

УДК 556.5(476)

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СТОКА ГОРНЫХ И РАВНИННЫХ РЕК ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА (на примере Украинских Карпат и Беларуси)

С. И. СНЕЖКО¹⁾, А. Г. ОБОДОВСКИЙ¹⁾, П. С. ЛОПУХ²⁾

¹⁾Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 60, 01601, г. Киев, Украина

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются вопросы, связанные с влиянием потепления климата на формирование водных ресурсов Украинских Карпат и Беларуси в ближайшей и долгосрочной перспективе. Анализируются результаты применения методов моделирования и балансов для прогнозного расчета стока рек Украинских Карпат. Приведены результаты прогноза стока белорусских рек на основе анализа форм атмосферной циркуляции. Апробированный балансовый метод прогноза изменения стока и состояния водных ресурсов при потеплении климата рекомендуется использовать в условиях Беларуси. Отмечается, что в будущем необходимо уточнить прогнозы для более детальных расчетов водных ресурсов обеих стран. Сделан вывод о том, что балансовый метод оценки водных ресурсов является высокоперспективным для региональных гидрологических исследований.

Ключевые слова: потепление; прогноз; балансовый метод; циркуляция; энергетика; Карпаты; Беларусь.

LONG-TERM FORECAST OF MOUNTAIN AND LOWLAND RIVERS RUNOFF FOR ASSESSMENT THEIR HYDROPOWER POTENTIAL (on the example of Ukrainian Carpaty and Belarus)

S. I. SNIZHKO^a, A. G. OBODOVSKIY^a, P. S. LOPUCH^b

^aTaras Shevchenko National University of Kyiv, Vladimirskaya street, 60, 01601, Kyiv, Ukraine

^bBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: lopuch49@mail.ru

The problems of the effects of climate warming on the formation of the water resources of the Ukrainian Carpaty and the territory of Belarus in the near and distant future. The results of the application of modeling techniques and balances to calculate the forecast river runoff of the Ukrainian Carpaty. For the conditions of Belarus are the results

Образец цитирования:

Снежко С. И., Ободовский А. Г., Лопух П. С. Долгосрочный прогноз стока горных и равнинных рек для оценки их гидроэнергетического потенциала (на примере Украинских Карпат и Беларуси) // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 1. С. 50–61.

For citation:

Snizhko S. I., Obodovskij A. G., Lopuch P. S. Long-term forecast of mountain and lowland rivers runoff for assessment their hydropower potential (on the example of Ukrainian Carpaty and Belarus). *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2017. No. 1. P. 50–61 (in Russ.).

Авторы:

Сергей Иванович Снежко – доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета.

Александр Григорьевич Ободовский – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры гидрологии и гидроэкологии географического факультета.

Петр Степанович Лопух – доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой общего землеведения и гидрометеорологии географического факультета.

Authors:

Sergiy Snizhko, doctor of science (geography), full professor; head of the department of meteorology and climatology, faculty of geography.

tempo@2007meta.ua

Aleksandr Obodovskij, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of hydrology and hydroecology, faculty of geography.

obodovskij@univ.kiev.ua

Piotr Lopuch, doctor of science (geography), full professor; head of the department of the general geography and hydro-meteorology, faculty of geography.

lopuch49@mail.ru

of the forecast river flow in Belarus on the basis of the analysis of atmospheric circulation types. Proven balance method of forecasting water runoff changes and prediction under climate warming in the near and distant future it is recommended to use in the case of Belarus. In the future, you need to update forecasts for more detailed calculations of water resources in both countries. The use of the balance method in the evaluation of water resources has a good prospect for regional hydrological researches.

Key words: warming; forecast; balance sheet liability method; circulation; energy; Carpaty; Belarus.

Актуальность исследований

В современном мире около 20 % производства электроэнергии приходится на гидроэнергетику. Однако гидроэнергетический потенциал многих стран до сих пор используется далеко не полностью [1]. В горных регионах доля производства гидроэлектроэнергии значительно выше. Например, в Австрии и Швейцарии она превышает 50 % всей выработки электроэнергии [2]. В большой степени производство гидроэлектроэнергии зависит от водности рек, которая, в свою очередь, служит интегральным показателем увлажненности территории, комплекса природно-климатических факторов. В ближайшей перспективе флуктуацию водного стока определяют кратковременные, а иногда и резкие по амплитуде погодные изменения, которые проявляются в виде сильных осадков, быстрого таяния устойчивого снежного покрова или дождевых паводков. В долгосрочной перспективе гидроэнергетическая отрасль зависит от глобального изменения климата и потепления, действие которых имеет односторонний характер и может привести как к длительному снижению водного стока рек, так и к его повышению.

Согласно отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в XXI в. ожидается общее снижение гидроэнергетического потенциала примерно на 6 % [3]. При этом могут наблюдаться значительные региональные отклонения от этой величины. Так, в Средиземноморье возможно падение гидроэнергетического потенциала на 20–50 %, в Северной и Восточной Европе оно может составить 15–30 %. Оценка изменения гидроэнергетического потенциала Беларуси и Украины под влиянием глобального потепления ранее не проводилась. В то же время проблема энергетической независимости обеих стран стоит очень остро. Идея развития гидроэнергетики за счет строительства малых экологически безопасных гидроэлектростанций (ГЭС) находит все большую поддержку и уже реализуется на территории Беларуси. Наиболее перспективными для строительства малых ГЭС на Украине являются водные объекты Украинских Карпат.

Характеристика объектов исследований и исходных данных

Чтобы повысить роль гидроэнергетики в достижении энергетической независимости Беларуси, на территории страны реконструируются малые и строятся мини-ГЭС. Более масштабные объекты создаются на крупных реках (Гродненская, Витебская, Полоцкая ГЭС). В равнинных условиях строительство ГЭС регламентируется экологическими ограничениями. С этой целью было выполнено районирование по степени экологической приемлемости (рис. 1, а). Гидроэнергетические ресурсы распределяются по территории Беларуси крайне неравномерно (рис. 1, б). Наиболее перспективными для возведения ГЭС являются Поозерский, Нарочано-Вилейский и Неманский районы [4; 5].

В целях проведения подобных исследований на территории Украины, которых ранее не было, использовались данные многолетних наблюдений гидрометеорологической службы Украины по основным гидроклиматическим характеристикам (температура воздуха, осадки, водный сток), взятым за период с 1950 по 2015 г. на 19 метеорологических станциях и 23 гидрологических постах Украинских Карпат, в том числе на 9 станциях и 12 постах в бассейне р. Тисы, 4 станциях и 3 постах в бассейнах рек Прут и Сирет, 6 станциях и 8 постах в бассейне р. Днестр.

Для прогнозирования водного стока указанных рек в качестве входных параметров водно-балансовой модели были использованы прогнозные климатические характеристики Украинского гидрометеорологического института НАН Украины (УкрГМИ НАНУ) на ближайшую (до 2030 г.) и среднесрочную (к 2050 г.) перспективу [6]. Исследования выполнены в рамках европейского проекта FP-6 ENSEMBLES с применением ансамбля региональных климатических моделей (РКМ).

Чтобы осуществить качественную верификацию результатов РКМ, были использованы базы данных Всемирного климатического центра CRU (Climate Research Unit, University of EastAnglia, Norwich) и база данных E-Obs, разработанная в рамках того же проекта FP-6 ENSEMBLES на основе наибольшего доступного набора данных метеорологической сети Европы (табл. 1).

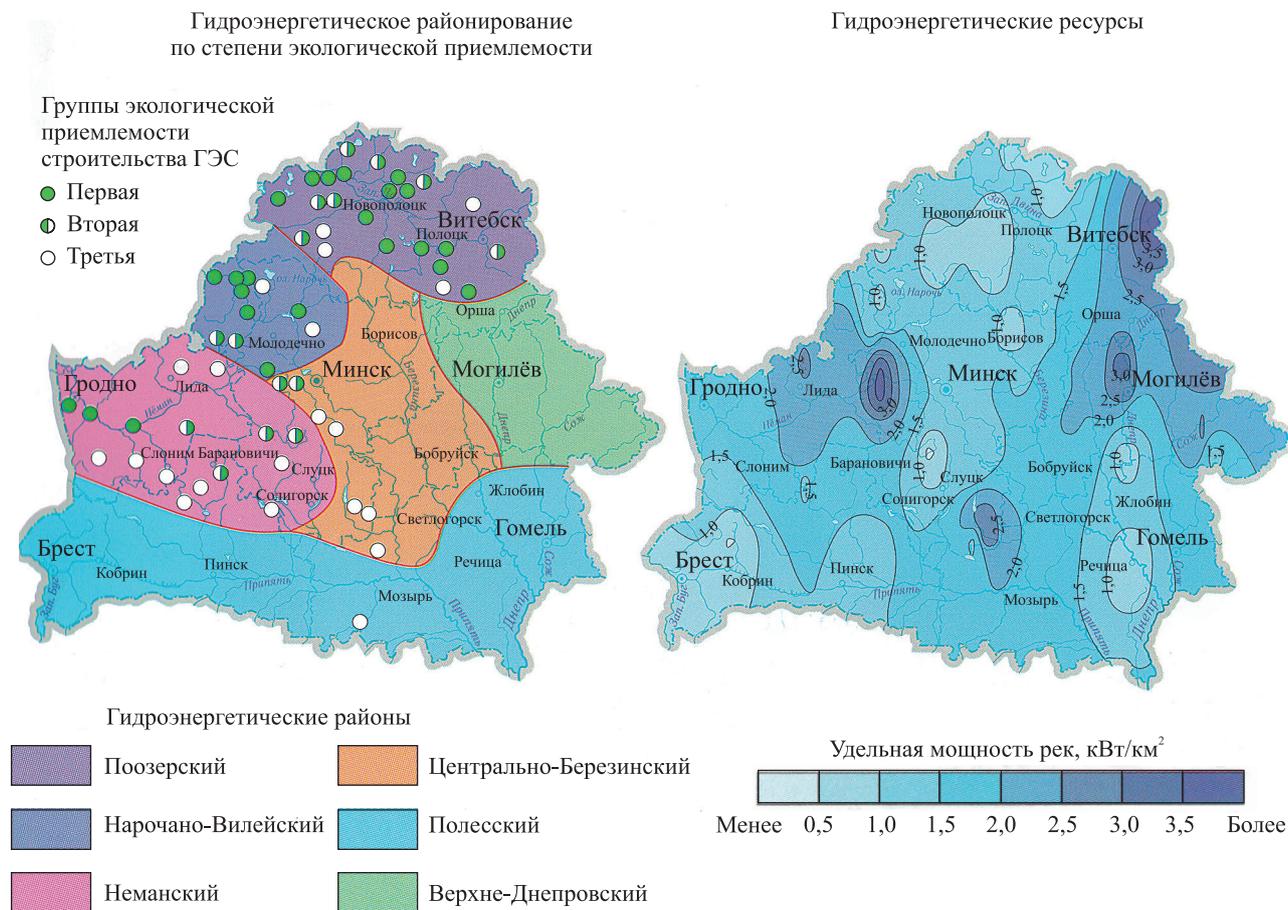


Рис. 1. Перспективы использования потенциальных гидроэнергоресурсов Беларуси
Fig. 1. Prospects for the use of hydropower potential of Belarus

Таблица 1

Количественная характеристика исходной информации (метеостанции и узлы сетки), использованной в моделировании климата на примере Украинских Карпат [6]

Table 1

Quantitative characteristic of the initial information (weather stations and grid nodes) used in climate modeling on the example of Ukrainian Carpaty [6]

Область	Высота, м			Количество				
				метеорологических станций и постов			узлов	
	$h_{\text{ср}}$	$h_{\text{мин}}$	$h_{\text{макс}}$	Станции	Станции и посты	CRU	E-Obs	PKM
Закарпатская	436	113	1330	9	27	54	24	24
Ивано-Франковская	604	275	1451	5	28	66	26	26
Львовская	325	212	594	10	32	96	46	46
Черновицкая	502	242	762	2	4	33	14	14

Поскольку ансамблевое усреднение считается лучшим методом использования данных климатических моделей, для оценки возможных изменений температурного режима на Украине в XXI в. был применен ансамбль из десяти РКМ, а для анализа количества осадков – ансамбль из четырех РКМ. Исследования специалистов УкрГМИ НАНУ подтвердили, что эти ансамбли моделей точнее воспроизводят пространственно-временное распределение рассмотренных климатических показателей на изучаемой территории.

Возможные климатические изменения в XXI в. на территории Украины анализировались для двух 20-летних периодов: на ближайшую (2011–2030) и отдаленную (2031–2050) перспективу (для средних месячных и годовых температур, а также месячного и годового количества осадков). Изменения

характеристик определялись по отношению к климатическому периоду с 1991 по 2010 г. Расчеты проводились для всех узлов расчетной сетки и усреднялись для каждой административной области, выделенной по сходству физико-географических условий, однотипности проявления климатообразующих факторов и относительной однородности полей климатических характеристик.

На 2011–2050 гг. прогнозируемые изменения термического режима исследуемой территории сохраняют тенденцию к потеплению. В первом прогнозируемом периоде (до 2030 г.) температура повысится на 0,40–0,41 °С, во втором (к 2050 г.) она составит 1,21–1,27 °С. В Беларуси за последние 25 лет, по данным В. И. Мельника, температура воздуха превысила климатическую норму на 1,2 °С и в ближайшей перспективе эта тенденция сохранится.

Наибольший интерес для дальнейших исследований представляет прогноз изменения нормы осадков на ближайшую и среднесрочную перспективу. Расчеты показывают, что среднее количество осадков на Украине увеличится в обоих периодах. До 2030 г. их объем повысится на 4–10 %, а к 2050 г. увеличится на 9–12 % по отношению к уровню 1991–2010 гг. В первом периоде наименьшие изменения ожидаются в Черновицкой области (рост всего на 4 %), а самые большие – в Закарпатской области (на 10 %), что в абсолютном выражении будет составлять 25 и 83 мм слоя осадков соответственно. Во втором прогнозируемом периоде тенденция к повышению увлажненности территории водосборов исследуемых рек сохранится, хотя темп изменений будет разным. В Черновицкой области вероятен наибольший темп увеличения осадков: от 4 % в первом периоде до 9 % – во втором. Однако в абсолютном выражении по сравнению с 1991–2010 гг. количество осадков больше возрастет во Львовской и Закарпатской областях (на 84 и 74 мм соответственно).

На первом этапе потепления увеличение атмосферных осадков в Беларуси составило около 80 мм. В первой половине нынешнего столетия ожидается рост атмосферных осадков в северной части территории страны.

Методика исследований

Интересным является опыт применения метода водного баланса для оценки изменения водности рек на территории Украины. Более века он относится к основным методам исследований в гидрологии и достаточно успешно используется для решения задач, связанных с оценкой влияния климата на водные ресурсы как отдельных речных бассейнов, так и целых регионов, стран и континентов [6–8]. Водно-балансовый метод прост в применении и позволяет быстро и сравнительно точно оценить изменения средней нормы стока не только для одного отдельно выбранного речного бассейна, но и для всего региона. Другие методы требуют большого объема подготовительных работ, учитывая широкий перечень параметров среды, значительный массив информации, а также сложность получения параметров модели.

Точность оценки влияния климатических изменений на водные ресурсы зависит от способности связать колебания в реальных величинах испарения с прогнозируемым объемом осадков и потенциального испарения. Рассчитав величину потенциального, т. е. максимально возможного, испарения на любой прогнозируемый период с применением смоделированных (прогнозных) параметров температуры и суточной солнечной радиации, в дальнейшем можно воспользоваться так называемым методом водно-теплового баланса (одна из разновидностей водно-балансового метода), чтобы оценить изменение водных ресурсов в будущем.

Успешным примером применения метода водно-теплового баланса, по нашему мнению, является работа Е. Д. Гопченко и Н. С. Лободы [7], в которой было реализовано уравнение водно-теплового баланса В. С. Мезенцева и других ученых [8] в целях оценки природных водных ресурсов Украины. Используя этот метод, авторы также сделали прогноз, касающийся возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления климата [9].

Учитывая растущую доступность результатов моделирования климата по ансамблю РКМ, стоит изучить основанные на них водно-балансовые методы расчета. В частности, заслуживает внимания водно-балансовая модель Л. Турка [10; 11], успешно примененная польским гидрологом З. Качмарком [12] в составе рабочей группы по вопросам воздействия климатических изменений на водные ресурсы МГЭИК.

Данная методика является достаточно чувствительной к изменениям осадков и температуры [13]. Она позволила получить вполне удовлетворительные результаты прогноза для бассейнов рек Европы. Водно-балансовая модель, ориентированная на использование среднегодовых данных, была предложена французским гидрологом Л. Турком, которому впервые удалось установить четкое соотношение между осадками, температурой и стоком. Эта формула получила широкое распространение в исследованиях, посвященных прогнозу возможных изменений водных ресурсов во второй половине XX в., вызванных глобальным потеплением, в связи с возникновением новой научной задачи – оценки будущих запасов водных ресурсов. Кроме того, данная модель была апробирована для долгосрочного прогнозирования водного стока рек различных природных зон Украины [14].

Исходя из результатов апробации модели на примере речных бассейнов различных природных зон и сравнения их с данными US Country Studies program [15], которые позволяют оценить изменения водных ресурсов более чем в 40 странах мира, можно рекомендовать ее как основную модель для прогноза состояния водных ресурсов под влиянием климата как в условиях Украины, так и Беларуси.

Модель Л. Турка разработана для определенного гидроклиматического региона. Однако она содержит калибровочный коэффициент C и может применяться повсеместно с единственной оговоркой: различные бассейны должны иметь одинаковую сравнительную временную базу (период).

Параметризация водно-балансовой модели

Необходимым условием для успешного моделирования влияния климатических изменений на водные ресурсы является параметризация гидрологической модели с использованием данных регулярных натурных наблюдений. Обычно эта процедура состоит из двух важных этапов – калибровки и валидации. Однако на данный момент для них не существует общепринятой процедуры или инструкции в научной литературе. В то же время есть множество точек зрения, касающихся калибровки и проверки модели, у разработчиков и пользователей.

Калибровка модели Л. Турка подразумевает расчет специально предусмотренного разработчиками калибровочного коэффициента C на основе собранных фактических данных о стоке, осадках и температуре за определенный период. Интервал, за который используются наблюдения для этих расчетов, называется калибровочным периодом. От его правильного выбора зависит точность расчетных параметров водно-балансовой модели и, следовательно, прогноза водного стока, который является конечной целью моделирования. Выбранный калибровочный период должен обеспечивать создание репрезентативных выборок гидрометеорологических данных и правильно отражать структуру генеральной выборки.

В настоящей работе выбор калибровочного периода был обусловлен проведенными ранее исследованиями украинских климатологов, касающимися оценки изменения регионального климата Украины в XXI в., где в качестве сравнительного (базового) периода для климатических сценариев был избран промежуток с 1991 по 2010 г. Указанный 20-летний период позволяет сформировать репрезентативные статистические выборки необходимых гидрометеорологических параметров, однако не учитывает циклично-фазовую структуру гидрологических рядов. Это может вносить определенные погрешности в точность расчета параметров модели и результаты будущего прогноза.

Для валидации модели использовались многолетние ретроспективные периоды наблюдений по главным гидрометеорологическим характеристикам исследуемых водосборов. Суть процедуры заключалась в применении калибровочных параметров модели, установленных на основе наблюдений за базовый климатический период (1991–2010) при составлении так называемого ретроспективного прогноза от начала сбора данных в том или ином речном бассейне до наших дней. Прежде чем приступить к моделированию изменений водности всех рек исследуемого региона, необходимо было произвести калибровочно-валидационные расчеты для исследуемых речных бассейнов с различными условиями формирования стока.

Пример полученных результатов калибровки параметров модели по данным базового климатического периода (1991–2010) для шести репрезентативных бассейнов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Результаты калибровки параметров модели по данным базового климатического периода (1991–2010) для рек Украинских Карпат

Table 2

The results of the calibration of the model parameters according to the base climate period (1991–2010) for the Ukrainian Carpaty rivers

Река	Параметры				
	Ta	Pa	Qa	La	C
Тиса	7,98	1251,6	788,0	524,9	1,60
Уж	9,46	817,1	461,9	578,7	3,30
Свича	8,12	905,4	737,0	529,7	26,0
Стрый	8,53	1023,1	656,1	544,2	4,23
Сирет	7,79	771,3	386,5	518,4	1,81
Прут	7,53	1046,4	733,0	509,5	6,93

Примечание. Ta – среднегодовая температура, °C; Pa – среднегодовая сумма осадков, мм; Qa – среднегодовой слой стока, мм; La – коэффициент регрессии для зависимости стока от температуры; C – калибровочный коэффициент.

Данные параметры были использованы в расчетах ретропрогноза на избранных реках в целях валидации модели. Результаты представлены в виде совмещенных графиков временного хода одной из составляющих водного баланса речного бассейна – водного стока в виде слоя стока. Фактический, или измеренный, слой стока обозначен как $Qa_{\text{факт}}$, а спрогнозированный по водно-балансовой модели Л. Турка – как $Qa_{\text{прогн}}$ (рис. 2).

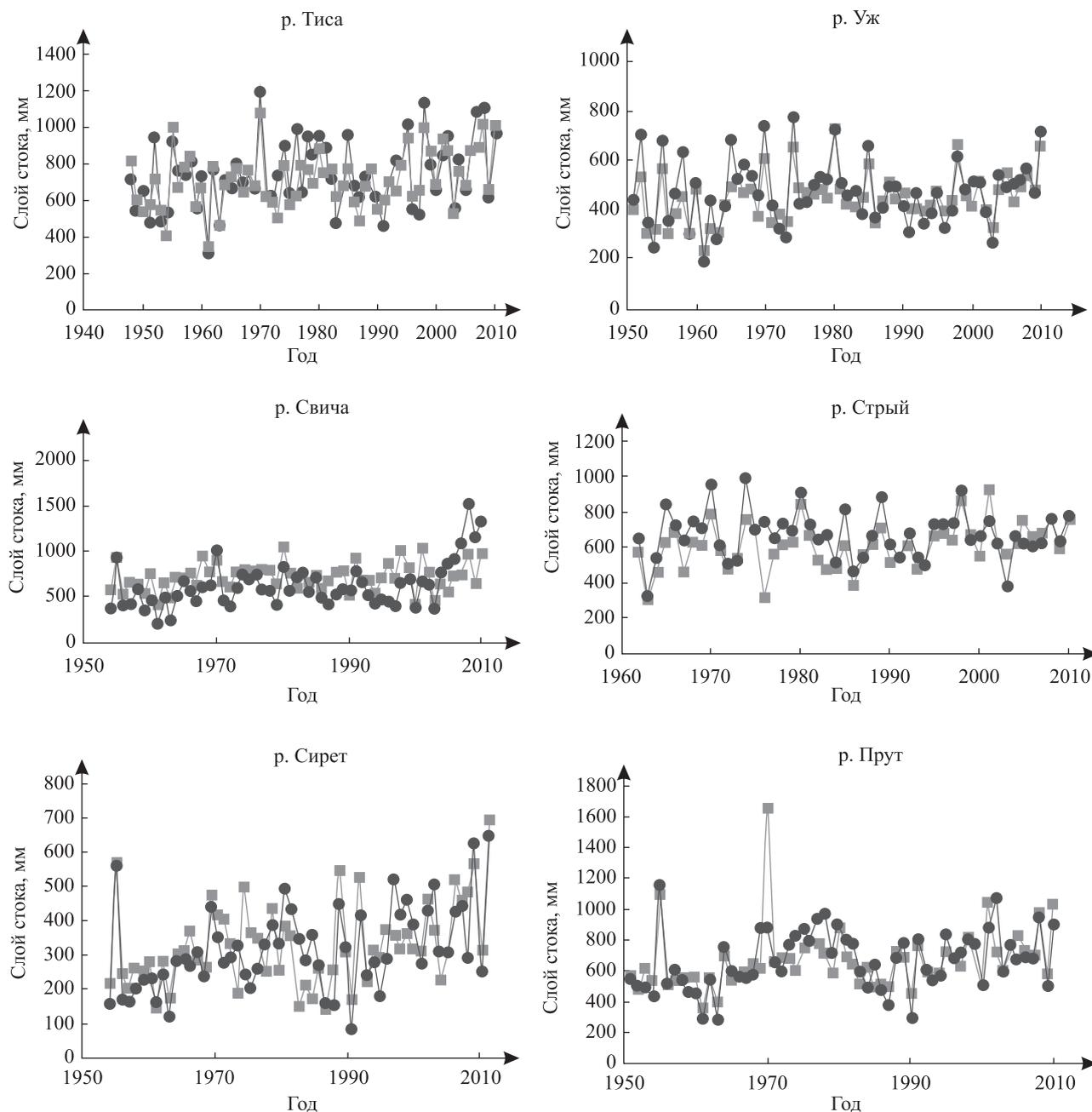


Рис. 2. Результаты сравнения фактических значений среднего годового слоя стока воды ($Qa_{\text{факт}}$ — ●—) исследуемых рек со смоделированным ($Qa_{\text{прогн}}$ — ■—)
 Fig. 2. The results of the comparison of the actual average annual runoff depth of the rivers studied ($Qa_{\text{факт}}$ — ●—) with simulated ($Qa_{\text{прогн}}$ — ■—)

Обобщенные результаты валидации гидрологической модели отражены в табл. 3, которая позволяет сравнить среднегодовые значения слоя водного стока за весь период сбора информации, рассчитанные по данным наблюдений, со смоделированными. Приведены также значения абсолютной ($\Delta Q_{\text{абс}}$) и относительной (ΔQ) погрешностей расчетов.

Таблица 3

Результаты валидации водно-балансовой модели Л. Турка
(ретропрогноз среднегодового расхода воды выбранных рек Украинских Карпат за многолетний период)

Table 3

Results of the validation of water-balance model L. Turc
(retroprognoz average annual flow of the rivers selected of Ukrainian Carpaty for the multi-year period)

Река	Расход воды, мм		Погрешность	
	$Q_{a_{\text{факт}}}$	$Q_{a_{\text{прогн}}}$	$\Delta Q_{\text{абс}}, \text{ мм}$	$\Delta Q, \%$
Тиса	722,2	679,9	42,2	5,85
Уж	468,3	446,8	21,4	2,03
Свича	622,1	712,1	90,0	14,4
Стрый	666,3	610,3	55,9	7,17
Сирет	314,2	331,9	17,6	13,2
Прут	666,5	671,0	4,5	3,39

Как свидетельствуют данные контрольных расчетов, величина относительной погрешности моделирования (ретропрогноза) для четырех рек исследованной группы не превышает 10 %. Несколько снижена точность моделирования для р. Свича и р. Сирет. Это объясняется более сложными условиями формирования стока в их бассейнах и невозможностью достаточного учета циклично-фазовой структуры временных гидрологических рядов этих рек при выборе калибровочного периода. Таким образом, примененные процедуры параметризации расчетной модели позволили получить удовлетворительную точность приближения смоделированных рядов водного стока к фактическим. Величина ошибки в большинстве случаев гораздо меньше или не превышает величины естественной вариации нормы стока исследуемых рек. Валидация модели показала ее пригодность для прогнозирования водного стока (многолетних норм стока) рек Украинских Карпат на ближайшую (2011–2030) и среднесрочную (2031–2050) перспективу с привязкой к данным моделирования климата на эти временные периоды.

Прогноз водного стока основных рек Украинских Карпат для различных временных периодов

Расчет производился с помощью программы *Excel* после калибровки и валидации модели по каждому речному водосбору. Результаты прогноза водного стока для двух указанных периодов приведены в табл. 4–6.

Таблица 4

Исходные и прогнозные значения речного стока бассейна р. Тисы

Table 4

Baseline and projected values of river flow of the Tisza Basin

Река – пункт	Сток за базовый период, мм (1991–2010)	Прогнозный сток, мм		Изменение водности, %		Изменение водности относительно нормы стока, %	
		Год					
		2011–2030	2031–2050	2030	2050	2030	2050
Тиса – г. Рахов	843,2	873,0	865,3	7,8	5,0	–3,49	–6,30
Тиса – п. г. т. Вилок	726,6	794,6	785,7	9,4	8,1	7,76	6,53
Черная Тиса – п. г. т. Ясиня	785,0	853,0	843,2	8,7	7,4	8,66	7,41
Белая Тиса – с. Луги	951,3	1022,8	1013,7	7,5	6,6	–3,79	–4,75
Косовская – с. Косовская Поляна	1223,9	1304,4	1295,7	6,6	5,9	4,38	3,67
Тересва – с. Усть-Чорна	1075,0	1144,1	1132,0	6,4	5,3	7,23	6,10
Рика – п. г. т. Межгорье	840,6	907,0	883,9	7,9	5,2	1,10	–1,65

Окончание табл. 4
Ending table 4

Река – пункт	Сток за базовый период, мм (1991–2010)	Прогнозный сток, мм		Изменение водности, %		Изменение водности относительно нормы стока, %	
		Год					
		2011–2030	2031–2050	2030	2050	2030	2050
Пилипец – с. Пилипец	910,0	981,2	972,1	7,8	6,8	19,83	18,82
Боржава – с. Долгое	838,5	902,4	885,6	7,6	5,6	9,62	7,61
Латорица – с. Подполозье	868,3	935,3	924,1	7,7	6,4	11,82	10,53
Латорица – г. Свалява	644,1	706,1	686,9	9,6	6,6	15,53	12,54
Латорица – г. Мукачево	672,8	736,6	714,4	9,5	6,2	–0,02	–3,31
Латорица – г. Чоп	409,7	476,3	436,0	16,3	6,4	12,66	2,82
Веча – с. Нелепино	964,7	1036,6	1027,9	7,4	6,5	–1,06	–1,95
Старая – с. Зняцево	364,4	418,4	401,8	14,8	10,3	0,83	–3,73
Уж – с. Жорнава	740,4	810,8	802,5	9,5	8,4	8,51	7,38
Уж – с. Заречье	544,0	603,8	589,2	11,0	8,3	6,10	3,41
Уж – м. Ужгород	461,9	520,1	502,8	12,6	8,8	14,39	10,65
Турья – с. Симер	643,3	706,9	697,1	9,9	8,4	7,79	6,26

Таблица 5

Базовые и прогнозные значения речного стока бассейнов рек Прут и Сирет

Table 5

Basic and forecast values of river runoff basins of the rivers Prut and Siret

Река – пункт	Сток за базовый период, мм (1991–2010)	Прогнозный сток, мм		Изменение водности, %		Изменение водности относительно нормы стока, %	
		Год					
		2011–2030	2031–2050	2030	2050	2030	2050
Белый Черемош – с. Яблуница	540,3	567,5	585,0	5,0	8,3	–3,50	–0,26
Ильц – с. Ильцы	612,1	646,4	640,5	5,6	4,6	3,51	2,54
Каменка – с. Дора	348,7	387,3	361,0	11,1	3,5	–9,22	–16,77
Прут – п. г. т. Ворохта	1293,7	1336,8	1353,9	3,3	4,7	–3,60	–2,28
Прут – села Татаров, Кременцы	658,7	696,1	671,1	5,7	1,9	–10,10	–13,89
Прут – г. Яремче	662,9	700,1	676,0	5,6	2,0	–5,01	–8,64
Прут – г. Черновцы	311,0	336,7	336,4	8,3	8,2	–12,31	–12,21
Путила – п. г. т. Путила	428,8	444,1	459,2	3,6	7,1	2,55	6,08
Черемош – с. Устерыки	588,4	617,8	637,3	5,0	8,3	–2,07	1,24
Черный Черемош – п. г. т. Верховина	677,7	711,1	715,0	4,9	5,5	–1,28	–0,71
Чернява – с. Любковцы	151,6	163,1	160,6	7,5	5,9	7,50	5,90
Сирет – г. Сторожинец	313,2	326,6	336,7	4,3	7,5	–19,24	–16,01

Базовые и прогнозные значения речного стока бассейна р. Днестр

Table 6

Basic and predicted values of the river Dniester Basin

Река – пункт	Сток за базовый период, мм (1991–2010)	Прогнозный сток, мм		Изменение водности, %		Изменение водности относительно нормы стока, %	
		Год					
		2011–2030	2031–2050	2030	2050	2030	2050
Быстрица – г. Надворная, с. Пасечная	701,9	738,8	750,7	5,3	7,0	1,96	3,66
Быстрица – с. Озимина	396,8	428,3	434,8	7,9	9,6	–5,54	–3,89
Быстрица – Солотвино – с. Гута	881,9	904,0	923,7	2,5	4,7	–15,06	–12,82
Ворона – г. Тысменица	233,0	262,8	264,1	12,8	13,4	5,86	6,43
Головчанка – с. Тухля	745,2	789,4	803,7	5,9	7,8	–13,44	–11,51
Днестр – г. Галич	347,0	387,8	381,7	11,7	10,0	0,71	1,25
Днестр – п. г. т. Журавно	308,2	358,0	348,6	16,2	13,1	7,65	7,85
Днестр – п. г. т. Роздол	255,0	304,9	294,9	19,6	15,6	12,65	8,72
Днестр – г. Самбор	417,7	463,0	463,8	10,8	11,1	0,60	–2,45
Днестр – с. Стрелки	421,6	465,0	467,2	10,3	10,8	9,63	7,89
Завадка – с. Рыков	744,8	791,0	805,4	6,2	8,1	3,89	5,82
Ломница – с. Осмолода	1064,9	1085,8	1102,9	2,0	3,6	–0,59	1,02
Ломница – с. Перевозец	480,8	513,9	520,4	6,9	8,2	4,63	5,98
Лужанка – с. Гошев	520,9	553,6	558,9	6,3	7,3	–8,18	–7,15
Луква – с. Бондарев	544,7	584,9	601,4	7,4	10,4	–4,35	–1,32
Опир – г. Сколе	576,5	618,1	622,9	7,2	8,1	13,15	13,99
Орава – хут. Станислав	607,9	648,0	655,1	6,6	7,8	8,52	9,69
Рыбник – с. Майдан	863,7	918,8	938,4	6,4	8,6	5,32	7,59
Свича – с. Заречное	622,0	662,0	675,3	6,4	8,6	–12,05	–9,91
Свича – с. Мысливка	855,7	897,5	909,8	4,9	6,3	–5,74	–4,30
Славская – с. Славское	769,3	816,5	831,9	6,1	8,1	5,63	7,63
Стрый – с. Верхнее Синевидное	554,8	596,5	605,6	7,5	9,2	7,95	9,59
Стрый – с. Завадовка	666,5	711,1	724,0	6,7	8,6	8,21	10,16
Стрый – с. Маткив	845,5	896,5	914,4	6,0	8,1	10,09	12,20
Сукил – с. Тисов	711,2	758,6	776,6	6,7	9,2	–5,09	–2,55
Тысменица – г. Дрогобыч	441,8	485,4	495,2	9,9	12,1	–13,22	–11,00
Чечва – с. Спас	591,3	626,4	637,0	5,9	7,7	0,92	2,70

Долгосрочный сценарий водности рек Беларуси

По расчетам И. С. Партасёнок, были составлены долгосрочные сценарии изменения водности белорусских рек в XXI в. в соответствии с повторяемостью солнечной активности и преобладанием типов атмосферной циркуляции [16].

В 2020–30-х гг. есть основания прогнозировать преобладание меридиональной формы (С) циркуляции (табл. 7). В 2030–40-х гг. на фоне максимума векового цикла солнечной активности (2040 г.) вероятно увеличение смешанной (восточной и меридиональной – E + C) формы циркуляции. В 2040–50-х гг. на фоне начала спада векового цикла солнечной активности, скорее всего, будет преобладать меридиональная форма атмосферной циркуляции. В 2050–60-х гг., связанных с 60-летним циклом соединения Юпитера и Сатурна и периодом четного 11-летнего цикла солнечной активности, возможно чередование

форм циркуляции, но все же при некотором преобладании западной формы (*W*). В 2060–70-х гг. характер циркуляции в определенной мере будет таким же, как в 1960-х гг. В этот период может наблюдаться пониженный уровень солнечной активности в вековом цикле и преобладать западная форма циркуляции. В последние три десятилетия XXI в. ожидаются два периода понижения среднегодовых аномалий температуры воздуха – в 2075 и 2095 гг. Первый связан с моментом соединения Сатурна и Урана (цикл соединения – около 45 лет), второй – с максимальными значениями в вековом цикле солнечной активности. Два периода повышения температуры в последние три десятилетия текущего века (2085 и 2105 гг.) будут связаны с периодами нечетных 11-летних циклов. Есть основания прогнозировать преобладание западной формы циркуляции.

Таблица 7

Долгосрочный сценарий отклонений от средних многолетних значений наибольших расходов воды весеннего половодья на части территории Беларуси, %

Table 7

Long-term scenario deviations from multiyear averages largest water spring tide expenses on the part of Belarusian territory, %

Гидрологический район	Форма циркуляции				
	<i>W</i> (до 2010 г.)	<i>E</i> (2011–2020)	<i>C</i> (2021–2030)	<i>E + C</i> (2031–2050)	<i>W</i> (2051–2070)
Западно-Двинский	63–81	129–162	118–129	129–162	63–81
Верхне-Днепровский	40–67	140–171	131–146	146–171	40–67
Вилейский	40–45	150–200	150–160	160–200	40–45
Неманский	33–57	139–187	137–150	150–187	33–57
Центрально-Березинский	53–65	145–165	130–144	144–165	53–65
Припятский	40–76	159–192	123–169	169–192	40–76

До 2010 г. погода в Беларуси была обусловлена западной формой циркуляции (*W*) – соответственно, в зимний сезон наблюдался повышенный сток, а затем – низкое весеннее половодье (см. табл. 7). В текущем десятилетии (2011–2020) отмечается увеличение повторяемости восточной формы (*E*), а также наступление более холодных и снежных зим и высокой водности рек во время весеннего половодья. Если прогноз динамики общей циркуляции атмосферы оправдается, в 2021–2030 гг. восточную форму циркуляции сменит меридиональная (*C*) с холодными зимами и высоким весенним половодьем. В 2031–2050 гг. наступит эпоха смешанной (восточной и меридиональной) циркуляции атмосферы (*E + C*), когда будут наблюдаться условия для формирования высокой водности рек во время весеннего половодья, а наибольшие расходы воды превысят средние значения в 1,5–2,0 раза.

Во второй половине XXI в. следует ожидать чередования повторяемости процессов разных форм, но преобладать будет западная форма циркуляции. Водность рек во время весеннего половодья прогнозируется низкой.

Выводы

Результаты моделирования возможных изменений в стоке рек Украинских Карпат и Беларуси на ближайшие 20–30 лет и долгосрочную перспективу позволили сделать следующие выводы.

Глобальное потепление климата на территории Украины и Беларуси выражается в однонаправленных трендах изменения температуры воздуха и осадков. В ожидаемом изменении стока украинских рек обнаруживаются следующие тенденции: в бассейне р. Тисы в 2030 г. ожидается повышение речного стока в среднем на 6,75 %, а в 2050 г. – на 4,32 %, а в бассейнах рек Прут и Сирет – незначительное уменьшение водности: в среднем на 3,3 % в каждом прогнозном периоде. В бассейне р. Днестр в оба временных интервала водность практически не изменится относительно базового периода (среднее колебание водности по бассейну – 0,5 и 1,3 %), но в пределах бассейна будет наблюдаться как увеличение стока (горные реки), так и его уменьшение (равнинные реки). Полученные оценки изменения водного стока исследуемых рек свидетельствуют о том, что его значительного уменьшения, а следовательно понижения гидроэнергетического потенциала рек, не ожидается.

Гидрометеорологические условия Республики Беларусь существенно различаются во времени и зависят от преобладания формы атмосферной циркуляции, влияние которой прежде всего заметно на сезонном стоке и его внутригодовом распределении. Западная форма циркуляции обуславливает повышенный зимний сток (30–70 % нормы) и весеннее половодье (до 40–80 % нормы). Восточная и меридиональная формы обуславливают низкий меженный сток (60–85 % нормы) и весеннее половодье (до 150–200 % нормы). Это не может не отразиться на энергетических ресурсах северных районов страны.

Полученные результаты характеризуются достаточной точностью, базирующейся на качестве исходных гидрометеорологических данных, прогнозе и методике водно-балансового моделирования, и могут быть использованы не только для оценки гидроэнергетического потенциала рек, но и для разработки мероприятий по адаптации водного хозяйства к ожидаемым климатическим изменениям.

Несмотря на это, авторы не исключают необходимости применения более точных численных методов долгосрочного прогнозирования водного стока рек в ближайшем будущем.

Апробированный балансовый метод прогнозирования изменения стока и состояния водных ресурсов при потеплении климата на ближайшую и долгосрочную перспективу можно использовать в условиях Беларуси. В дальнейшем необходимо уточнить прогнозы для более детальных расчетов водных ресурсов обеих стран. Таким образом, применение балансового метода при оценке водных ресурсов имеет хорошую перспективу.

Библиографические ссылки

1. Sternberg R. Hydropower's future, the environment, and global electricity systems // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010. Vol. 14, issue 2. P. 713–723.
2. Zimmermann M. Energy situation and policy in Switzerland // *Int. J. Ambient Energy.* 2001. Vol. 22, issue 1. P. 29–34.
3. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., et al. (eds.). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, 2008.
4. Лопух П. С. Закономерности развития природы водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана. Минск, 2000.
5. Географический атлас учителя. Минск, 2016.
6. Дослідження регіональних особливостей зміни клімату в Україні у XXI столітті на основі чисельного моделювання. Заключний звіт. № держ. реєстрації 0111U001571 / С. В. Краківська [та ін.]. 2013.
7. Гонченко Є. Д., Лобода Н. С. Оцінювання водних ресурсів України за методом водно-теплого балансу // *Наук. праці УкрНДДГМІ.* 2001. Вип. 249. С. 106–119.
8. Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л., 1969.
9. Лобода Н. С., Гонченко Є. Д. Водні ресурси України у зв'язку з кліматичними умовами // *Україна: геогр. і проблеми сталого розвитку.* Київ, 2004. Т. 3. С. 144–146.
10. Turc L. Evaluation de basoins en eau d'irrigation, ET potentielle // *Ann. Agron.* 1961. Vol. 12. P. 13–49.
11. Turc L. Water Balance of Soils: Relationship between Precipitation, Evapotranspiration and Runoff // *Ann. Agron.* 1954. Vol. 5. P. 491–595 ; Vol. 6. P. 5–131.
12. Kaczmarek Z. Chapter 14: Water Resource Management // *Climate Change 1995: IPCC Second Assessment Report.* Cambridge ; N. Y., 1996. P. 880.
13. Kaczmarek Z., Krasuski D. Sensitivity of Water Balance to Climate Change and Variability // *IIASA Working Paper.* Laxenburg, 1991. P. 7–8.
14. Использование водно-балансовой модели Турка и численной региональной модели REMO оценки водных ресурсов местного стока в Украине в XXI веке / С. И. Снежко [и др.] // *Вестн. Брян. ун-та.* 2014. № 4. С. 191–201.
15. Kaczmarek Z. Polish Water Resources Vulnerability Assessment // *Report to U. S. Countries Studies Program.* 1995.
16. Лопух П. С., Партасенок И. С. Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси. Минск, 2013.

References

1. Sternberg R. Hydropower's future, the environment, and global electricity systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010. Vol. 14, issue 2. P. 713–723. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.016.
2. Zimmermann M. Energy situation and policy in Switzerland. *Int. J. Ambient Energy.* 2001. Vol. 22, issue 1. P. 29–34.
3. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., et al. (eds.). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, 2008.
4. Lopuch P. S. Zakonomernosti razvitiya prirody vodoemov zamedlennogo vodoobmena, ikh ispol'zovanie i okhrana [Regularities in the development of the nature reservoirs slow water exchange, use and protection]. Minsk, 2000 (in Russ.).
5. Geograficheskii atlas uchitelya [Geographical atlas of teachers]. Minsk, 2016 (in Russ.).
6. Krakowska S. V., Palamarchuk L. V., Shedemenko I. P., et al. Regional studies of climate change in Ukraine in the XXI century based on numerical simulation. Final Report. State registration No. 0111U001571. 2013 (in Ukrainian).

7. Gopčenko E. D., Loboda N. S. Ocinnjuvannja vodnyh resursiv Ukrainy za metodom vodno-teplovogo balansu [Estimation of water resources of Ukraine by the method of water-heat balance]. *Naukovyj zbirnyk Ukrain'skogo naukovo-doslidnogo gidrometeorologichnogo instytutu*. 2001. Issue 249. P. 106–119 (in Ukrainian).
8. Mezentsev V. S., Karnatsevich I. V. Uvlazhnenost' Zapadno-Sibirskoi ravniny [Condition of the West Siberian Plain moistening]. Leningr., 1969 (in Russ.).
9. Loboda N. S., Gopčenko E. D. Vodni resursy Ukrainy u zv'jazku z klimatychnymy umovamy [Water resources of Ukraine in connection with climatic conditions]. *Ukrain'ska geogr. i problemy stalogo rozvytku*. Kyiv, 2004. Vol. 3. P. 144–146 (in Ukrainian).
10. Turc L. Evaluation de besoins en eau d'irrigation, ET potentielle. *Ann. Agron.* 1961. Vol. 12. P. 13–49.
11. Turc L. Water Balance of Soils: Relationship between Precipitation, Evapotranspiration and Runoff. *Ann. Agron.* 1954. Vol. 5. P. 491–595 ; Vol. 6. P. 5–131.
12. Kaczmarek Z. Chapter 14: Water Resource Management. *Climate Change 1995: IPCC Second Assessment Report*. Cambridge ; N. Y., 1996. P. 880.
13. Kaczmarek Z., Krasuski D. Sensitivity of Water Balance to Climate Change and Variability. *IIASA Working Paper*. Laxenburg, 1991. P. 7–8.
14. Snezhko S. I., Kuprikov I. V., Shevchenko O. G., et al. Using of the water balance model of turc and numerical regional model for assessment of local water resources in Ukraine in the XXI century. *The Bryansk State Univ. Herald*. 2014. No. 4. P. 191–201 (in Russ.).
15. Kaczmarek Z. *Polish Water Resources vulnerability Assessment*. Report to U. S. Countries Studies Program. 1995.
16. Lopuch P. S., Partasenok I. S. Vliyanie atmosfernoj tsirkulyatsii na formirovanie gidrologicheskogo rezhima rek Belarusi [Influence of atmospheric circulation on the formation of the hydrological regime of rivers of Belarus]. Minsk, 2013 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 17.11.2016.
Received by editorial board 17.11.2016.