

## ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕК БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

А.А. Волчек, В.В. Лукша<sup>1</sup>

Отдел проблем Полесья НАН Беларуси  
<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет  
г. Брест, Беларусь

*Statistic analysis of the hydrological information permits to work out the models for determination the average monthly and annual river flow of Belarusian Polesie. Prognosis of changing of the amount of river flow under the human and climate influence has been received.*

Рядом исследователей [1, 2 и др.] высказывается предположение об изменениях глобального климата в ближайшее десятилетие, которые проявятся в совокупности региональных его изменений различных временных и пространственных масштабов. Водный режим рек, являясь очень чувствительным к изменению большинства климатических факторов, также претерпит некоторые трансформации. В этой связи разработка прогноза изменения климата в конкретном регионе должна осуществляться с учетом глобальных изменений и макропроцессов на всей планете [1]. Одной из первых работ в Беларуси посвященных изменению водного режима рек является статья А.Г. Гриневич и В.Н. Плужникова [2], в которой была обозначена рассматриваемая проблема, предложены методологические подходы к ее решению, получены первые оценочные результаты и намечены задачи дальнейших исследований.

Нами предпринята попытка оценить возможные изменения водного режима рек Белорусского Полесья, используя элементы водного баланса (максимально возможное испарение, суммарное испарение, климатический сток) при прогнозируемом ходе изменения климата и антропогенных воздействий на водосборы рек.

Для оценки возможных изменений водных ресурсов рек Белорусского Полесья в зависимости от тех или иных гипотез антропогенного изменения климата и воздействия на характеристики водосборов была разработана многофакторная модель, в основе которой лежит стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом аспекте. А.Г. Гриневич и В.Н. Плужниковым [2] было отмечено, что решение уравнения водного баланса возможно с использованием результатов воднобалансовых расчетов с привлечением метеорологической информации за месячные интервалы времени.

Среднегодовое климатическое испарение возможно рассчитать с использованием метода гидролого-климатических расчетов профессора В.С. Мезенцева [3]:

$$U_{\text{кл}} = X - E_c, \text{ или } U_{\text{кл}} = X - E_0 \left( 1 + \left( \frac{\frac{E_0}{W_{\text{нв}}} + V^{1-r}}{\frac{X}{W_{\text{нв}}} + V} \right)^{-n} \right)^{-1/n} \quad (1)$$

где  $U_{\text{кл}}$  – климатический сток, который рассчитывается по специальной компьютерной программе с использованием исходных данных (осадки, дефициты влажности воздуха, сумма температур за вегетационный период) по ближайшей к центру тяжести водосбора реки метеостанции, мм;  $X$  – атмосферные осадки, мм;  $E_c$  – суммарное испарение, мм;  $E_0$  – максимально возможное испарение, мм;  $W_{\text{нв}}$  – значение наименьшей влагоемкости деятельного слоя почвы, мм;  $V$  – относительная влажность почвы на начало расчетного

интервала;  $r$  – параметр, зависящий от водно-физических свойств и механического состава почвогрунтов, значение которого в нашем численном эксперименте принималось 1,5;  $n$  – параметр, учитывающий гидравлические условия стока ( $n=3,0$ ).

Исходя из современных представлений о формировании стока, используя методы математической статистики и компьютерных технологий, нами разработана следующая модель формирования речного стока с использованием взаимосвязи климатического и руслового стока малых рек Белорусского Полесья:

$$Y_p = Y_{кл} \cdot \frac{\varphi^{n_2} \cdot \lambda^{n_3} \cdot (L+1)^{n_4} \cdot I_{ср.р.}^{n_5} \cdot H_{ср.}^{n_6} \cdot (F_{заб.л.} + F_{сух.л.} + 1)^{n_9} \cdot \rho^{n_{10}}}{(A + A_{кр})^{n_1} \cdot (F_{оз.} + 1)^{n_7} \cdot (F_{бол.} + 1)^{n_8} \cdot (F_{расп.} + 1)^{n_{11}}} \cdot A \cdot 10^3 / t; \quad (2)$$

где  $Y_p$  – величина речного стока м<sup>3</sup>/с;  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $A_{кр} = \frac{0,98}{\rho^2} + \frac{1,5 \cdot L}{\sqrt{I_{ср.р.}}}$  –

первая критическая площадь, т. е. та площадь водосбора, при которой водоток начинает получать подземное питание, км<sup>2</sup> [4];  $\varphi$ ,  $\lambda$  – географическая широта и долгота центра тяжести водосбора (градусы, минуты), соответственно;  $L$  – расстояние от истока реки, км;  $I_{ср.р.}$  – средний уклон основного тальвега реки, промилле;  $H_{ср.}$  – средняя высота водосбора, м;  $F_{оз.}$ ,  $F_{бол.}$ ,  $F_{заб.л.}$ ,  $F_{сух.л.}$  – площадь, занятая озерами, болотами, заболоченным и сухим лесом, % к площади водосбора ( $A$ );  $\rho$  – коэффициент густоты речной сети, км/км<sup>2</sup>;  $F_{расп.}$  – распаханность водосбора, %;  $t$  – период осреднения, с.

Коэффициенты  $n_1 \dots n_{11}$  (показатели степени), полученные с использованием компьютерной программы статистических расчетов «Statistica 5.5», в зависимости от месяца года приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения показателей степени  $n_1 \dots n_{11}$  в уравнении (2)

Месяц	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$	$n_7$	$n_8$	$n_9$	$n_{10}$	$n_{11}$
Апрель	-0,148	-2,268	0,860	0,034	-0,132	1,446	-0,222	0,048	0,174	-0,058	-0,239
Май	-0,120	2,172	-1,912	0,094	0,042	-0,471	0,093	0,051	0,311	0,351	-0,080
Июнь	-0,024	2,723	-0,942	0,031	0,215	-1,638	0,084	0,025	0,235	0,122	-0,077
Июль	0,026	1,247	-0,588	-0,074	0,248	-0,930	0,132	0,063	0,320	0,195	0,113
Август	-0,121	3,731	-1,567	0,168	0,030	-1,755	-0,012	-0,015	0,017	0,597	-0,229
Сентябрь	-0,269	2,837	-1,336	0,368	-0,200	-0,766	-0,070	-0,019	-0,179	0,807	-0,544
Октябрь	-0,103	1,434	-1,727	0,148	-0,136	0,183	-0,106	0,084	-0,018	0,543	-0,191
Теплый период	-0,118	0,504	-0,374	0,107	-0,022	-0,056	-0,063	0,042	0,122	0,248	-0,147
Год	-0,103	0,097	-0,711	0,046	-0,024	0,356	-0,045	0,055	0,122	0,064	-0,025

Проверка модели на 15 независимых створах Белорусского Полесья (не входящих в разработку модели) показала хорошую сходимость рассчитанных и измеренных месячных и годовых расходов (рисунок 1), что позволяет использовать разработанную модель для практических расчетов.

В настоящее время существует три основных направления прогнозирования изменения климата [5]:

– сложные модели общей циркуляции атмосферы, которые удовлетворительно описывают общие закономерности изменений климата при больших потеплениях, при этом их детали прогнозируются весьма проблематично;

– палеогеографические аналоги в климатах прошлого и настоящего, как правило, никогда не бывают полными из-за изменений в геологическом прошлом географических и геофизических условий важных для климата исследуемой территории;

– данные инструментальных наблюдений, показывающие закономерности формирования современной климатической системы, которые важны для оценки условий, складывающихся на начальном этапе глобального потепления, происходящего в настоящее время. При этом эти модели не всегда статистически надежны и могут не от-

отражать особенностей поведения климатической системы, возникших при быстром потеплении.

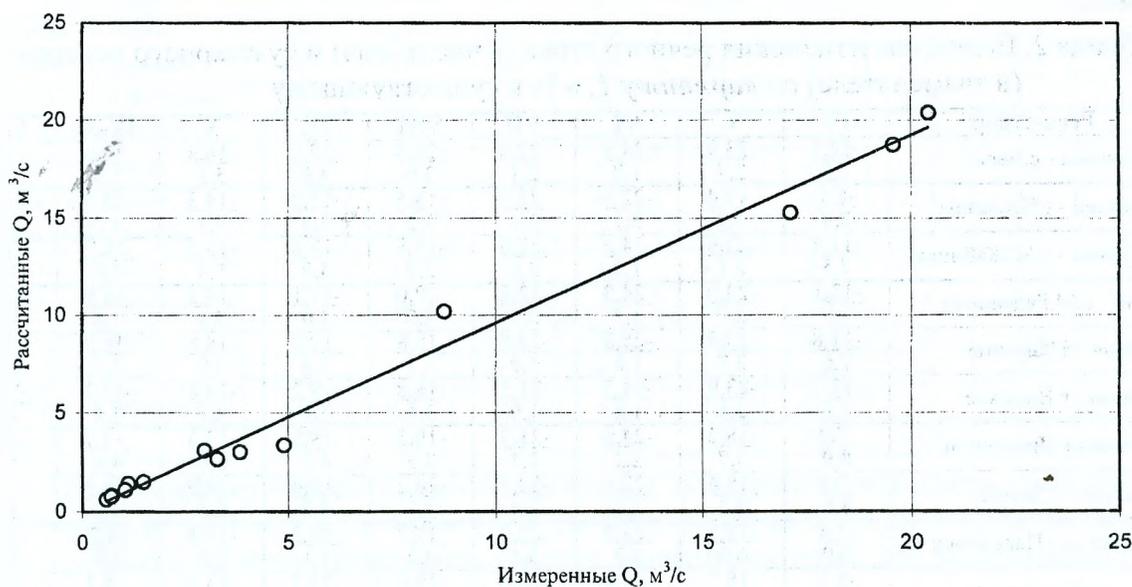


Рисунок 1. Сопоставления измеренных и рассчитанных по разработанной модели значений годового стока рек Белорусского Полесся ( $R=0,994$ ).

Исходя из литературных данных [2], можно полагать, что для зоны Белорусского Полесся ожидается увеличение температуры воздуха на  $0,3...3^{\circ}\text{C}$ , а изменение атмосферных осадков (увеличение или уменьшение) на  $0...15\%$  от современного уровня.

Для проведения численного эксперимента возможного антропогенного влияния на водные ресурсы рек Белорусского Полесся нами отобраны 12 малых рек Брестской области. Основываясь на анализе существующих в настоящее время оценках возможного антропогенного изменения климата и водосборов рек, численный эксперимент проведен по следующим вариантам:

**вариант 1** – средняя годовая температура воздуха увеличивается на  $2^{\circ}\text{C}$  по сравнению с современным уровнем при неизменном количестве атмосферных осадков;

**вариант 2** – уменьшение годовых атмосферных осадков на  $10\%$  с неизменной температурой воздуха;

**вариант 3** – годовые атмосферные осадки уменьшаются на  $10\%$ , а средняя годовая температура воздуха увеличивается на  $2^{\circ}\text{C}$ ;

**вариант 4** – заболоченность (осушение) и залесенность (вырубка леса) водосбора уменьшаются, а густота речной сети (создание мелиоративных систем) и распаханность (расширение площадей под сельскохозяйственные культуры) увеличиваются на  $5, 10, 20$  и  $30\%$  от существующих в настоящее время при неизменных климатических условиях.

Использование вышеперечисленных 4 вариантов позволило комплексно оценить трансформацию речного стока с точки зрения климатических условий (1,2,3 варианты) и антропогенного воздействия на водосборы рек (хозяйственная деятельность человека).

Изменения водных ресурсов в результате антропогенных воздействий выражаются далее в относительных величинах – в процентах по отношению к современным условиям, т. е. рассчитывается относительное увеличение или уменьшения речного стока.

Исходя из расчетов, на основе указанных выше уравнений с принятыми гипотезами, сделаны следующие выводы:

– по первому варианту (увеличение температуры на 2°C) речной сток уменьшится в среднем на 10 %, а суммарное испарение может увеличиться в среднем до 4,7 % (таблица 2).

Таблица 2. Величины изменения речного стока (в числителе) и суммарного испарения (в знаменателе) по варианту 1, в % к существующему

Река-створ	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IV-X	Год
Копаявка - с.Черск	-12,1 7,5	-23,9 2,7	-24,8 1,7	-22,6 2,1	-20,0 3,0	-17,1 4,0	-14,3 5,3	-16,9 3,6	-10,7 4,2
Мухавец - г.Пружаны	-8,1 8,4	-18,4 5,2	-22,0 3,1	-22,0 2,4	-19,3 3,2	-17,0 3,9	-14,3 5,7	-15,3 4,2	-10,7 4,8
Жабинка - с.М.Жабинка	-11,8 7,5	-23,6 2,7	-24,5 1,7	-22,0 2,0	-19,8 2,9	-17,6 4,0	-15,6 5,3	-16,7 3,5	-10,7 4,3
Рыта - с.М.Радваничи	-12,1 7,5	-23,9 2,7	-24,8 1,7	-22,6 2,1	-20,0 3,0	-17,1 4,0	-14,3 5,3	-16,9 3,6	-10,7 4,2
Лесная - с.Замосты	-11,8 7,6	-23,8 2,7	-25,2 1,6	-23,5 1,9	-19,8 3,1	-19,2 3,8	-14,8 4,9	-16,9 3,5	-10,4 4,2
Пульва - г.Высокое	-12,7 7,1	-23,9 2,3	-24,5 1,6	-21,5 1,9	-18,8 3,1	-19,2 3,8	-14,8 4,9	-17,3 3,4	-11,3 4,1
Гривда - г.Ивацевичи	-7,4 8,9	-18,2 5,7	-24,0 2,2	-21,7 2,7	-19,5 3,5	-18,1 4,2	-13,5 6,0	-14,7 4,4	-9,6 5,0
Ясельда - г.Береза	-7,8 8,6	-18,4 5,3	-22,1 3,1	-22,3 2,4	-20,2 3,3	-18,4 3,9	-14,9 5,2	-15,3 4,2	-10,2 4,8
Бобрик - ст.Парохонск	-7,5 9,0	-17,5 6,0	-23,4 2,7	-20,4 3,4	-17,7 4,2	-16,1 5,1	-11,4 6,6	14,2 4,9	-9,0 5,6
Цна - с.Дятловичи	-8,1 8,7	-18,7 5,4	-24,8 2,2	-22,0 2,7	-19,0 3,7	-17,2 4,3	-13,5 6,0	-15,1 4,4	-9,4 5,1
Лань - с.Локтыши	-5,4 9,3	-16,1 6,5	-24,1 2,6	-21,1 2,9	-19,1 3,7	-17,2 4,2	-11,1 6,1	-13,1 4,7	-8,4 5,2
Мышанка - с.Березки	-5,9 9,3	-16,4 6,4	-22,0 3,4	-21,4 3,0	-18,9 3,8	-15,3 5,0	-11,1 6,8	-13,5 4,9	-8,8 5,4
Среднее	-9,2 8,3	-20,2 4,5	-23,9 2,3	-21,9 2,5	-19,3 3,4	-17,5 4,2	-13,6 5,7	-15,5 4,1	-10,0 4,7

Анализ таблицы 2 дает ясное представление об уменьшении речного стока при увеличении температуры, так как при этом увеличивается суммарное испарение, особенно в летние месяцы (июнь, июль, август). Также можно отметить асинхронность в изменениях величин среднемесячного речного стока и суммарного испарения, например, в апреле при среднем уменьшении стока на 9,2 % испарение увеличилось на 8,3 %, что можно объяснить пиком весеннего половодья (интенсивное таяние снегов при прохождении максимальных расходов) и повышенной влажностью воздуха в этот период.

– по второму варианту (уменьшение осадков на 10 %) речной сток может уменьшиться на 24,5 %, а суммарное испарение также уменьшается, в среднем, на 5,4 %. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июле (29,7 %), а минимальное – в апреле (23,8 %), по суммарному испарению соответственно – июль (7,0 %) и апрель (4,2 %). Здесь можно отметить синхронное уменьшение речного стока и суммарного испарения при уменьшении величин атмосферных осадков, так как количество поступающей влаги уменьшилось, соответственно и уменьшилась возможность ее испарения, что можно объяснить меньшей влажностью почвы и увеличением ее водопоглощающей способности.

– по третьему варианту (уменьшение осадков на 10 % и увеличение температуры на 2°C) сток уменьшился в среднем на 29,3 % (июль – 45,2 %, апрель – 26,6 %), а суммарное испарение увеличивается в апреле на 6,2% и уменьшается в июле на 5,1 % при среднем уменьшении около 0,7 %. Картина хода изменения суммарного испарения по варианту 3 приведена в таблице 3.

Речной сток оказался очень чувствительным к одновременному уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха, значения стока уменьшились очень существенно, особенно для летних месяцев (для июня – 44,9 %, для июля – 45,2 %, для августа – 43,9 %), что можно объяснить небольшими расходами во время летней межени и большим (по отношению к остальным месяцам года) абсолютным уменьшением количества осадков (в летние месяцы выпадает наибольшее количество осадков).

Таблица 3. Величины изменения суммарного испарения по *варианту 3*, в % к существующему

Река-створ	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IV-X	Год
Копаявка - с.Черск	4,6	-3,3	-5,7	-6,0	-5,1	-3,7	-1,3	-3,0	-1,7
Мухавец - г.Пружаны	6,5	0,5	-3,2	-4,8	-4,1	-3,0	-0,9	-1,7	-0,6
Жабинка - с.М.Жабинка	4,6	-3,3	-5,7	-6,2	-5,3	-3,7	-0,9	-3,0	-1,7
Рыта - с.М.Радваничи	4,6	-3,3	-5,7	-6,0	-5,1	-3,7	-1,3	-3,0	-1,7
Лесная - с.Замосты	4,6	-3,3	-5,7	-6,2	-5,3	-4,0	-1,3	-3,1	-1,8
Пульва - г.Высокое	3,8	-3,5	-5,7	-6,2	-5,1	-4,0	-1,8	-3,2	-2,0
Гривда - г.Ивацевичи	7,3	1,4	-4,1	-4,2	-3,8	-3,1	0,4	-1,3	-0,1
Ясельда - г.Береза	6,7	0,8	-3,4	-5,0	-4,1	-3,0	-1,3	-1,7	-0,6
Бобрин - ст.Парохонск	7,6	2,2	-3,5	-3,6	-2,6	-1,2	1,6	-0,4	0,8
Цна - с.Дятловичи	7,1	1,1	-4,2	-4,3	-3,2	-2,3	0,8	-1,2	0,1
Лань - с.Локтыши	8,4	3,1	-3,7	-4,3	-3,5	-2,8	0,4	-0,8	0,2
Мышанка - с.Березки	8,2	2,9	-2,4	-3,9	-3,2	-1,4	2,1	-0,3	0,6
Среднее	6,2	-0,4	-4,4	-5,1	-4,2	-3,0	-0,3	-1,9	-0,7

– по четвертому варианту (заболоченность и залесенность водосбора уменьшаются, а густота речной сети и распаханность увеличиваются на 5, 10, 20 и 30 % соответственно) речной сток имеет изменения, средние значения которых для исследуемых рек водосборов приведенные в таблице 4.

Таблица 4. Средние величины изменения величины речного стока по *варианту 4*, в % к существующему

Степень антропогенного воздействия	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IV-X	Год
5%	-2,48	-0,41	-1,08	-0,4	1,9	2,24	1,29	-0,25	-0,69
10%	-4,88	-1,03	-2,16	-0,8	3,81	4,93	2,59	-0,50	-1,38
20%	-9,48	-2,47	-4,32	-2,41	7,14	9,87	5,18	-1,49	-2,98
30%	-13,89	-4,74	-7,19	-4,82	10,48	15,25	7,44	-2,72	-4,82

Анализ таблицы 4 позволяет выявить тенденцию постепенного перехода от уменьшения стока в апреле-июле к увеличению в августе-октябре, при этом переход через «нулевые» значения изменений находятся где-то между июлем и августом. Можно отметить, что одновременное осушение болот, вырубка леса, создание новых мелиоративных систем и увеличение процента пахотных земель уменьшает речной сток весеннего половодья и увеличивает его в осенние месяцы. Хотя влияние этих антропогенных воздействий на речной сток не однозначно, возможно покомпонентное исследование влияния каждого из них на сток рек и прогнозирование количественного изменения среднемесячных расходов рек Белорусского Полесья. Также явно прослеживается тенденция увеличения средних величин изменений речного стока по отношению к степени антропогенных воздействий, но 30 % изменение параметров водосбора потребует существенных капитальных вложений в строительство новых мелиоративных систем, что при существующем состоянии экономики нереально, поэтому хозяйственная деятельность в бассейнах рек в этой области не повлияет существенно в ближайшем будущем на речной сток.

Таким образом, наиболее неблагоприятным прогнозом развития антропогенного изменения речного стока для рек Белорусского Полесья является третий вариант (уменьшение стока может достигнуть 45,2 %). При наложении на этот вариант 10 %-ного антропогенного воздействия на водосбор реки уменьшение среднего годового стока может достигнуть 50 %.

Более детально проведен анализ влияния климатических и антропогенных факторов на средний годовой сток р. Ясельда – г. Береза, результаты которого представлены в таблице 5. Эти результаты подтвердили предположение о том, что самым неблаго-

приятным прогнозом изменения речного стока является третий вариант, имеющий максимальные изменения как обеспеченности (с 50 до 85 %), так и коэффициента вариации (с 0,47 до 0,54).

Таблица 5. Изменение обеспеченности и коэффициента вариации годового стока р.Ясельда–г.Береза в зависимости от варианта воздействия

№ варианта	Исходный	1	2	3	4
Обеспеченность, %	50	62,4	72,9	85,0	52,0; 54,1; 56,2; 58,0
Изменение обеспеченности, %	0,0	24,8	45,8	70,0	4,0; 8,2; 12,4; 16,0
Коэффициент вариации $C_v$	0,47	0,49	0,52	0,54	0,47; 0,47; 0,48; 0,48
Изменение коэффициента вариации $C_v$ , %	0,0	4,1	9,6	13,0	0,0; 0,0; 2,0; 2,0

Также было выявлено, что увеличение средней годовой температуры воздуха с одновременным уменьшением количества атмосферных осадков неоднозначно влияет на изменение суммарного испарения, т. е. при некотором сочетании изменения осадков и температуры наблюдается как бы перелом в изменении суммарного испарения. Анализ матрицы средней годовой температуры и суммарного годового испарения при постепенном увеличении температуры и уменьшения осадков показал, что для р. Ясельда-г. Береза такой переломной точкой является увеличение средней годовой температуры на 0,6°C при одновременном 2 %-ном уменьшении количества атмосферных осадков. При дальнейшем увеличении температуры и уменьшении количества осадков происходит постепенное увеличение суммарного испарения.

Прогнозируемое потепление климата вызовет очередную негативную реакцию водных экосистем в целом, так и отдельных их частей. Особенно это скажется на поймах рек – наиболее чувствительных ландшафтах, которые нам представляются существенными. Проведенное предварительное исследование этой проблемы необходимо развивать далее. И в первую очередь – совершенствовать воднобалансовые модели и детализацию статистических методов выявления зависимостей «климат-сток» для получения более надежных оценок и, следовательно, заключения на их основе выводов по проведению мероприятий по своевременной адаптации водного хозяйства к изменениям условий формирования местных водных ресурсов.

К сожалению, за пределами анализа остались еще ряд важных факторов: особенности формирования речного стока в зимний период с учетом частых оттепелей, в последнее десятилетие сокращение периода снеготаяния и соответствующее ему изменение количества атмосферных осадков и потерь талого стока, испарение со снежного покрова, детализация расчетов во времени и в пространстве. Перечисленные и ряд других вопросов будут обсуждены нами в последующих публикациях.

#### Литература

1. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф. Логинова. – Мн.: Институт геологических наук АН Беларуси, 1946. – 234 с.
2. Гриневиц А.Г., Плужников В.Н. Оценка влияния возможного глобального потепления на водные ресурсы и водное хозяйство // Природные ресурсы. – 1997. – №2. – С. 49-54.
3. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 168 с.
4. Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик». – Мн.: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2000 – 174с.
5. Дроздов О.А. Колебания естественного увлажнения в связи с анализом антропогенных изменений климата и увлажнения // Водные ресурсы. – 1990. – №2. – с. 5-15.