

УДК 551.48(476.1)

А. А. Волчек¹⁻²
С. И. Парфомук¹
Н. Н. Шпендик²

**ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ВОДНОГО РЕЖИМА
МАЛЫХ РЕК БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ
ФАКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ Р. ЯСЕЛЬДА)**

¹УО «Брестский государственный технический университет»,

²ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт

Национальной академии наук Беларуси»

Брест, Республика Беларусь, e-mail: Volchak@tut.by, Parfomuk@tut.by, Shpendik@tut.by

В статье приведена оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов. Установлено, что наибольшей трансформации стока подвергнутся бассейны, на которых произойдет сработка торфа, подстилаемого песком, на 30 % всей площади водосбора, при этом произойдет существенное внутригодовое перераспределение стока. Результаты численного эксперимента по моделированию стока воды рек в условиях изменяющегося климата показали, что годовые значения речного стока изменятся на 10–20 %, а для наиболее экстремальных вариантов – на 30–40 %.

Водным ресурсам присуща динамика, а их комплексное и рациональное использование невозможно без прогноза колебаний и изменений во времени. Характер колебаний водных ресурсов определяется климатическими факторами, но, начиная со второй половины XX века, роль антропогенной составляющей в ряде случаев становится соизмеримой с природными воздействиями. Таким образом, можно констатировать, что конец XX–начало XXI века характеризуется направленной климатической изменчивостью и повышением антропогенной нагрузки на сток рек, особенно малых. Это не могло не сказаться на факторах формирования стока малых рек, их гидрологическом режиме и гидроэкологическом состоянии. Кроме того, воздействия антропогенных факторов на водный режим рек

имеют как разнонаправленный характер, что компенсирует влияние, так и однонаправленный, что, в свою очередь, усиливает трансформацию водного режима.

Учитывая важность оценок, направленность и степень изменений параметров стока, гидрологического режима рек Беларуси вообще и рек Белорусского Полесья в частности, модельным объектом выбран бассейн р. Ясельды, в рамках которого проведены гидролого-климатические исследования. Выбор объекта исследования объясняется его репрезентативностью для Белорусского Полесья и степенью антропогенной нагрузки в виде гидротехнической мелиорации и последствий эксплуатации мелиорированных земель.

Целью настоящего исследования является оценка изменений водного режима рек, вызванных деградацией и сработкой торфяно-болотных почв, находящихся под сельскохозяйственным использованием и подстилаемых различными по механическому составу минеральными грунтами, в зависимости от занимаемой ими площади.

Постановка и проведение эксперимента сопряжено с рядом проблем, в частности трудоемкостью и большими финансовыми затратами, кроме этого, очень сложно вычлнить влияние отдельных факторов. Поэтому использование математических моделей является одним из наиболее реальных путей решения задачи оценки трансформации водного режима рек. Дополнительно в ходе исследований стояла задача оценить изменения водного режима рек в будущем в условиях прогнозируемого изменения климата с учетом трансформации ландшафтов.

Для оценки трансформации водного режима рек, вызванной климатическими колебаниями и антропогенными воздействиями, использованы результаты стационарных гидрологических и климатических наблюдений Департамента по гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и окружающей среды Республики Беларусь, опубликованные в материалах государственных кадастров.

Воднобалансовые исследования речных водосборов выполнены с использованием метода гидролого-климатических расчетов (ГКР), предложенного В. С. Мезенцевым, основанного на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [1, 2].

Уравнение водного баланса речного водосбора за некоторый промежуток времени имеет вид:

$$H(I) = Z(I) - Y_K(I) \pm \Delta W(I), \quad (1)$$

где $H(I)$ – суммарные ресурсы увлажнения, мм; $Z(I)$ – суммарное испарение, мм; $Y_K(I)$ – суммарный климатический сток, мм; $W(I)$ – изменение влагозапасов деятельного слоя почвогрунтов, мм; I – интервал осреднения.

Суммарное испарение находится по формуле:

$$Z(I) = Z_m(I) \left[1 + \left(\frac{\frac{Z_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)}}{\frac{KX(I) + g(I)}{W_{HB}} + V(I)}} \right)^{n(I)} \right]^{\frac{1}{n(I)}}, \quad (2)$$

где $Z_m(I)$ – максимально возможное суммарное испарение, мм; W_{HB} – наименьшая влагоемкость почвы, мм; $V(I) = \frac{W(I)}{W_{HB}}$ – относительная влажность почвогрунтов на начало расчетного периода;

$KX(I)$ – сумма измеренных атмосферных осадков, мм; $g(I)$ – грунтовая составляющая водного баланса, мм; $r(I)$ – параметр, зависящий от водно-физических свойств и механического состава почвогрунтов; $n(I)$ – параметр, учитывающий физико-географические условия стока.

Относительная влажность почвы на конец расчетного периода определяется из соотношений:

$$V(I+1) = V(I) \cdot \left(\frac{V_{cp}(I)}{V(I)} \right)^{r(I)}; \quad (3)$$

$$V_{cp}(I) = \left(\frac{\frac{KX(I) + g(I)}{W_{HB}} + V(I)}{\frac{Z_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)}} \right)^{\frac{1}{r(I)}} \quad (4)$$

Максимально возможное суммарное испарение находится по методике, описанной в работе [3]. Суммарные ресурсы увлажнения определяются следующим образом:

$$H(I) = KX(I) - W_{HB}(V(I) - V(I-1)). \quad (5)$$

Решение системы уравнений (1–5) осуществляется методом итераций до тех пор, пока значение относительной влажности почвогрунтов на начало расчетного интервала не будет равно значению относительной влажности на конец последнего интервала. При расчете начальное значение влажности принимается равным значению наименьшей влагоемкости, т.е. $W(1) = W_{\text{нв}}$, откуда $V(1) = 1$. Сходимость решения метода ГКР достигается уже на четвертом шаге расчета.

Корректировка климатического стока осуществляется с помощью коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов на формирование руслового стока, т.е.

$$Y_p(I) = k(I) \cdot Y_k(I), \quad (6)$$

где $Y_p(I)$ – суммарный русловой сток, мм; $k(I)$ – коэффициент, учитывающий гидрографические характеристики водосбора.

Метод ГКР реализован в виде компьютерной программы «Баланс». Моделирование водного баланса исследуемой реки осуществляется в два этапа: настройка модели и собственно моделирование.

На первом этапе необходимо задать координаты центра тяжести водосбора исследуемой реки и основные гидрографические характеристики водосбора. Далее программа из встроенного банка гидрометеорологической информации подбирает реку-аналог с учетом сходства формирования водного режима рек. После получения необходимой информации, изменяя параметры $W_{\text{нв}}$, r и n и используя систему уравнений (1–5), производится настройка модели на реку-аналог. Наименьшая влагоемкость почвы $W_{\text{нв}}$ изменяется в пределах от 60 до 220 мм, параметр r – от 1 до 2,5, параметр n – от 2 до 3,4. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего соответствия рассчитанного климатического стока и руслового стока реки-аналога. Первый этап заканчивается построением графиков климатического и руслового стока и выводом ошибки моделирования.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки, используя параметры, полученные при моделировании стока реки-аналога. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора.

Результаты моделирования свидетельствуют о высокой точности расчета водного баланса как для практического применения, так и для теоретических исследований, что проверено на большом количестве рек Беларуси с площадью водосбора не более 1000 км², на которых ведутся гидрометрические наблюдения. Таким образом, программа «Баланс» при наличии данных об атмосферных осадках, температуре воздуха, дефицитах влажности воздуха, стока воды реки-аналога и гидрографических характеристиках водосбора позволяет рассчитывать водный баланс малых рек Беларуси, не охваченных гидрометрическими наблюдениями.

Осушение мелкозалежных торфяников с последующим их использованием под пропашные культуры привело к сработке торфяного слоя, и на поверхность выступили подстилающие минеральные породы. Смена ландшафта с последующей сменой испаряющей поверхности водосбора не могла не сказаться на водном режиме самой реки. Поэтому естественный водный режим в верховьях Ясельды в настоящее время существенно трансформировался. До массового осушения в бассейне р. Ясельда болота составляли 34 %, заболоченный лес – 6 %, а общая заболоченность – 45 % от площади водосбора в замыкающем створе г. Береза [4].

В таблице 1 представлены расходы воды по р. Ясельде в створе г. Береза за различные периоды осреднения. В целом за год наблюдается некоторое увеличение стока, однако создание рыбхоза «Селец» внесло серьезные изменения во внутригодовое распределение стока. Исходя из экологических условий, формирование речной экосистемы ниже рыбхоза не для каждого года является благоприятным.

В основу численного эксперимента положена модель водного баланса р. Ясельды в створе г. Береза с настройкой параметров по данным гидрометслужбы на 1962 г., т.е. до начала массовой гидротехнической мелиорации [4]. Результаты моделирования среднемноголетнего годового стока и его внутригодового распределения представлены на рисунке 1.

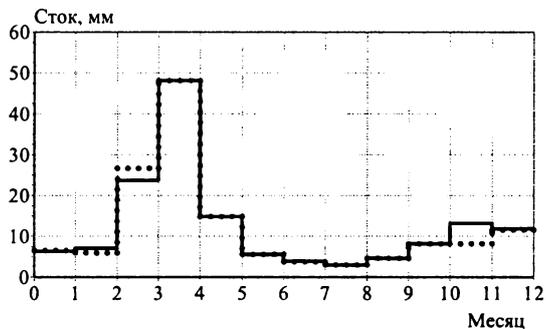
Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного стока свидетельствует о корректности модели. Полученные параметры модели использованы при проведении численного эксперимента.

Далее моделировался климатический сток на водосборе р. Ясельды с различных подстилающих поверхностей и сопоставлялся с климатическим стоком с торфяно-болотных почв (рисунок 2).

Смоделированные гидрографы стока показывают, что наибольшие различия в трансформации стока наблюдаются при сработке торфяников, подстилаемых песками.

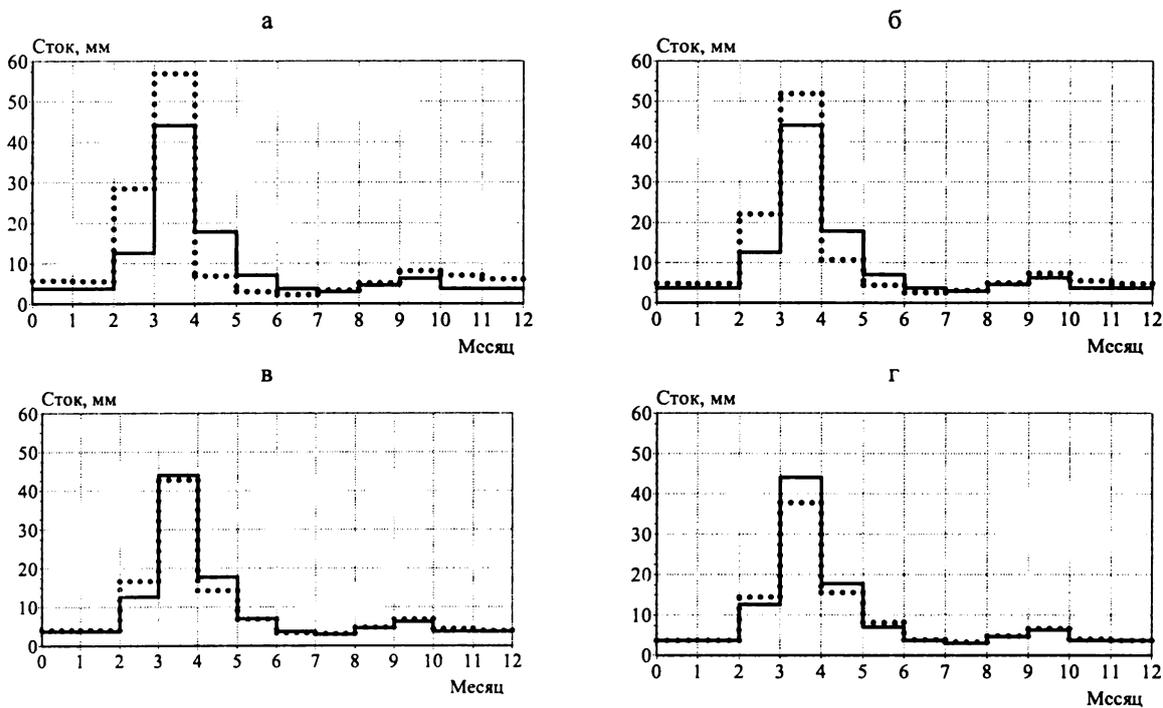
Таблица 1 – Среднемесячные и среднегодовые расходы воды (м³/с) р. Ясельды в створе г. Береза за различные периоды осреднения

Период осреднения	Месяц												Год
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
1929–1962	2,66	2,97	8,32	17,5	5,65	2,00	1,50	1,15	1,84	3,40	5,25	4,34	4,57
1929–1970	2,28	2,52	8,47	17,2	5,53	1,98	1,36	1,07	1,67	2,88	4,69	4,21	4,36
1929–1980	3,04	3,08	8,69	16,0	5,55	2,30	1,84	1,64	2,02	3,51	5,17	4,73	4,71
1929–2004	3,90	3,66	7,68	12,5	5,05	2,73	2,48	2,64	3,72	4,17	4,69	4,61	4,76
1945–1962	2,67	3,44	8,24	14,7	4,88	1,94	1,50	1,12	1,32	2,34	4,60	4,08	4,23
1963–1980	3,55	3,22	9,18	13,8	5,42	2,68	2,30	2,28	2,25	3,66	5,07	5,21	4,85
1981–2004	5,46	4,72	5,83	6,11	4,14	3,52	3,65	4,47	6,84	5,36	3,86	4,40	4,86



— измеренный сток, - - - рассчитанный сток

Рисунок 1 – Измеренный и рассчитанный сток р.Ясельды в створе г.Береза



— естественный сток, - - - прогнозный сток

Рисунок 2 – Сток в бассейне р. Ясельды с различных по механическому составу подстилающих поверхностей: а – песок, б – супесь, в – суглинок, г – глина

Следующим этапом явилась оценка трансформации речного стока в зависимости от величины площади сработки торфяно-болотных почв. Численный эксперимент проведен для следующих условий: на 10 %, 20 и 30 % площади водосбора произошла сработка торфяно-болотных почв, и на поверхность выступили минеральные грунты. При этом рассматривалось 4 вида подстилающих минеральных почвогрунтов – песок, супесь, суглинок и глина. Результаты численного эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение стока р. Ясельды – г. Береза в % от естественного при различных сценариях сработки торфяно-болотных почв

Вид подстилающей поверхности	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Сработка торфяно-болотных почв на территории 10 % от площади водосбора												
Песок	3,2	3,0	6,3	2,7	-7,3	-7,2	-3,5	1,2	1,2	2,4	4,3	2,2
Супесь	1,8	1,7	3,8	1,7	-4,7	-4,5	-2,8	0,7	0,6	1,5	2,4	1,1
Суглинок	0,5	0,5	1,6	-0,3	-2,3	-0,4	-0,8	1,0	0,1	0,8	1,0	0,3
Глина	-0,1	-0,1	0,7	-1,3	-1,5	1,8	0,8	1,7	0,1	0,5	0,5	0,0
Сработка торфяно-болотных почв на территории 20 % от площади водосбора												
Песок	6,8	6,2	13,4	5,4	-14,3	-13,9	-7,1	2,4	2,4	4,9	9,2	4,8
Супесь	3,8	3,6	8,0	3,3	-9,2	-8,8	-5,7	1,4	1,2	3,1	5,1	2,5
Суглинок	1,0	1,0	3,4	-0,5	-4,5	-0,8	-1,6	2,0	0,3	1,6	2,2	0,6
Глина	-0,1	-0,1	1,5	-2,6	-3,0	3,5	1,6	3,4	0,3	1,0	1,1	-0,1
Сработка торфяно-болотных почв на территории 30 % от площади водосбора												
Песок	10,7	9,7	21,4	8,2	-21,0	-20,4	-10,7	3,7	3,6	7,6	14,7	7,8
Супесь	5,9	5,6	12,7	5,0	-13,6	-12,8	-8,6	2,0	1,7	4,7	8,2	4,0
Суглинок	1,5	1,6	5,3	-0,8	-6,7	-1,1	-2,4	3,0	0,4	2,4	3,5	1,0
Глина	-0,2	-0,2	2,4	-4,0	-4,4	5,1	2,4	5,1	0,4	1,6	1,8	-0,1

Из данных таблицы 2 видно, что наибольшее изменение стока вследствие выработки торфа на заболоченной территории характерно для максимальной исследуемой площади, занимаемой торфяниками и равной 30 % всей площади водосбора. Причем в наибольшей степени изменению стока подвержены заболоченные территории, на которых торф подстиляется песком. Для таких территорий характерно наибольшее увеличение стока воды в реке, а максимальное по модулю уменьшение стока наблюдается в мае–июне.

График отклонения годового стока р. Ясельды – г. Береза в % от естественного при различных сценариях сработки торфяно-болотных почв представлен на рисунке 3.

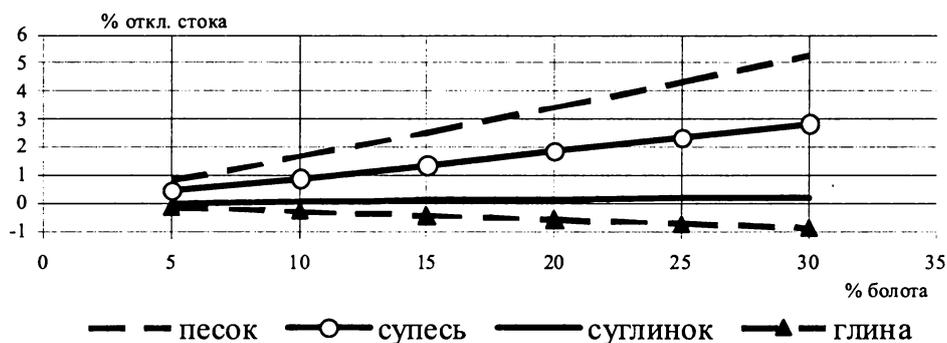


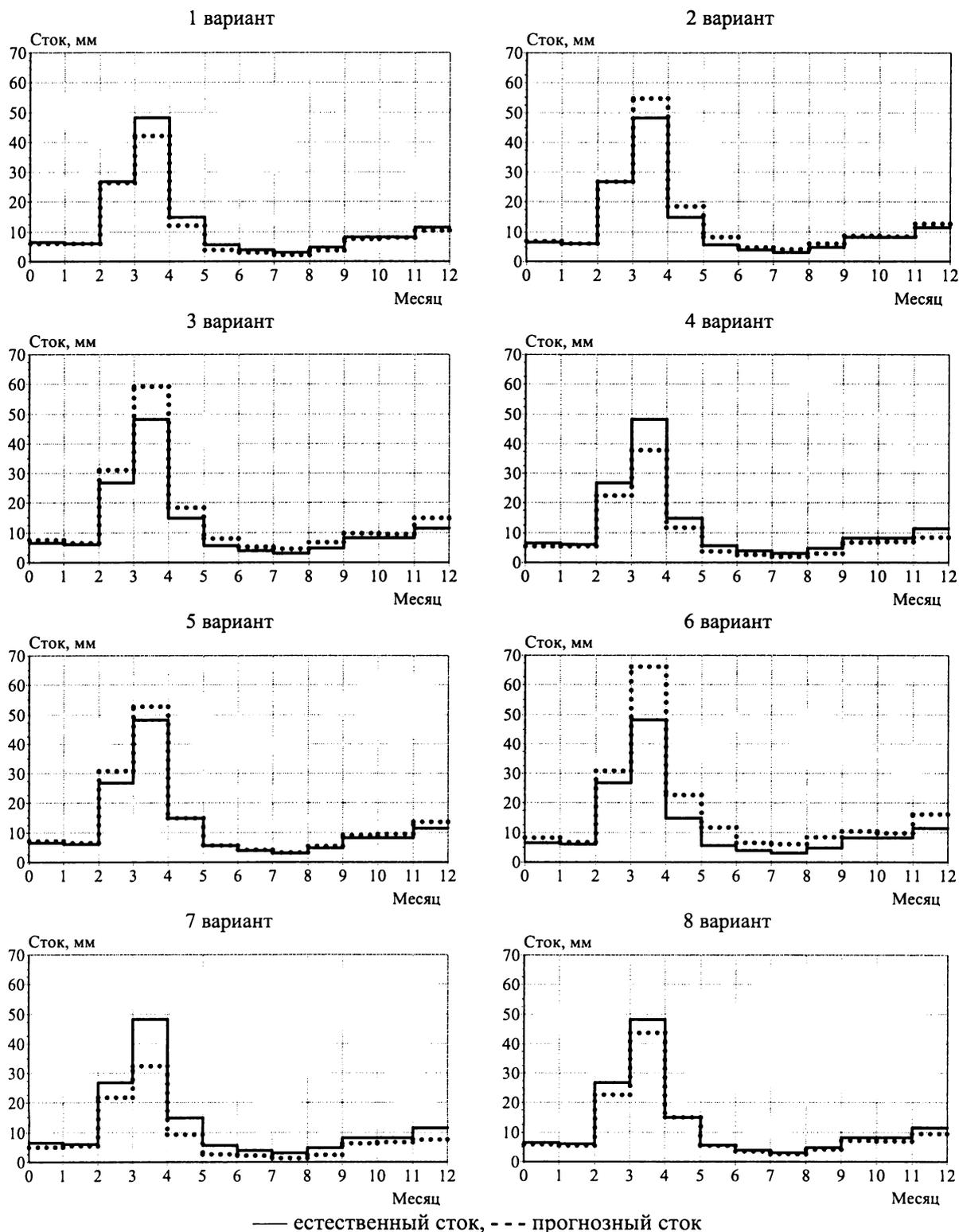
Рисунок 3 – Отклонение годового стока р.Ясельды–г.Береза в % от естественного при различных сценариях сработки торфяно-болотных почв

В связи с прогнозируемым изменением климата выполнен численный эксперимент для оценки влияния на речной сток трансформаций ландшафтов при тех или иных сценариях развития климата. Основываясь на анализе существующих в настоящее время оценок возможного изменения климата, при исследовании изменения стока р. Ясельды в замыкающем створе г. Береза принимались следующие варианты [5, 6]:

- вариант 1 – увеличение средней годовой температуры воздуха на 2 С по сравнению с современным уровнем при неизменном количестве атмосферных осадков;
- вариант 2 – уменьшение средней годовой температуры воздуха на 2 С при неизменном количестве атмосферных осадков;
- вариант 3 – увеличение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % с неизменной температурой воздуха;
- вариант 4 – уменьшение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % с неизменной температурой воздуха;
- вариант 5 – увеличение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % по сравнению с современным уровнем с одновременным увеличением температуры воздуха на 2 С;

- вариант 6 – увеличение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % с одновременным уменьшением температуры воздуха на 2 С;
- вариант 7 – уменьшение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % и увеличение средней годовой температуры на 2 С;
- вариант 8 – уменьшение годовых атмосферных осадков на 10 % и уменьшение средней годовой температуры воздуха на 2 С.

Численный эксперимент по моделированию водного баланса р. Ясельды – г. Береза проводился отдельно для каждого из перечисленных вариантов, как показано на рисунке 4. Результаты численного эксперимента приведены в таблице 3.



— естественный сток, - - - прогнозный сток
Рисунок 4 – Естественный и прогнозный стоки в бассейне р. Ясельды для различных сценариев изменения климата

Таблица 3 – Изменение стока р. Ясельды – г. Береза в % от естественного для различных сценариев изменения климата

Сценарий изменения климата	Месяц												Год
	январь	февраль	Март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
Вариант 1	-5,7	-0,2	-1,1	-12,4	-18,9	-29,8	-19,5	-26,2	-19,7	-6,8	-1,7	-9,6	-10,2
Вариант 2	8,2	1,8	0,4	13,3	25,0	48,0	27,4	39,6	29,3	7,3	1,1	11,3	12,9
Вариант 3	17,5	9,0	16,9	23,0	23,6	44,6	35,6	49,0	42,2	19,0	17,0	28,7	23,1
Вариант 4	-17,2	-9,5	-16,1	-21,4	-20,9	-34,3	-29,3	-36,2	-33,2	-17,5	-16,4	-25,8	-21,1
Вариант 5	10,4	8,2	16,1	9,3	0,7	2,9	10,0	11,1	15,4	11,5	15,6	18,3	10,9
Вариант 6	27,1	12,0	16,1	37,1	52,7	109,4	71,5	105,7	81,6	27,0	17,6	41,7	38,8
Вариант 7	-22,0	-9,0	-18,4	-32,6	-36,7	-54,5	-43,3	-53,4	-46,9	-23,7	-18,1	-34,1	-29,9
Вариант 8	-11,0	-8,9	-15,4	-9,5	0,0	-1,1	-9,0	-10,1	-12,8	-11,2	-14,8	-16,9	-10,2

При анализе данных таблицы 3 можно констатировать, что изменение климата приведет к трансформации стока рек. Причем, изменение суммарных годовых атмосферных осадков повлияет на сток в большей степени, чем изменение средней годовой температуры воздуха. В целом для года характерно изменение стока воды в пределах 10–20 % по сравнению с настоящим уровнем, а в условиях одновременного увеличения температуры и уменьшения осадков – на 30 %, одновременного увеличения осадков и уменьшения температуры – на 40 %. В течение года максимальная трансформация стока произойдет в теплый период года.

Для оценки совместного воздействия природных и антропогенных факторов на режим речного стока выполнено моделирование по наиболее неблагоприятным сценариям. Моделирование выполнено при предположении, что произошла сработка торфяно-болотных почв, подстилаемых песком, на 30 % площади водосбора, для вариантов 3 (увеличение годовых атмосферных осадков на 10 % при неизменной температуре воздуха) и 6 (увеличение суммарных годовых атмосферных осадков на 10 % и уменьшение средней годовой температуры воздуха на 2 С). Исключение из рассмотрения варианта 7 (уменьшение годовых атмосферных осадков на 10 % и увеличение годовой температуры на 2 С) обусловлено тем, что сработка торфяно-болотных почв и изменение климата приведут соответственно к увеличению и уменьшению стока, а в конечном итоге сток не подвергнется сильной трансформации. Прогнозный сток исследуемого водосбора при сработке торфа для вариантов 3 и 6 изменения климата приведен на рисунке 5.

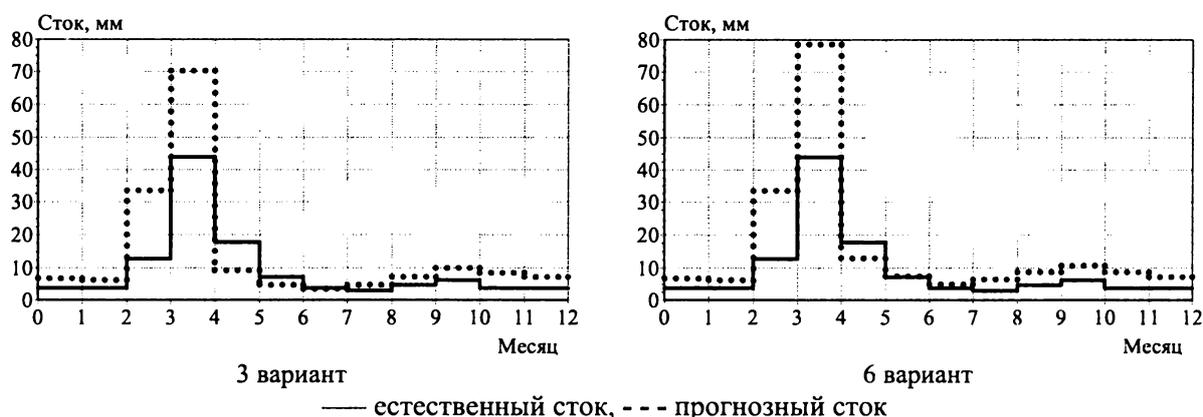


Рисунок 5 – Естественный и прогнозный сток в бассейне р. Ясельды для вариантов 3 и 6 изменения климата при сработке торфяно-болотных почв, подстилаемых песком

Если торфяно-болотные почвы, подстилаемые песком, занимают 30 % площади водосбора, то для варианта 3 изменения климата сток в целом за год увеличится на 30 %, для варианта 6 – на 46 %. Результаты численного эксперимента совместного воздействия природных и антропогенных факторов на режим речного стока в течение года приведены в таблице 4.

Для варианта 3 изменения климата незначительное уменьшение стока воды за май вызвано существенным уменьшением стока при сработке торфяно-болотных почв.

Таблица 4 – Изменение стока р. Ясельды–г. Береза в % от естественного для вариантов 3 и 6 изменения климата при сработке торфяно-болотных почв, подстилаемых песком на 30 % площади водосбора

Сценарий изменения климата	Месяц												Год
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
Вариант 3	29,3	20,7	42,1	33,4	-1,0	16,6	23,3	53,4	44,7	28,5	35,0	36,5	29,8
Вариант 6	37,2	23,0	41,4	48,7	25,2	72,4	60,2	110,0	82,6	37,3	36,5	48,3	46,0

Для оценки трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов использован метод ГКР, реализованный в виде компьютерной программы «Баланс».

При оценке изменений водного режима, вызванных деградацией и сработкой торфяно-болотных почв с различных подстилающих поверхностей в зависимости от занимаемой ими площади, установлено, что наибольшей трансформации стока подвергнутся бассейны, на которых произойдет сработка торфа, подстилаемого песком, на 30 % всей площади водосбора. Причем, среднее годовое значение стока воды изменится незначительно, но произойдет существенное внутригодовое перераспределение стока.

Результаты численного эксперимента по моделированию стока воды рек в условиях изменяющегося климата показали, что годовые значения речного стока изменятся на 10-20 %, а для наиболее экстремальных вариантов – на 30–40 %.

При совместном воздействии природных и антропогенных факторов трансформация стока еще больше усилится, а в отдельные месяцы года сток может измениться более чем в 2 раза.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья, что требует разработки компенсационных мероприятий для поддержания речных экосистем в равновесном состоянии.

Литература

1. Мезенцев В. С. Увлажненность Западно-Сибирской равнины / В. С. Мезенцев, И. В. Карнацевич. – Л., 1969.
2. Мезенцев В. С., Белоненко Г. В., Карнацевич И. В., Лоскутов В. В. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях / В. С. Мезенцев [и др.]. Омск, 1980. Ч. I.
3. Волчек А. А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) // Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР), 1986. № 12. С. 17–21.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Т. 5. Ч. 2: Основные гидрологические характеристики. Л., 1966.
5. Логинов В. Ф. Климат Беларуси / Под ред. В. Ф. Логинова. Минск, 1996.
6. Логинов В. Ф. Изменение климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов [и др.] // Под общ. ред. В. Ф. Логинова; Ин-т пробл. использования природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси. Минск, 2003.