months, with an increase in the frequency of thaws, and the passage of winter floods. The results obtained indicate that the underground runoff in the winter has increased, due to mild winters, the presence of frequent thaws and sufficient humidification of the territory.

Keywords: river basin, river runoff, spring flood water consumption, trend power, dynamic norm of the series

A. P. Savich-Shemet, E. V. Gapanovich

*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
Мінск, Беларусь, e-mail: savichoks@yandex.ru*

КЛІМАТАГЕННЫЯ ЗМЭНЫ РАЧНОГА І ПАДЗЕМНАГА СЦЁКУ РЕК АРШАНСКАГА АРТЭЗІАНСКАГА БАСЕЙНА

Анотацыя. Прадстаўлены шматгадовыя змены выдаткаў рек Аршанскага артэзіянскага басейна. Паказана, што асноўнымі фактарамі, якія ўплываюць на ўмовы фарміравання сцёку, з'яўляюцца перш за ўсё кліматычныя, геамаарфалагічныя і гідралага-гідрагеалагічныя ўмовы рэгіёну. На тэрыторыі Аршанскага артэзіянскага басейна выяўлена статыстычна значнае зніжэнне сцёку за вясновую паводку і памяншэнне яго долі ў гадавым сцёку (магутнасць адмоўнага тренду складала ад 5,4 да 22,0 %). Выяўлена значнае павелічэнне долі зімовага сцёку ў гадавым размеркаванні для рек Аршанскага артэзіянскага басейна. У выніку пабудовы двухфактарнай рэгрэсійнай мадэлі сувязі зімовых выдаткаў і выдаткаў вады вясновай паводкі ўстаноўлена, што павелічэнне долі зімовага сцёку рек звязана з павышэннем тэмпературы паветра халодных месяцаў, з павелічэннем частаты адлігаў, праходжаннем зімовых паводак. Атрыманыя вынікі сведчаць, што падземны сцёк у зімовую межень павялічыўся, што абумоўлена мяккімі зімамі, наяўнасцю частых адліг і дастатковым увільгатненнем тэрыторыі.

Ключавыя словы: рачны басейн, рачны сцёк, расход вады вясновай паводкі, магутнасць тренду, дынамічная норма шэрагу

Введение. Оршанский артезианский бассейн входит в состав Московского мегабассейна подземных вод и приурочен к центральной и северо-восточной части Беларуси. Мощность осадочных пород достигает 1500–1700 м. В бассейне по степени дренирования реками и условиям взаимосвязи поверхностных и подземных вод выделяются две гидродинамические зоны – активного и замедленного водообмена. Первая зона объединяет пресные воды четвертичных, меловых и девонских отложений мощностью 300–350 м, уменьшаясь до 200 м в сторону Жлобинской седловины. Вторая зона, расположенная ниже по разрезу, не имеет активной связи с поверхностью [1].

Гидрографическая сеть Оршанского артезианского бассейна представлена р. Днепр с притоками Березина, Сож и Западная Двина (рис. 1). В качестве объекта исследований многолетних изменений речного стока, исходя из анализа физико-географических, геолого-гидрогеологических и водохозяйственных аспектов территории, выбран бассейн стока р. Днепр с притоком р. Сож.

Основная часть. Объектом исследований являлись поверхностные воды рек Оршанского артезианского бассейна и подземная составляющая питания рек. Исследования включали: структурно-пространственный анализ материалов, характеризующих природные условия (климатические, геоморфологические, гидрологические, геолого-гидрогеологические и др.) Оршанского артезианского бассейна; анализ картографического материала; анализ трендов эквидистантных временных рядов наблюдений за расходом рек и подземного стока в реки, расчленение гидрографа, построение регрессионных одно- и двухфакторных моделей связи расходов рек с основными предикторами – атмосферными осадками и температурой атмосферного воздуха.

Гидрографическая сеть Оршанского артезианского бассейна представлена рекой Днепр с притоками Березина и Сож, Западная Двина и малыми реками.

Днепр берет начало на Валдайской возвышенности. Длина реки 2201 км, в том числе на территории Беларуси 700 км. Густота эрозионной сети 0,39 км/км². На всем белорусском отрезке река является судоходной. Ширина долины от 0,5–1,5 до 5–10 км, при слиянии с Сожем – до 35–50 км. Максимальная глубина вреза (70–80 м) установлена в районе г. Орши [2].

В долине Днепра выделяются пойма и две надпойменные террасы. На отдельных участках обособляется еще более высокий уровень, который рассматривается как перигляциальная терраса [1]. Пойма развита практически повсеместно. Ее высота снижается вниз по течению от 5–6 до 2–3 м, различаются два пойменных уровня. Пойма в большинстве случаев аккумулятивная, нередко заболоченная. В 9 км выше Орши выходы девонских пород образуют в русле реки Кобелякские пороги.

Река Березина – единственный из крупных водотоков (длина 613 км), который от истоков до устья протекает по территории Беларуси. Истоки реки располагаются в заболоченном понижении юго-западнее Докшиц. Густота эрозионной сети 0,35 км/км². Ширина долины от 200–300 м в верховье до 5–10 км и более в среднем и нижнем течении, врез от 10–15 до 20–25 м. Выделяются пойма и две надпойменные террасы.

Река Сож берет начало в пределах Смоленско-Московской возвышенности вблизи г. Смоленска. На территории Беларуси располагается долина среднего и нижнего Сожа. Длина реки 648 км (в Беларуси 493 км). Густота эрозионной сети 0,38 км/км². Ширина долины изменяется от 1,5–3,0 до 15–18 км. Ниже Гомеля совместная долина с Днестром достигает 35–50 км. Врез варьирует от 30–40 до 50–55 м. Выделяются пойма и две надпойменные террасы. Пойма чаще всего аккумулятивная.

Для определения многолетних изменений количественных характеристик речного стока рек территории исследований анализу были подвергнуты наблюдения за расходом рек по данным гидрологических постов: р. Днепр – Речица, Могилев, Орша, Жлобин; р. Сож – Гомель, Славгород, Кричев; р. Проня – Летаги. Период наблюдений на гидрологических постах приведен в табл. 1, продолжительность периода наблюдений составляет 75–126 лет.

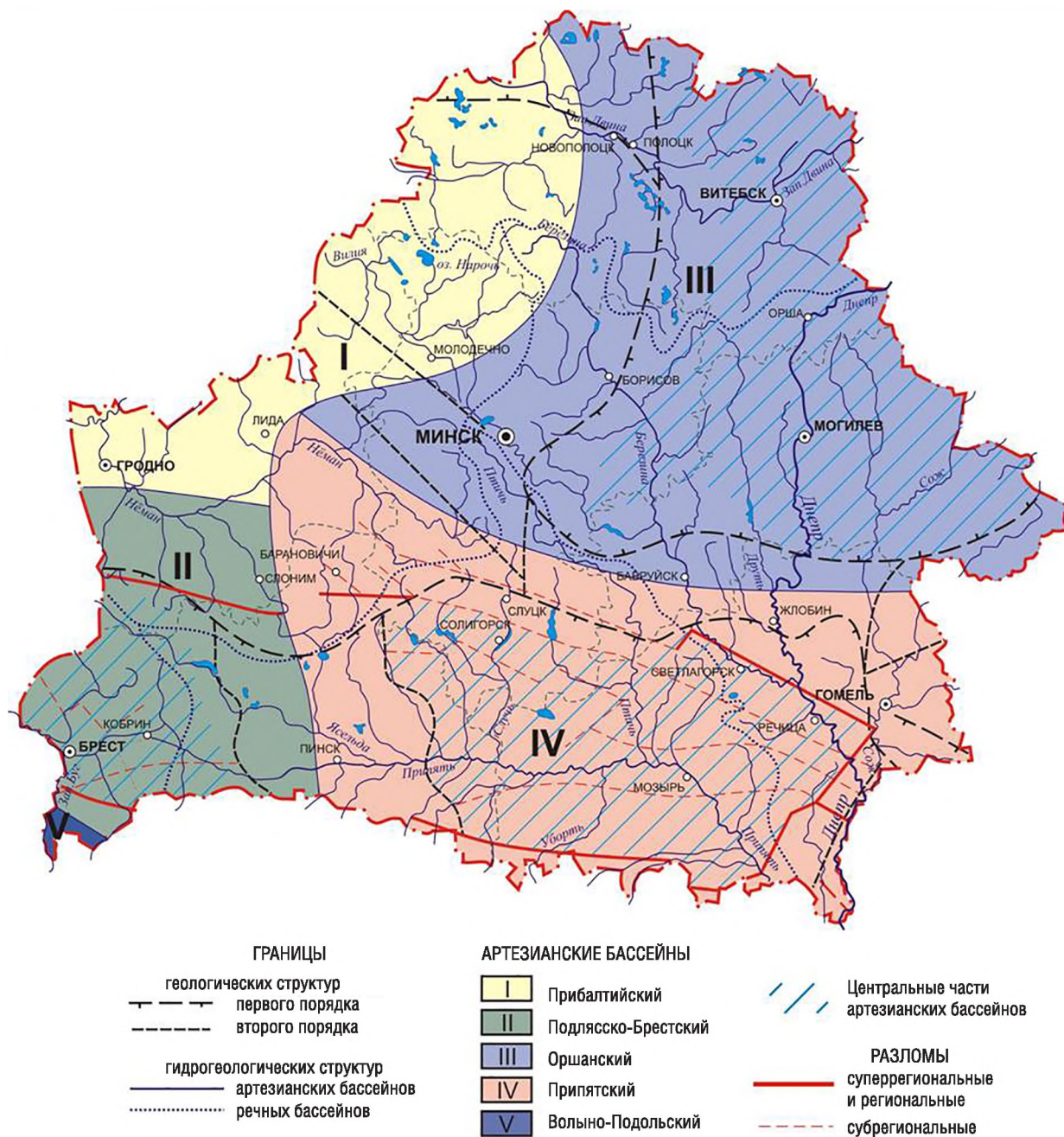


Рис. 1. Гидрогеологическое районирование территории Беларуси

Т а б л и ц а 1. Ведение гидрологических наблюдений на территории исследований

Бассейн	Пост	Период	Годы, колич.	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, мБС
р. Днепр	Речица	1895–2015	117	1168	58 200	114,47
	Могилев	1931–2015	81	1496	20 800	138,40
	Орша	1882–2015	126	1588	18 000	148,96
	Жлобин	1936–2015	75	1285	30 300	122,65
р. Сож	Гомель	1900–2015	111	105	38 900	113,91
	Славгород	1897–2015	113	296	17 700	128,19
	Кричев	1976–2016	39	412	10 200	138,95
р. Проня	Летяги	1932–2015	65	26	4570	132,12

Основными исходными материалами по величине атмосферных осадков и температуре атмосферного воздуха, которые являются одними из главных динамических факторов формирования речного стока, в работе послужили данные Республиканского гидрометеорологического центра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Хронология ведения метеорологических наблюдений на территории исследований

Артезианский бассейн	Ежемесячные данные		Срочные данные	Суточные данные
	осадки	среднемесячная температура		
Оршанский	с 1891–1905 гг. с перерывом 1933(41)–1945 по 2014 г.	с 1905 г. с перерывом 1933(41)–1945 по 2014 г.	1961–2014 гг.	1955–2014 гг.

Гидрогеологические условия. На территории Оршанского артезианского бассейна в толще осадочных пород выделяется несколько десятков водоносных горизонтов и комплексов, отличающихся стратиграфическими объемами, литологическим содержанием, пространственной структурой, водонасыщенностью и др. В зоне активного водообмена распространены водоносные горизонты и комплексы четвертичных, меловых и девонских отложений [1, 3].

Четвертичный водоносный комплекс. Четвертичные отложения представлены чередованием моренных суглинков и супесей с водно-педниковыми, озерно-болотными и аллювиальными образованиями – песками, супесями, торфами. Мощность этих отложений изменяется от нескольких до 300 м и более, составляя в среднем 80 м. Наименьшие мощности наблюдаются на низинах и равнинах (20–60 м), наибольшие – на возвышенностях (120–240 м, максимум 325 м). Выделяются водоносные горизонты и подкомплексы в надморенных, межморенных и подморенных отложениях и разделяющие их слабопроницаемые толщи моренных отложений. Водовмещающие отложения отличаются пестротой и разнообразием литологического состава, частым выклиниванием не выдержанных по площади и в разрезе водовмещающих и слабопроницаемых пород, что обуславливает условия гидравлической связи между ними и образование единого водоносного комплекса четвертичных отложений.

Первый от поверхности горизонт грунтовых вод распространен в разновозрастных покровных отложениях. Главным образом это флювиогляциальные отложения поозерского, сожского и днепровского оледенения, верхнечетвертичные и современные аллювиальные, озерно-аллювиальные и озерно-болотные образования. Мощность горизонта грунтовых вод изменяется от 0 до 30 м составляет в среднем 5–15 м [1, 3]. Основными водоносными подкомплексами четвертичных отложений, содержащими напорные воды, являются межморенные сожско-поозерский, днепровско-сожский и березинско-днепровский (табл. 3).

Сожско-поозерский водоносный подкомплекс распространен в северной части бассейна, до границы поозерского оледенения. Глубина залегания кровли изменяется от нескольких до 90 м, мощность водовмещающих отложений от 3 до 50 м, составляя в среднем 10–20 м.

Днепровско-сожский водоносный комплекс распространен на большей части Оршанского артезианского бассейна. Глубина залегания кровли изменяется от 2–40 м в долинах рек, до 100–195 м на водоразделах. Мощность водовмещающих отложений достигает 50–90 м, преобладают значения 10–20 м.

Березинско-днепровский водоносный подкомплекс распространен почти на всей территории бассейна. Глубина залегания комплекса в северной части площади достигает 100–200 м, в центральных районах – 70–100 м, на юге – от 20 до 80 м. Мощность изменяется от 2–10 до 100–170 м и более в древних погребенных долинах.

Моренные отложения, разделяющие водоносные подкомплексы, отличаются площадной невыдержанностью как по мощности, так и по литологическому составу. Мощность морен составляет в среднем 10–30 м, но в доледниковых долинах возрастает от 50–60 до 100–120 м. Сожская морена на значительной территории имеет мощности 10–20 м, в районе возвышенностей – более 40 м. Днепровская морена – преимущественно 10–20 м, островками – более 20 м. Березинская морена – 10–20 м, на окраинах распространения – менее 10 м, редкими мелкими

фрагментами – более 20 м. Моренные отложения представлены в основном суглинками и супесями, часто с гравием, галькой и валунами, линзами и прослоями песка. Нередко морена размыта и замещена песками, через которые осуществляется активная гидравлическая связь межморенных водоносных подкомплексов между собой, с грунтовыми и поверхностными водами. Верхним водоупором межморенных подкомплексов служат моренные суглинки, супеси и озерно-ледниковые глины: на севере – поозерского оледенения, на остальной площади – сожского и днепровского оледенений. Нижним водоупором в северной части республики являются морены сожского и днепровского оледенений, в центральной и южной – днепровского, местами березинского оледенений. На участках отсутствия моренных отложений, нижним водоупором в северной части являются отложения верхнего и среднего девона, представленные глинами, не имеющие сплошного распространения. По всей территории исследований четвертичный комплекс имеет непосредственную гидравлическую связь с нижезалегающими комплексами.

Пьезометрические уровни межморенных водоносных подкомплексов на водораздельных участках имеют максимальные абсолютные отметки, но устанавливаются ниже уровней грунтовых вод. К речным долинам наблюдается снижение уровней напорных вод до минимальных отметок, но, тем не менее, превышающих отметки уровней грунтовых и поверхностных вод. Это свидетельствует о том, что питание напорных водоносных комплексов происходит на возвышенных участках за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетекания из горизонта грунтовых вод, а разгрузка – в долинах рек. В целом поверхность подземных вод повторяет в сглаженном виде современный рельеф, а вся четвертичная толща может рассматриваться как единая гидродинамическая система, в которой подземные воды всех водоносных горизонтов и комплексов формируют единый поток. Пьезометрические уровни устанавливаются на глубинах от долей метра до 30 м, на водоразделах – до 50 м и более, а в долинах рек поднимаются выше поверхности земли на 0,8–7,0 м (Неман, Березина, Двиноса, Улла и др.).

Разнообразие гранулометрического состава водовмещающих песков, изменчивость мощности обуславливают пестроту водообильности четвертичного водоносного комплекса. Удельные дебиты скважин колеблются в большом диапазоне от 0,01 до 1,1 л/с, местами достигая 5–10 л/с, чаще встречаются 0,2–0,4 л/с. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород меняется по площади и в разрезе в пределах 0,6–20,0 м/сут. Водопроницаемость по площади изменяется: для сожско-поозерского подкомплекса от 40 до 320 м²/сут, преобладают значения 100–200 м²/сут; для днепровско-сожского – от 10 до 500 м²/сут, составляя чаще 120–230 м²/сут; для березинско-днепровского – от 50–100 до 200–300 м²/сут, преобладают значения 50–70 м²/сут.

Т а б л и ц а 3. Характеристика водоносных комплексов четвертичных отложений

Характеристики комплекса	Сожско-поозерский	Днепровско-сожский	Березинско-днепровский
Глубина залегания кровли, м	2–90	2–40 в долинах рек до 100 м и более на водоразделах	1–170
Мощность водовмещающих отложений, м	3–50 (среднее 10–20)	2–74 (среднее 15–30)	от 2–10 до 100–170 м и более в древних погребенных долинах
Пьезометрические уровни, м	1–55 м (в долинах рек иногда до 1,5 м выше поверхности земли)	1–6 м в долинах рек и до 30–53 м на водоразделах	1–78 м (в долинах рек иногда до 2,5 м выше поверхности земли)
Величина напора над кровлей, м	80	1–90	1–134
Коэффициенты фильтрации, м/сут	3–10	0,2–50 (средняя 5–15)	0,2–26
Удельные дебиты скважин, л/с	0,02–3,5	0,01–9,5	0,01–4,3

По химическому составу и общей минерализации воды напорного четвертичного комплекса на всей площади распространения относятся к пресным, гидрокарбонатным кальциево-магниевым с минерализацией 0,1–0,5 г/л. Исключение составляют участки антропогенного загрязнения и разгрузки минерализованных вод в долинах некоторых рек (Зап. Двина, Припять, Днепр, Березина, Птичь и др.). Как правило, в этих водах отмечается повышенное содержание железа и недостаток фтора, согласно требованиям СанПиН 10-124 РБ99 на питьевые воды.

Методы и методика исследования. Задача выявления климатогенных изменений речного и подземного стока рек Оршанского артезианского бассейна решена в работе с применением возможностей анализа данных Microsoft Excell в несколько этапов:

- анализ природных (геоморфологических, геологических, гидрогеологических, гидрометеорологических и др.) условий формирования уровенного режима водотоков территории исследований;

- массивы эмпирических данных температуры атмосферного воздуха, количества атмосферных осадков и расходов рек приведены в соответствие с требованиями однородности, достоверности и репрезентативности;

- синхронность изменений наблюдаемых показателей, а также тесноты связи предикторов и предиктантов определена с помощью корреляционного анализа с использованием данных за максимально возможный период наблюдений;

- проведено построение одно- и двухфакторных регрессионных моделей, выполнена их проверка на адекватность, точность, а также статистическую значимость коэффициентов и автокорреляцию остатков моделей;

- анализ трендов.

Выявлению климатообусловленных трендов расходов рек и их подземного питания территории исследований предшествовало определение динамической нормы в рядах наблюдений. Методические подходы определения динамической нормы в рядах наблюдений описаны ниже. Для определения наличия тренда временного ряда используется метод проверки разностей средних уровней. Разделив исходный ряд из N членов на два с примерно одинаковым числом членов ряда n_1 и n_2 ($N = n_1 + n_2$), для каждой из частей вычисляются средние значения и дисперсия.

Проверка гипотезы об однородности дисперсий частей ряда проводится с помощью критерия Фишера:

$$F = \begin{cases} \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, & \text{если } \sigma_1^2 > \sigma_2^2 \\ \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}, & \text{если } \sigma_2^2 > \sigma_1^2 \end{cases} \quad (1)$$

Если полученное значение F меньше табличного $F_{\text{табл}}$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается и вычисляется t -критерий Стьюдента. Если F больше или равно табличному значению $F_{\text{табл}}$, то гипотеза об однородности дисперсий отклоняется. Определение части дисперсии временного ряда, выбираемой динамической нормой ряда, определяется как $\frac{\sigma_{\text{тр}}^2}{\sigma^2} 100\%$.

В качестве статистической модели анализируемого временного ряда в случае принятия гипотезы о линейном тренде следует рассматривать выражение:

$$u(t) = a + bt, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты.

Алгебраически можно показать, что при переходе от значений ряда к их разностям исключается влияние его изменений. Если тренд представлен выражением (2), то при обозначении последовательных моментов времени через (t_1, t_2, \dots, t) получено [4]:

$$\begin{array}{l} t = 1 \quad u(1) = a + b + d_{u1} \\ t = 2 \quad u(2) = a + 2b + d_{u2} \\ \dots \dots \dots \\ t = n \quad u(n) = a + nb + d_{un} \end{array} \quad (3)$$

Первые разности представляют собой:

$$\begin{array}{l} \Delta_1' = u(2) - u(1) = b + (d_{u2} + d_{u1}); \\ \Delta_2' = u(3) - u(2) = b + (d_{u3} + d_{u2}); \\ \dots \dots \dots \\ \Delta' = u(n) - u(n-1) = b + (d_{un} + d_{u(n-1)}) \end{array} \quad (4)$$

Так, из (4) видно, что во всех разностях присутствует одна и та же константа b , т.е. колебания рассчитанных разностей Δ зависят только от d_u , и влияние общей тенденции (тренда) исключается.

Оценка представительности климатообусловленных трендов в изменении расходов рек Оршанского артезианского бассейна базировалась на построении регрессионных моделей связи последних с основными предикторами. Задача регрессионного анализа – описание связей между исследуемыми величинами в виде уравнений или моделей связи $y = f(x)$. Для построения регрессионных моделей в работе применен метод наименьших квадратов, т.е. $y = f(x)$ строится так, чтобы сумма квадратов отклонений между модельными и фактическими величинами была минимальной.

Построение регрессионной модели представляет собой итерационный процесс, направленный на поиск эффективных независимых переменных (эффективных предикторов).

Задача построения качественного уравнения регрессии, соответствующего выборочным (эмпирическим) данным и целям исследования, является достаточно сложным и многоступенчатым процессом. Его можно разбить на три этапа: 1) выбор формулы уравнения регрессии; 2) определение параметров выбранного уравнения; 3) анализ качества уравнения и проверка адекватности уравнения эмпирическим данным, проверка статистической значимости коэффициентов, проверка остатков на наличие автокорреляционных связей членов ряда.

В общем случае при построении парной линейной регрессионной модели $y = a_0 + a_1x$ доказано, что Q_e будет минимальна если a_0 и a_1 будут найдены путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i, \end{cases} \quad (5)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – значения некоторой величины; y_1, y_2, \dots, y_n – соответствующие им значения y ;

$Q_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, Q_e – сумма квадратов ошибки или остаточная сумма квадратов.

В работе выполнена проверка адекватности и точности моделей, статистической значимости коэффициентов моделей и проверка остатков на наличие автокорреляции с помощью критерия Дарбина–Уотсона. Проверка модели на автокоррелированность остатков проводилась при предположении, что при наличии автокорреляции остатков верно соотношение:

$$e_t = \rho e_{t-1} + v_t, \quad (6)$$

где e_t – остатки; ρ – коэффициент автокорреляции остатков; v_t – независимые случайные величины. Если $\rho = 0$, то отсутствует автокорреляция остатков и оценка параметров методом наименьших квадратов является наилучшей линейной несмещенной оценкой. Если $\rho \neq 0$, то оценка параметров методом наименьших квадратов является смещенной и выводы по модели не корректны. Таким образом, при тестировании на автокорреляцию остатков выдвигается нулевая гипотеза $H_0: \rho = 0$ против альтернативной гипотезы $H_1: \rho \neq 0$.

Статистика Дарбина–Уотсона определяется соотношением:

$$D - W = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}. \quad (7)$$

Критерий Дарбина–Уотсона и коэффициент автокорреляции остатков связаны между собой соотношением (рис. 2):

$$D - W \cong 2(1 - \rho).$$



Рис. 2. Соотношение критерия Дарбина–Уотсона и коэффициента автокорреляции

Как видно из рис. 2, в случае отсутствия автокорреляции $D - W = 2$; при положительной автокорреляции стремится к нулю, а при отрицательной – к 4:

$$\begin{cases} \rho = 0 \Rightarrow D - W = 2; \\ \rho = 1 \Rightarrow D - W = 0; \\ \rho = -1 \Rightarrow D - W = 4. \end{cases}$$

На практике применение критерия Дарбина–Уотсона основано на сравнении величины $D - W$ с теоретическими значениями d_L и d_U для заданного числа наблюдений n , количества независимых переменных модели и заданного уровня значимости α :

- 1) если $D - W < d_L$, то гипотеза о независимости случайных отклонений отвергается (следовательно, присутствует положительная автокорреляция);
- 2) если $D - W > d_U$, то гипотеза не отвергается;
- 3) если $d_L < D - W < d_U$, то нет достаточных оснований для принятия решений.

Когда расчетное значение $D - W$ превышает 2, то с d_L и d_U сравнивают не сам коэффициент $D - W$, а выражение $(4 - D - W)$.

Для рек Оршанского артезианского бассейна – Днепр, Сож, Проня – выполнена количественная оценка доли различных видов питания в формировании стока с помощью графического расчленения гидрографа по видам питания (рис. 3) [5, 6].

Реки Оршанского артезианского бассейна характеризуются наличием постоянной или временной гидравлической связи речных и грунтовых вод на подъеме половодья; в результате подпора рекой грунтовых вод подземное питание уменьшается и достигает минимума при наивысшем уровне воды в реке (рис. 3, точка 3). При длительном стоянии высоких уровней, что более свойственно крупным рекам, происходит фильтрация речных вод в берега («отрицательное подземное питание», рис. 3, точка 5), а на спаде половодья или в начале межени эти воды возвращаются в реку (береговое регулирование речного стока). Согласно предложенной С.С. Белецким, В.В. Дроздом, Б.В. Поляковым, Б.И. Куделиным, К.В. Воскресенским, О.В. Поповым схеме расчленения гидрографа в момент пика половодья условно принята величина подземного питания, равная нулю (рис. 3, точка 4) [5, 6]. Подземная составляющая речного стока рек Оршанского артезианского бассейна изменяется в пределах 35–40 % (рис. 4).

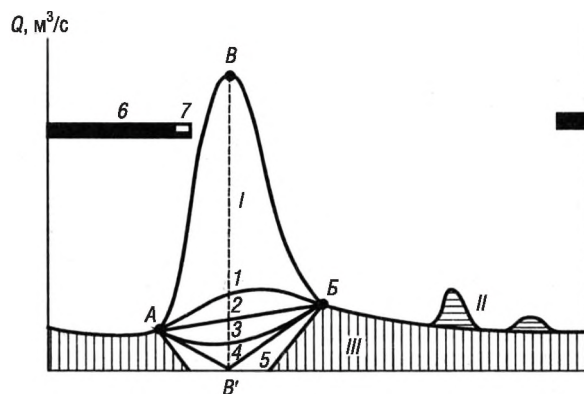


Рис. 3. Схема расчленения гидрографа реки по видам питания [5, 6]. Питание: I – снеговое, II – дождевое, III – подземное; А, Б и В – начало, конец и пик половодья; 1–5 – линии, разделяющие снеговое и подземное питание в период половодья при различном характере взаимодействия речных и грунтовых вод (пояснения см. в тексте); 6 – ледостав; 7 – ледоход

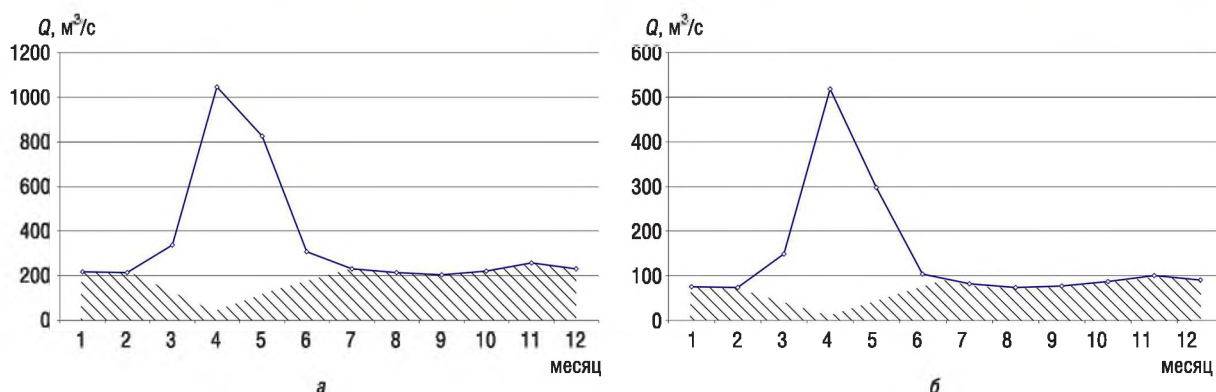


Рис. 4. Гидрограф стока р. Днепр с выделением подземного питания на постах Речицы (а) и Могилева (б)

Результаты и их обсуждение. Статистически значимых трендов в рядах наблюдений за среднегодовым расходом рек Днепр, Сож, Проня не выявлено, хотя положительная тенденция в изменении расходов усматривается. В многолетнем разрезе произошло изменение внутригодового распределения стока, уменьшились наибольшие расходы воды и объем стока весеннего половодья. На современном этапе проявилось перераспределение стока внутри года, особенно для зимних и весенних месяцев. На территории исследований заметно увеличились средние месячные расходы воды в январе–феврале и представлены линейные тренды в рядах наблюдений за расходом рек Оршанского артезианского бассейна в январе (рис. 5, табл. 4).

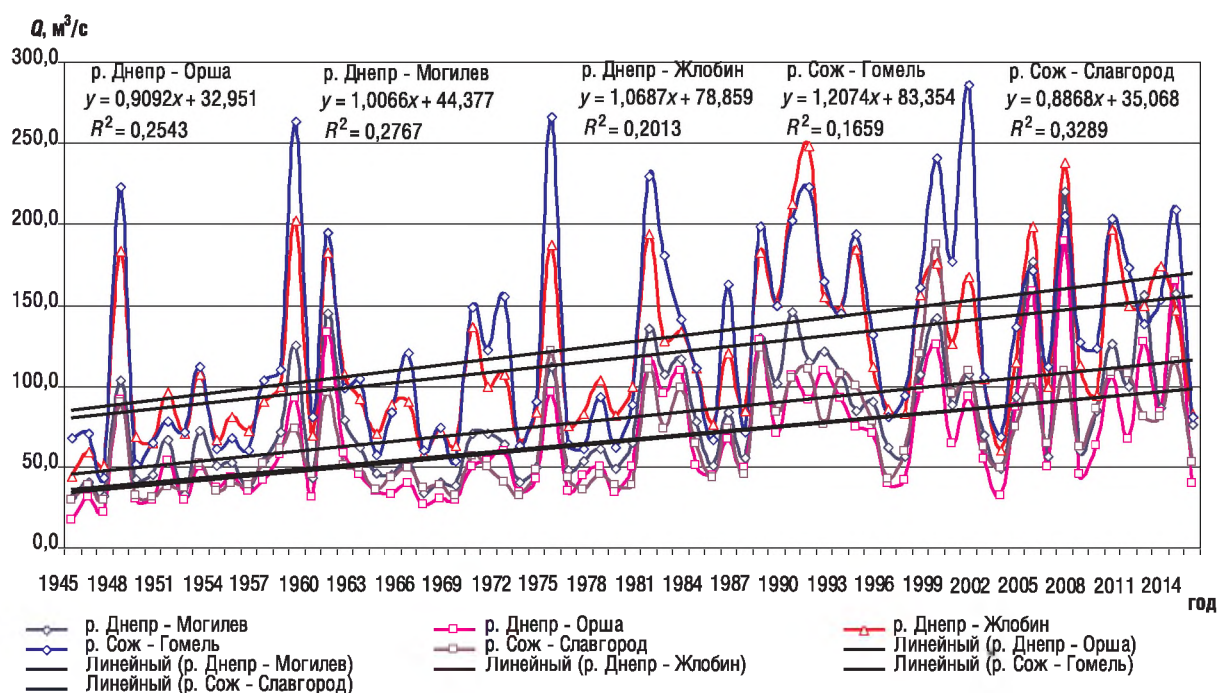


Рис. 5. Среднемесячные расходы воды в январе рек Днепр, Сож

Как видно из табл. 4, на всей территории бассейна отмечено снижение стока за весеннее половодье и уменьшение его доли в годовом стоке. Сток весенних месяцев (апрель, в р. Днепр и май) на современном этапе значительно снизился, мощность отрицательного тренда составила: р. Днепр – Речица (апрель – 20,1, май – 15,6 %), Могилев (апрель – 19,1 %), Орша (апрель – 9,3 %), Жлобин (апрель – 22,0 %); р. Сож – Гомель (апрель – 14,7 %), Славгород (апрель – 13,0 %), р. Проня – Летяги (апрель – 5,4 %), в среднем 15,0 %. Расход осенних месяцев рек территории исследований статистически значимых изменений не выявил.

Таблица 4. Доля дисперсии, выбираемая динамической нормой временных рядов наблюдений за расходом рек Оршанского артезианского бассейна, %

Пост	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
р. Днепр – Речица	16,7	17,3	3,0	20,1	15,6	1,2	0,5	0,7	0,4	1,1	0,4	9,2	5,2
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	убывание	–	–	–	–	–	–	рост	–
р. Днепр – Могилев	32,0	28,1	4,0	19,1	3,4	6,1	0,9	0,5	1,9	2,7	4,7	9,7	0,3
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	–	–	–	–	–	–	рост	–
р. Днепр – Орша	32,6	21,4	7,2	9,3	4,6	4,0	0,5	1,1	3,6	0,9	0,9	7,6	0,1
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	–	–	–	–	–	–	–	–
р. Днепр – Жлобин	23,5	22,7	5,6	22,0	6,7	15,8	2,8	1,0	4,5	4,7	6,4	12,7	0,4
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	рост	–	–	–	–	–	рост	–
р. Сож – Гомель	15,1	22,6	2,7	14,7	1,2	1,2	1,3	0,1	0,1	1,3	0,5	3,5	1,1
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	–	–	–	–	–	–	–	–
р. Сож – Славгород	35,6	23,3	1,8	13,0	0,5	1,4	0,1	0,0	0,2	2,2	1,0	8,0	0,4
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	–	–	–	–	–	–	–	–
р. Проня – Летяги	29,6	15,2	0,2	5,4	0,7	0,0	1,9	0,0	0,0	0,9	0,3	11,9	0,2
Динамическая норма ряда	рост	рост	–	убывание	–	–	–	–	–	–	–	рост	–

Максимальными мощностями положительных трендов (от 15,1 % р. Сож – Гомель до 35 % р. Сож – Славгород) характеризуется зимний сток, как видно из табл. 4, т.е. можно говорить о значительном увеличении доли зимнего стока в годовом распределении для рек Оршанского артезианского бассейна.

При построении двухфакторных линейных регрессионных моделей связи расхода рек в январе в качестве предикторов выступали величина атмосферных осадков за зимний период и температура атмосферного воздуха, осредненная за период декабрь–январь. При построении двухфакторных линейных регрессионных моделей связи расхода рек весеннего половодья в качестве предикторов выступали величина атмосферных осадков за период март–апрель и температура атмосферного воздуха, осредненная за тот же период. Для принятия решения о наличии автокорреляции в остатках построенных двухфакторных моделей связи с количеством наблюдений 70, статистика Дарбина–Уотсона на уровне значимости 0,05 равна: $d_L = 1,55$, $d_U = 1,67$. Результаты построения приведены в табл. 5.

Таблица 5. Оценка качества двухфакторных регрессионных моделей

Показатель	Днепр – пост Могилев		Днепр – пост Орша		Днепр – пост Жлобин	
	январь	весеннее половодье	январь	весеннее половодье	январь	весеннее половодье
Оценка точности модели (R^2)	0,44	0,14	0,42	0,15	0,42	0,19
Проверка адекватности модели	0,00031	0,019	$2,1 \cdot 10^{-7}$	0,0049	0,0052	0,023
Проверка статистической значимости коэффициентов модели (P)	$P_1=0,001$ $P_2=0,004$	$P_1=0,007$ $P_2=0,774$	$P_1=3,45 \cdot 10^{-6}$ $P_2=0,011$	$P_1=0,008$ $P_2=0,032$	$P_1=0,0008$ $P_2=0,006$	$P_1=0,007$ $P_2=0,391$
Критерий Дарбина–Уотсона	2,18	2,36	1,92	2,02	2,12	2,38
Решение	Автокорреляция отсутствует	Область неопределенности	Автокорреляция отсутствует	Автокорреляция отсутствует	Автокорреляция отсутствует	Область неопределенности
	Сож – пост Гомель		Сож – пост Славгород			
	январь	весеннее половодье	январь	весеннее половодье	январь	весеннее половодье
Оценка точности модели (R^2)	0,41	0,23	0,45	0,21		
Проверка адекватности модели	$7,8 \cdot 10^{-9}$	0,00019	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,0075		
Проверка статистической значимости коэффициентов модели (P)	$P_1=6,6 \cdot 10^{-11}$ $P_2=0,0064$	$P_1=0,008$ $P_2=0,054$	$P_1=7,6 \cdot 10^{-6}$ $P_2=0,001$	$P_1=0,003$ $P_2=0,457$		
Критерий Дарбина–Уотсона	2,01	2,41	1,96	2,34		
Решение	Автокорреляция отсутствует	Область неопределенности	Автокорреляция отсутствует	Область неопределенности		

Как видно из табл. 5, более высоким значением показателя точности модели, принимающим значения от 0,42 до 0,45, характеризуются двухфакторные модели связи расхода января месяца с осадками и температурой, тогда как этот показатель для весеннего половодья изменяется от 0,14 до 0,23. Таким образом, можно утверждать, что для зимних расходов рек от 42 до 44 % изменений величины Y обусловлены изменениями статистически значимых коэффициентов моделей. Расчетный уровень значимости всех моделей меньше заданного 0,05, что свидетельствует о том, что регрессионные модели являются значимыми. Автокорреляция в остатках не выявлена для всех двухфакторных моделей зимних расходов рек, регрессионные модели для весеннего половодья не показали 100%-ное отсутствие автокорреляции в остатках. Проверка статистической значимости коэффициентов моделей показала, что статистически значимым во всех регрессионных моделях является коэффициент A_1 – коэффициент при независимой переменной «температура атмосферного воздуха соответствующего периода», коэффициент A_2 – коэффициент при независимой переменной «величина атмосферных осадков соответствующего периода» является статистически значимым в регрессионных моделях для расходов весеннего половодья.

Выводы. На территории Оршанского артезианского бассейна выявлено статистически значимое снижение стока за весеннее половодье и уменьшение его доли в годовом стоке. Сток весенних месяцев (апрель, в р. Днепр и май) на современном этапе значительно снизился, мощность отрицательного тренда составила: р. Днепр – Речица (апрель – 20,1, май – 15,6 %), Могилев (апрель – 19,1 %), Орша (апрель – 9,3 %), Жлобин (апрель – 22,0 %); р. Сож – Гомель (апрель – 14,7 %), Славгород (апрель – 13,0 %), р. Проня – Летьяги (апрель – 5,4 %), в среднем составляет 15,0 %. Расход воды рек территории исследований в осенние месяцы оказался статистически незначимым.

Выявлено значительное увеличение доли зимнего стока в годовом распределении для рек Оршанского артезианского бассейна. В результате построения двухфакторных регрессионных моделей связи зимних расходов и расходов воды весеннего половодья установлено, что увеличение доли зимнего стока рек связано с повышением температуры воздуха холодных месяцев, с увеличением частоты оттепелей, прохождением зимних паводков. Снижение доли весеннего стока рек обусловлено снижением величины твердых атмосферных осадков в виде снега, повышением температуры воздуха зимой, которое сопровождается уменьшением предвесенних запасов воды.

Список использованных источников

1. Махнач, А. С. Геология Беларуси / А. С. Махнач, Р. Г. Гарецкий, А. В. Матвеев. – Минск: Институт Геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Описание рек и озёр. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Т. 5, ч. I. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 1107 с.
3. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон; пер. И. Б. Журбенко. – М.: Мир, 1971. – 757 с.
4. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э. А. Вуколов. – М.: Форум, 2004. – 464 с.
5. Белецкий, С. С. Опыт оценки подземного стока в реки БССР / С. С. Белецкий // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. геологоразведоч. ин-т ; науч. ред. А. П. Лавров. – Минск, 1974. – С. 60–75.
6. Дрозд, В. В. Водные ресурсы Беларуси: методология, структура, оценка, прогноз / В. В. Дрозд. – Минск: Ковчег, 2010. – 202 с.

Поступила 20.10.2021