*УДК 556.5 (476)*

**ПРОГНОЗ СТОКА РЕК ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ В ГОРНЫХ И РАВНИННЫХ УСЛОВИЯХ**

**(НА ПРИМЕРЕ БЕЛАРУСИ И УКРАИНСКИХ КАРПАТ)**

Снежко С.И., Ободовский А.Г, Лопух П.С.

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко1,2, Белорусский госуниверситет3

**Актуальность исследований**. Примерно 20 % мирового производства электроэнергии приходится на гидроэнергетику. Однако гидроэнергетический потенциал многих стран используется до сих пор далеко не полностью [1]. В горных регионах доля производства гидроэлектроэнергии значительно выше. Например, в Австрии и Швейцарии она превышает 50 % общего производства электроэнергии [2]. Производство гидроэлектроэнергии зависит от водности рек, которая в свою очередь является интегральным показателем увлажненности территории, комплекса природно-климатических факторов. В коротком временном отрезке флуктуацию водного стока определяют кратковременные, а иногда и резкие по амплитуде погодные изменения, которые проявляются в виде сильных осадков, в резком таянии устойчивого снежного покрова или возникновении дождевых паводков. В многолетнем аспекте гидроэнергетическая отрасль зависит от глобального изменения климата, глобального потепления, действие которых во времени имеет однонаправленный характер и может привести как к длительному во времени снижению водного стока рек, так и к его увеличению.

Согласно отчету Межправительственной группы по изменению климата, в XXI веке ожидается общее снижение гидроэнергетического потенциала примерно на 6 % [3]. При этом могут наблюдаться значительные региональные отклонения от этой величины. Так, в Средиземноморском регионе возможно снижение гидроэнергетического потенциала на 20-50 %, в Северной и Восточной Европе - на 15-30 %. Оценка изменения гидроэнергетического потенциала под влиянием глобального потепления Беларуси и Украины ранее не проводилась. В то же время вопрос решения проблемы энергетической независимости этих стран стоит очень остро. Идея развития гидроэнергетики за счет строительства малых экологически безопасных гидроэлектростанций находит все большую поддержку и реализуется на практике, например, на территории Беларуси. Наиболее перспективными для строительства малых ГЭС на территории Украины являются водные объекты Украинских Карпат.

**Характеристика объектов исследований и исходных данных**. С целью повышения роли гидроэнергетики в решении энергетической независимости Беларуси в республике реконструируются малые и строятся мини ГЭС. Более крупные гидроэлектростанции создаются на крупных реках (Гродненская, Витебская, Полоцкая ГЭС). В равнинных условиях территории Беларуси создание гидроэлектростанций регламентируется экологическими ограничениями. С этой целью было выполнено районирование территории Беларуси по степени экологической приемлемости (рис. 1). Реальное распределение гидроэнергетических ресурсов по территории Беларуси крайне неравномерное. Наиболее перспективным районами для строительства ГЭС являются выделенные Поозерский, Нарочано-Вилейский и Неманский [4,5]. Подобные исследования в Украине ранее не проводились.

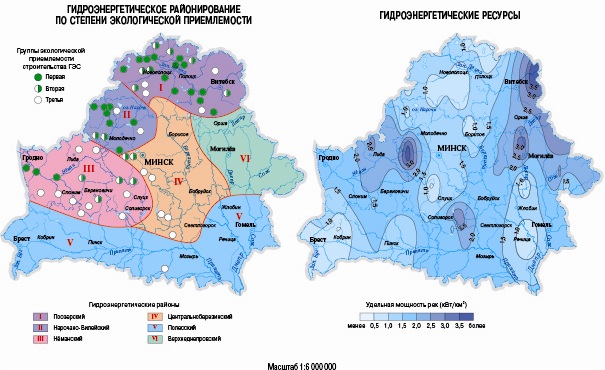


Рис. 1. Перспективы использования потенциальных гидроэнергоресурсов Беларуси

Для проведения исследований на территории Украины были использованы данные многолетних наблюдений Гидрометеорологической службы Украины по основным гидроклиматическим характеристикам (температура воздуха, осадки, водный сток) за период с 1950 по 2015 на 19 метеорологических станциях и 23 гидрологических постах Украинских Карпат: в бассейне Тисы 9 метеорологических станций и 12 гидрологических постов, в бассейне Прута и Серета: 4 метеорологические станции и 3 гидрологические поста; в бассейне Днестра 6 метеорологических станций и 8 гидрологических постов.

Для прогнозирования водного стока рек бассейнов Тисы, Днестра, Прута и Сирета в качестве входных параметров водно-балансовой модели были использованы опубликованные специалистами Украинского гидрометеорологического института НАН Украины (УкрГМИ НАНУ) прогнозные климатические характеристики в Украине на ближайшую (до 2030 г.) и среднюю (к 2050 г.) перспективы [6]. Они выполнены в рамках Европейского проекта FP-6 ENSEMBLES сценария A1B с использованием ансамбля региональных климатических моделей (РКМ).

Для проведения качественной верификации результатов РКМ были использованы базы данных Всемирного климатического центра CRU (Climate Research Unit, University of EastAnglia, Norwich) и база данных E-Obs, которая была разработана в рамках того же проекта ENSEMBLES на основе наибольшего доступного набора данных метеорологической сети Европы (табл. 1).

Таблица 1.

Количественная характеристика исходной информации (метеостанции и узлы сетки) использованной в моделировании климата [7]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Область | Высота, м | | | Количество | | | | |
| Метеорологические станции и посты | | Створы | | |
|  |  |  | Станции | Станции и посты | CRU | E-Obs | РКМ |
| 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, то для оценки возможных изменений температурного режима в Украине в XXI в. был применен ансамбль из десяти РКМ, а для количества осадков - ансамбль из 4 РКМ. Исследования специалистов УкрГМИ НАНУ подтвердили, что эти ансамбли моделей более точно воспроизводят пространственно-временное распределение рассмотренных климатических показателей на исследуемой территории.

Возможные климатические изменения в XXI в. на территории Украины анализировались для двух 20-летних периодов: на ближайшую (2011-2030 гг.) и отдаленную (2031-2050 гг.) перспективы (для средних месячных и годовых температур, месячной и годового количества осадков). Изменения характеристик определялись по отношению к периоду современного климата (1991-2010 гг.). Расчеты проводились для всех узлов расчетной сетки и усреднялись для каждой административной области, выделенных по сходству физико-географических условий, однотипностью проявления климатообразующих факторов, относительной однородностью полей климатических характеристик.

На период 2011-2050 гг. прогнозируемые изменения термического режима исследуемой территории сохраняют тенденцию к потеплению. В первом прогнозном периоде (до 2030 г.) ожидается повышение температуры на 0,40 - 0,41 °С, а во втором прогнозном периоде (к 2050 г.) на 1,21 - 1,27 °С. В Беларуси за последние 25 лет по данным В.И. Мельника температура воздуха на территории Беларуси превысила климатическую норму на 1,2 оС. В ближайшей перспективе эта тенденция сохранится.

Наибольший интерес для дальнейших исследований составляет прогноз изменения нормы осадков на ближайшую и среднюю перспективу. Прогнозные расчеты показывают, что среднее количество осадков на Украине увеличатся в обоих периодах. До 2030 г.. их величина увеличатся на 4-10 % от нормы (1991 - 2010 гг.), а к 2050 г. – на 9-12 %. В первом периоде небольшие изменения в осадках ожидаются в Черновицкой области (увеличение всего на 4 %), а самые большие - в Закарпатской (на 10 %), что в абсолютном выражении будет составлять 25 и 83 мм слоя осадков, соответственно. Во втором прогнозном периоде тенденции к увеличению увлажненности территории водосборов исследуемых рек сохранятся, хотя темп изменений будет разным. В Черновицкой области ожидается наибольший темп роста осадков от 4 % в первом периоде до 9 % во втором. Однако, в абсолютном выражении по сравнению с 1991-2010 гг. количество осадков больше возрастет в Львовской (на 84 мм) и в Закарпатской области (на 74 мм).

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

**Методика исследований**. Интересным является опыт применения метода водного баланса для оценки изменения водности рек на территории Украины. Этот метод более века 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 является простым в использовании и дает возможность достаточно быстро и сравнительно точно провести оценку изменения среднего нормы стока не только для одного отдельно выбранного речного бассейна, но и для всего региона. Другие методы требуют большого объема подготовительных работ (большой перечень параметров среды, значительный объем информации, сложность получения параметров модели).

Точность оценки влияния климатических изменений на водные ресурсы зависят от способности связать изменения в реальных величинах испарения с прогнозируемыми изменениями осадков и потенциального испарения. Рассчитав величину потенциального испарения (максимально возможное испарение) на любой прогнозный период с использованием смоделированных (прогнозных) параметров температуры и суточной солнечной радиации, можно воспользоваться в дальнейшем 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. Лебеды [7], в которой было реализовано уравнения водно-теплового баланса В.С. Мезенцева и др. [10] для решения задачи оценки природных водных ресурсов Украины. Используя этот метод, авторы также выполнили оценку возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления климата[11].

Учитывая растущую доступность результатов моделирования климата по ансамблю РКМ, стоит обратить внимание на применение водно-балансовых методов расчета, которые используют результаты этого моделирования. В частности, заслуживает внимания водно-балансовая модель Турка [12], которая была успешно применена польским гидрологом Z. Kaczmarek [12] в составе рабочей группы по вопросам воздействия климатических изменений на водные ресурсы Межправительственной группы экспертов по вопросам изменения климата.

Данная методика является достаточно чувствительной к изменениям осадков и температуры [13] и позволила получить вполне удовлетворительные результаты прогноза для бассейнов рек Европы. Упомянутая расчетная водно-балансовая модель ориентирована на использование средних годовых данных была предложена французским гидрологом L. Тurc [14], которому впервые удалось установить четкое соотношение между осадками, температурой и стоком. Эта формула получила широкое распространение для прогноза возможных изменений водных ресурсов во второй половине ХХ в. в связи с возникновением новой научной задачи - оценки будущих запасов водных ресурсов вызванных глобальным изменением климата.

Исходя из результатов апробации данной модели на речных бассейнах различных природных зон и сравнение их с результатами US Country Studies program, которые оценивают изменения водных ресурсов в более чем 40 странах мира, можно рекомендовать ее как основную модель для прогнозирования изменений водных ресурсов под влиянием изменения климата как в условиях Украины, так и Беларуси.

Модель L. Turc разработана для определенного гидроклиматического региона. Однако, она содержит Калибровочный коэффициент и может применяться повсеместно с единственной оговоркой о том, что различные бассейны должны иметь одинаковую сравнительную временную базу (период). Модель L. Turc, что описывает соотношение между стоком, осадками и температурой [3].

**Калибровки водно-балансовой модели и ее валидация**. Необходимым условием для успешного моделирования влияния изменения климата на водные ресурсы являются калибровки и валидация гидрологической модели с использованием данных регулярных натурных наблюдений. Процесс калибровки и валидации модели является весьма важным этапом перед использованием ее в исследованиях или в повседневной работе. На данный момент не существует общепринятой процедуры или инструкции в научной литературе для калибровки и валидации. Существует множество точек зрения разработчиков моделей и пользователей по выполнению калибровки и проверки модели.

Калибровки модели Турка предусматривает выполнение процедуры расчета специально предусмотренного разработчиками калибровочного коэффициента ***С*** на основе имеющихся фактических данных о стоке, осадках и температуре за определенный период времени. Период времени, за который используются наблюдения для этих расчетов, называется калибровочным периодом. От правильного выбора калибровочного периода зависит точность расчетов параметров водно-балансовой модели и точность прогноза водного стока, который является конечной целью моделирования. Выбранный калибровочный период должен обеспечивать создание репрезентативных выборок гидрологических и метеорологических данных и правильно отражать структуру генеральной выборки.

В данной работе выбор калибровочного периода был обусловлен ранее проведенными исследованиями украинских климатологов относительно оценки изменений регионального климата Украины в XXI веке, где в качестве сравнительного (базового) для климатических сценариев был избран период с 1991 по 2010 г. Следует отметить, что этот 20-летний период позволяет сформировать репрезентативные статистические выборки необходимых метеорологических и гидрологических параметров, однако не учитывает циклично-фазовую структуру гидрологических рядов. Это может вносить определенные погрешности в точности расчета параметров модели и в результаты будущего прогноза.

Для валидации модели использовались многолетние ретроспективные периоды наблюдений (за весь имеющийся период наблюдений) по основным гидрологическими и метеорологическими характеристиками исследуемых водосборов. Суть процедуры заключалась в использовании калибровочных параметров модели, установленных на основе наблюдений за базовый климатический период 1991-2010 гг. при составлении так называемого ретроспективного прогноза от начала наблюдений в том или ином речном бассейне и до наших дней. Прежде чем приступить к моделированию изменений водности всех рек исследуемого региона, был выполнен комплекс калибровочно-валидационных расчетов для исследуемых речных бассейнов с различными условиями формирования стока.

Таблица - 2.

Результаты калибровки параметров модели по данным базового климатического периода (1991-2010 гг.).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Река | Ta | Pa | Qa | La | С |
| Тиса | 7,98 | 1251,6 | 788,0 | 524,9 | 1,60 |
| Уж | 9,46 | 817,1 | 461,9 | 578,7 | 3,30 |
| Свеча | 8,12 | 905,4 | 737,0 | 529,7 | 26,0 |
| Стрий | 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 |

Пример полученных результатов калибровки параметров модели по данным базового климатического периода (1991-2010 гг.) Для 6 репрезентативных бассейнов Тиса (Рахов), Уж (Ужгород), Стрый (Завадивка), Свича (Заречное), Прут (Яремче) и Сирет (Сторожинец) приведены в табл. 2.

Эти параметры были использованы в расчетах ретропрогноза на избранных реках с целью валидации модели. Результаты расчетов представлены ниже в виде совмещенных графиков временного хода фактических расходов воды (Qфакт) и смоделированных (Qпрогн) по водно-балансовой модели Турка (рис. 2).

|  |  |
| --- | --- |
| Тиса | Уж |
| Свича | Стрый |
| Сирет | Прут |

Рис. 2. Результаты сравнения фактических средних годовых расходов воды исследуемых рек с моделированными.

Для обобщения результатов валидации гидрологической модели составлена таблица 3, в которой представлено сравнение норм водного стока за весь имеющийся период наблюдений рассчитанных по данным гидрологических наблюдений (Qa факт) со смоделированными (Qa прогн). Приведены также значения абсолютной и относительной погрешностей расчетов.

Таблица 3. Результаты валидации водно-балансовой модели Турка(ретропрогноз среднего годового расхода воды выбранных рек за многолетний период)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Река | Qa факт | Qa прогн | ΔQ | ΔQ % |
| 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, относительная погрешность моделирования (ретропрогноза) находится в пределах 2,03-14,4 %. Для четырех рек исследованной группы ее величина не превышает и 10 %.Несколько снижена точность моделирования для двух рек (Свича и 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. В общем валидация модели показала ее пригодность для моделирования водного стока (многолетних норм стока) рек Украинских Карпат на ближайшую (2011-2030 гг.) и среднюю перспективу (2031 - 2050) с привязкой к имеющимся данным моделирования климата на эти временные периоды.

**Прогноз водного стока основных рек региона для различных временных периодов**. Расчет производился с помощью программы "Excell" после калибровки и валидации модели по каждому речному водосбору. Результаты прогноза водного стока для двух прогнозных периодов в ХХІ столетии приведены в табл. 4-6.

Таблица 4. Исходные и прогнозные значения речного стока басейна Тисы

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Река-пункт | Сток за базовый период (1991 -2010гг.), мм | Прогнозный сток, мм | | Изменение  водности, % | | Изменение водности относительно нормы стока, % | |
| 2011-2030 гг. | 2031-2050 гг. |
| 2030 г. | 2050 г.. | 2030 г.. | 2050 г. |
| Тиса - м. Рахов | 843,2 | 873,0 | 865,3 | 7,8 | 5,0 | -3,49 | -6,30 |
| Тиса - смт. Вилок | 726,6 | 794,6 | 785,7 | 9,4 | 8,1 | 7,76 | 6,53 |
| Чорна Тиса - смт.Ясеня | 785,0 | 853,0 | 843,2 | 8,7 | 7,4 | 8,66 | 7,41 |
| Бела 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 |
| Река - смт.Междугорье | 840,6 | 907,0 | 883,9 | 7,9 | 5,2 | 1,10 | -1,65 |
| Пилипец - с.Пилипец | 910,0 | 981,2 | 972,1 | 7,8 | 6,8 | 19,83 | 18,82 |
| Боржава - с.Довге | 838,5 | 902,4 | 885,6 | 7,6 | 5,6 | 9,62 | 7,61 |
| Лоторица - с.Подполоззе | 868,3 | 935,3 | 924,1 | 7,7 | 6,4 | 11,82 | 10,53 |
| Латориця - м.Свалява | 644,1 | 706,1 | 686,9 | 9,6 | 6,6 | 15,53 | 12,54 |
| Лоторица - м. Мукачево | 672,8 | 736,6 | 714,4 | 9,5 | 6,2 | -0,02 | -3,31 |
| Лоторица - м.Чоп | 409,7 | 476,3 | 436,0 | 16,3 | 6,4 | 12,66 | 2,82 |
| Вича - 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.Жорнова | 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 - м.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

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Река-пункт | Сток за базовый период (1991 -2010гг.), мм | Прогнозный сток, мм | | Изменение  водности, % | | Изменение водности относительно нормы стока, % | |
| 2011-2030 гг. | 2031-2050 гг. |
| 2030 г. | 2050 г.. | 2030 г.. | 2050 г. |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Белый Черемош - с.Яблуница | 540,3 | 567,5 | 585,0 | 5,0 | 8,3 | -3,50 | -0,26 |
| Ильца - с.Ильцы | 612,1 | 646,4 | 640,5 | 5,6 | 4,6 | 3,51 | 2,54 |
| Камянка - с. Дора | 348,7 | 387,3 | 361,0 | 11,1 | 3,5 | -9,22 | -16,77 |
| Прут - Ворохта | 1293,7 | 1336,8 | 1353,9 | 3,3 | 4,7 | -3,60 | -2,28 |
| Прут - с. Татарив (Кременцы) | 658,7 | 696,1 | 671,1 | 5,7 | 1,9 | -10,10 | -13,89 |
| Прут - м. Яремче | 662,9 | 700,1 | 676,0 | 5,6 | 2,0 | -5,01 | -8,64 |
| Прут - м. Черновцы | 311,0 | 336,7 | 336,4 | 8,3 | 8,2 | -12,31 | -12,21 |
| Путила - смт. 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 - смт. Верховина | 677,7 | 711,1 | 715,0 | 4,9 | 5,5 | -1,28 | -0,71 |
| Чорнява - с. Любкивцы | 151,6 | 163,1 | 160,6 | 7,5 | 5,9 | 7,50 | 5,90 |
| Сирет - м.Сторожинец | 313,2 | 326,6 | 336,7 | 4,3 | 7,5 | -19,24 | -16,01 |

Таблица 6. Базовые и прогнозные значения речного стока басейна Днестра.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Река-пункт | Сток за базовый период (1991 -2010гг.), мм | Прогнозный сток, мм | | Изменение  водности, % | | Изменение водности относительно нормы стока, % | |
| 2011-2030 гг. | 2031-2050 гг. |
| 2030 г. | 2050 г.. | 2030 г.. | 2050 г. |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Быстрица - Надвор. - Пасична | 701,9 | 738,8 | 750,7 | 5,3 | 7,0 | 1,96 | 3,66 |
| Быстрица - Озимина | 396,8 | 428,3 | 434,8 | 7,9 | 9,6 | -5,54 | -3,89 |
| Быстрица - Солотв. - Гута | 881,9 | 904,0 | 923,7 | 2,5 | 4,7 | -15,06 | -12,82 |
| Ворона - Тисменица | 233,0 | 262,8 | 264,1 | 12,8 | 13,4 | 5,86 | 6,43 |
| Головчанка - Тухля | 745,2 | 789,4 | 803,7 | 5,9 | 7,8 | -13,44 | -11,51 |
| Днестр - Галич | 347,0 | 387,8 | 381,7 | 11,7 | 10,0 | 0,71 | 1,25 |
| Днестр - Журавно | 308,2 | 358,0 | 348,6 | 16,2 | 13,1 | 7,65 | 7,85 |
| Днестр - Роздол | 255,0 | 304,9 | 294,9 | 19,6 | 15,6 | 12,65 | 8,72 |
| Днестр - Самбир | 417,7 | 463,0 | 463,8 | 10,8 | 11,1 | 0,60 | -2,45 |
| Днестр - Стрелки | 421,6 | 465,0 | 467,2 | 10,3 | 10,8 | 9,63 | 7,89 |
| Завадка - Рыков | 744,8 | 791,0 | 805,4 | 6,2 | 8,1 | 3,89 | 5,82 |
| Лимница - Осмолода | 1064,9 | 1085,8 | 1102,9 | 2,0 | 3,6 | -0,59 | 1,02 |
| Лимниця - Перевозец | 480,8 | 513,9 | 520,4 | 6,9 | 8,2 | 4,63 | 5,98 |
| Лужанка - Гошев | 520,9 | 553,6 | 558,9 | 6,3 | 7,3 | -8,18 | -7,15 |
| Луква - Бондарев | 544,7 | 584,9 | 601,4 | 7,4 | 10,4 | -4,35 | -1,32 |
| Опир - Сколе | 576,5 | 618,1 | 622,9 | 7,2 | 8,1 | 13,15 | 13,99 |
| Орава - Святослав | 607,9 | 648,0 | 655,1 | 6,6 | 7,8 | 8,52 | 9,69 |
| Рыбник - Майдан | 863,7 | 918,8 | 938,4 | 6,4 | 8,6 | 5,32 | 7,59 |
| Свича - Заречне | 622,0 | 662,0 | 675,3 | 6,4 | 8,6 | -12,05 | -9,91 |
| Свича - Мысливка | 855,7 | 897,5 | 909,8 | 4,9 | 6,3 | -5,74 | -4,30 |
| Славська - лавське | 769,3 | 816,5 | 831,9 | 6,1 | 8,1 | 5,63 | 7,63 |
| Стрый - Верх. Синновидне | 554,8 | 596,5 | 605,6 | 7,5 | 9,2 | 7,95 | 9,59 |
| Стрый - Завадивка | 666,5 | 711,1 | 724,0 | 6,7 | 8,6 | 8,21 | 10,16 |
| Стрый - Маткив | 845,5 | 896,5 | 914,4 | 6,0 | 8,1 | 10,09 | 12,20 |
| Сукил - Тисов | 711,2 | 758,6 | 776,6 | 6,7 | 9,2 | -5,09 | -2,55 |
| Тисменица - Дрогобуч | 441,8 | 485,4 | 495,2 | 9,9 | 12,1 | -13,22 | -11,00 |
| Чечва - Спас | 591,3 | 626,4 | 637,0 | 5,9 | 7,7 | 0,92 | 2,70 |

|  |  |
| --- | --- |
| Бассейн Тисы | |
|  |  |
| Бассейн Днестра | |
|  |  |
| Бассейн Прута | |
|  |  |

Рис. 2. Прогноз изменения (%) водного стока основных рек Украинских Карпат для различных временных периодов.

## **Долгосрочный сценарий водности рек Беларуси.** По расчетам И.С. Партасенок для условий Беларуси были составлены долгосрочные сценарии изменения водности рек Беларуси в XXI веке в соответствии с повторяемостью солнечной активности и преобладанием типов атмосферной циркуляции [15].

В третьем десятилетии века есть основания ожидать преобладание формы С циркуляции. В четвертом десятилетии века на фоне максимума векового цикла (2040 г.) ожидается увеличение меридиональных форм (Е + С) циркуляции. В пятом десятилетии века на фоне начала спада векового цикла солнечной активности ожидается преобладание меридиональ­ных форм атмосферной циркуляции. В шестом десятилетии века, связанное с 60-летним циклом соединения Сатурна и Юпитера и периодом четного 11-летнего цикла солнечной активности можно ожидать чередования форм циркуляции, но все же при некотором преобладании западной (W) формы. В седьмом десятилетии характер циркуляции в определенной мере будет таким же, как в 60-х годах прошлого века. В этот период будет наблюдаться пониженный уро­вень солнечной активности в вековом цикле, преобладание формы W циркуляции. В последние три десятилетия ожидаются два периода понижения среднегодовых анома­лий температуры воздуха – в 2075 и 2095 гг. Первое из них связано с моментом соединения Урана и Сатурна (45 лет), а второе — с мак­симальными значениями в вековом цикле солнечной активности. Два же периода повышения температуры в последние три десятилетия текущего века (в 2085 и 2105 гг.) связаны с перио­дами нечетных 11-летних циклов. Есть основания ожидать преобладания формы W циркуляции (таблица 7).

В первой строке, представлены формы циркуляции и период, когда они будут преобладать. Если прогноз динамики общей циркуляции атмосферы оправдается, то в ближайшее десятилетие погода в Беларуси будет по-прежнему обусловлена западной формой циркуляции и соответственно будет наблюдаться повышенный сток в зимний сезон и низкие весеннее половодье. Наибольшие расходы весеннего половодья в этот период составят 63-81 % от средних многолетних значений на реках Западно-Двинского района, 40-67 % - в Верхне-Днепровском и Центрально-Березинском районах, 33-57 % в Вилейском и Неманском районах, 40-76 % в Припятском районе.

Со второго десятилетия предполагается увеличение повторяемости восточной формы и наступление более холодных и снежных зим и высокой водности рек Беларуси во время весеннего половодья. Наибольшие расходы весеннего половодья составят 129-162 % от средних многолетних значений в Западно-Двинском районе, 140-171 % - в Верхне-Днепровском и Центрально-Березинском районах, 150-200 % - в Вилейском районе, 139-187 % - в Неманском районе, 159-192 % - в Припятском районе.

Затем восточную сменит меридиональная форма циркуляции с холодными зимами и высоким весенним половодьем. Наибольшие расходы весеннего половодья составят 118-129 % в Западно-Двинском районе, 130-150 % - в Верхне-Днепровском, Центрально-Березинском и Неманском районах, 150-160 % в Вилейском районе, 123-169 % в Припятском районе. В 30-х годах наступит эпоха смешанной восточной и меридиональной циркуляции атмосферы, когда наблюдаются условия для формирования высокой водности рек во время весеннего половодья, а наибольшие расходы воды превышают средниезначения в 1,5-2 раза. Наибольшие расходы весеннего половодья в этот период составят 129-162 % от средних многолетних значений, 144-171 % - в Верхне-Днепровском и Центрально-Березинском районах, 160-200 % в Вилейском районе, 150-18 7% в Неманском районе, 169-192 % - в Припятском районе.

Таблица 7 - Долгосрочный сценарий отклонений от средних многолетних значений наибольших расходов воды весеннего половодья (%)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Гидрологический  район | W  до 2010г. | Е  2011-2020гг. | С  2021-2030гг. | Е+С  2031-2050гг. | W  2051-2070гг. |
| I Западно-Двинский | 63-81% | 129-162% | 118-129% | 129-162% | 63-81% |
| II Верхне-Днепровский | 40-67% | 140-171 | 131-146% | 146-171% | 40-67% |
| III Вилейский | 40-45% | 150-200 | 150-160% | 160-200% | 40-45% |
| IV Неманский | 33-57% | 139-187% | 137-150% | 150-187% | 33-57% |
| V Центрально-Березинский | 53-65% | 145-165% | 130-144% | 144-165% | 53-65% |
| VI Припятский | 40-76 | 159-192% | 123-169% | 169-192% | 40-76% |

Во второй половине текущего столетия следует ожидать чередование повторяемости процессов разных форм, но преобладать будет западная форма циркуляции. Водность рек во время весеннего половодья ожидается низкая, как в настоящую эпоху западной циркуляции атмосферы.

**Выводы.** Результаты моделирования возможных изменений в стоке рек Украинских Карпат и территории Беларуси на ближайшие 20-30 лет и на более далекую перспективу позволил сделать следующие выводы.

Глобальные изменения климата имеют однонаправленные тренды на территории Украины и Беларуси и выражаются в однонаправленных трендах изменения температуры воздуха и осадков. Однако, в ожидаемом изменении стока рек обнаруживаются две противоположные тенденции.

В бассейне Тисы в 2030 г. прогнозируется повышение речного стока в среднем на 6,75%, а в 2050 на 4,32%. В бассейнах Прута и Сирета ожидается незначительное уменьшение водности рек в среднем на -3,3% в каждом прогнозном периоде. В бассейне Днестра в оба периода водность ожидается практически неизменной относительно базового периода (среднее изменение водности по бассейну 0,5 и 1,3%), но в пределах бассейна будет наблюдаться как увеличение стока (горные реки), так и уменьшение стока (равнинные реки). Полученные оценки изменения водного стока исследуемых рек свидетельствуют о том, что существенного уменьшения водного стока рек, а сооответственно и их гидроэнергетического потенциала, ожидать не следует.

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

Полученные результаты характеризуются достаточной точностью, базирующейся на качестве исходных гидрологических и метеорологических данных, результатах климатического прогноза и методики водно-балансовой моделирования и могут быть использованы не только для оценки гидроэнргетического 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 прогнозирования водных ресурсов при потеплении климата на ближайшую и далекую перспективу можно использовать в условиях Беларуси. В будущем необходимо уточнение прогнозов для более детальных расчетов водных ресурсов обеих стран.

Применение балансового метода при оценке водных ресурсов имеет хорошую перспективу.

Б И Б Л И О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С П И С О К

1. Sternberg, R. (2010), Hydropower's future, the environment, and global electricity systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(2),713–723, doi:[10.1016/j.rser.2009.08.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.016).
2. Zimmermann, M. (2001), Energy situation and policy in Switzerland, *Int. J. Ambient Energy*, **22**(1),29–34.
3. Technical Paper on Climate Change and Water Resources. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change,  2008. 356 P.
4. Лопух П.С. Закономерности развития природы водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана. – Минск: БГУ. – 332 с.
5. Географический атлас учителя. Минск: Белкартография: Госкомимущества, 2016. 392 с.
6. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С. Оцінювання водних ресурсів України за методом водно-теплового балансу // Наук. Праці УкрНДГМІ.− 2001. – Вип. 249. − С. 106−119.
7. Kaczmarek Z. Water Balance Model for Climate Impact Analysis, ACTA Geophysica Polonica. −1993. − 41 (4). – Р. 1–16.
8. Kaczmarek Z. Chapter 14: ‘Water Resource Management’, in Watson R. T., Zinyowera M. C., Moss R. H. (eds.), Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York. – 1996. − Р. 880.
9. Kaczmarek Z. Sensitivity of Water Balance to Climate Change and Variability, IIASA Working Paper WP-91-047. – 1991. − Рp. 7–8.

10. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. –Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 168 с.

1. Лобода Н.С., Гопченко Є.Д. Водні ресурси України у зв’язку з кліматичними умовами // Україна: географічні проблеми сталого розвитку. – К.: ВГЛ Обрії. − 2004. – Т. 3. – С.144–146.
2. Turc L. Water Balance of Soils: Relationship between Precipitation. Evapotranspiration and Runoff. Annales Agronomiques. – 1954. − Vol. 5. −P. 491−595 and Vol. 6. −Pp. 5−131.
3. Kaczmarek Z. Chapter 14: ‘Water Resource Management’, in Watson R. T., Zinyowera M. C., Moss R. H. (eds.), Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York. – 1996. − Р. 880.
4. Turc, L., 1961. Evaluation de bаsoins en eau d’irrigation, ET potentielle, Ann. Agron. 12:13-49/
5. Лопух П.С., Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси / П.С лопух, И.С. Партасенок. Минск: БГУ, 2013. – 216 с.

Literaure

1. Sternberg, R. (2010), Hydropower's future, the environment, and global electricity systems, Renew. Sustain. Energy Rev., 14(2),713–723, doi:10.1016/j.rser.2009.08.016.

2. Zimmermann, M. (2001), Energy situation and policy in Switzerland, Int. J. Ambient Energy, 22(1), p.29–34.

3. Technical Paper on Climate Change and Water Resources. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008. 356 P.

4. Lopuch P.S. Regularities in the development of the nature reservoirs slow water exchange, use, and protection. -Minsk: BSU. -332 P.

5. Geographikal Atlas of teacters. Мinsk: Belkartograpfy: Goskomimusctestvo, 2016. 392 P.

6. Gopčenko e. d., Loboda n.s. estimation of water resources of Ukraine by the method of water-heat balance//science. Labor UkrNDGMÌ. − 2001. – T. 249. − P. 106−119.

7. Kaczmarek Z. Water Balance Model for Climate Impact Analysis, ACTA Geophysica Polonica. −1993. − 41 (4). – Р. 1–16.

8. Kaczmarek Z. Polish Water Resources Vulnerability Assessment, Report To U. S. Countries Studies Program. – 1995.

9. Kaczmarek Z. Sensitivity of Water Balance to Climate Change and Variability, IIASA Working Paper WP-91-047. – 1991. − Рp. 7–8.

10. Mezentsev v.s., Kornacevich I.v. Hydration of the West Siberian Plain. -L.: Gidrometeoizdat, 1969. -168 p.

11. Loboda n.s., Gopčenko e. d. water resources of Ukraine in connection with climatic conditions//Ukraine: geographical problems of sustainable development. – K.: VGL Horizons. − in 2004. – T. 3. P. 144 – 146. .

12. Turc L. Water Balance of Soils: Relationship between Precipitation. Evapotranspiration and Runoff. Annales Agronomiques. – 1954. − Vol. 5. −P. 491−595 and Vol. 6. −Pp. 5−131.

13. Kaczmarek Z. Chapter : ‘Water Resource Management’, in Watson R. T., Zinyowera M. C., Moss R. H. (eds.), Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York. – 1996. − Р. 880.

14. Turc, L., 1961. Evaluation de bаsoins en eau d’irrigation, ET potentielle, Ann. Agron. 12:13-49/

15. Lopuch P.S., Influence of atmospheric circulation on the formation of the hydrological regime of rivers of Belarus/P.S. Lopuch, I.S.. Partasenok. Minsk: BSU, 2013. -216 p.

Сведения об авторах:

**Снежко Сергей Иванович.** доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии Киевского национальный университета им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

E-mail: tempo@2007meta.ua

**Ободовский Александр Григорьевич,** доктор географических наук, профессор, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

E-mail: obodovskiy@univ.kiev.ua

**Лопух Петр Степанович,** доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой общего землеведения и гидрометеорологии БГУ.

Тел. раб 209-3-21.

моб. 605-39-30

E-mail: [lopuch49@mail.ru](mailto:lopuch49@mail.ru)

Data on the author

|  |  |
| --- | --- |
| first name, last name, patronymic | Lopuch Piotr Stepanovich |
| place of work | Belarusian State University, Geographical faculty, Department of Earth Science and Hydrometeorology |
| scientific degree | Doctor of Geographical Sciences |
| academic status | Associate Professor |
| address | 220050, Belarus, Minsk, Leningradskaya 16 |
| e-mail | novika@bsu.by |
| number of mobile phone | +375296053930 |
| number of service phone | +375172095321 |

Data on the author

|  |  |
| --- | --- |
| first name, last name, patronymic | Snezko Sergej Ivanovich |
| place of work | Kievskij National University, Geographical faculty, Department of Meteorology |
| scientific degree | Doctor of Geographical Sciences |
| academic status | Associate Professor |
| address | Ukraina, Kiev |
| e-mail | E-mail: tempo@2007meta.ua |
| number of mobile phone |  |
| number of service phone |  |

Data on the author

|  |  |
| --- | --- |
| first name, last name, patronymic | Obodovskij Aleksandr Grigorievich |
| place of work | Kievskij National University, Geographical faculty, Department of Meteorology |
| scientific degree | Doctor of Geographical Sciences |
| academic status | Associate Professor |
| address | Ukraina, Kiev |
| e-mail | E-mail: obodovskiy@univ.kiev.ua |
| number of mobile phone |  |
| number of service phone |  |

Реферат

УДК 556.5

ПРОГНОЗ СТОКА РЕК ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ В ГОРНЫХ И РАВНИННЫЪХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛАРУСИ И УКРАИНСКИХ КАРПАТ)

Рассматриваются вопросы влияния потепления климата на формирование водных ресурсов Украинских Карпат и на территории Беларуси на ближайшую и далекую перспективу. Анализируются результаты применения методов моделирования и балансов для расчета прогноза стока рек Украинских Карпат. Для условий Беларуси приведены результаты прогноза стока рек Беларуси на основе анализа типов атмосферной циркуляции. Апробированный балансовый метод прогнозирования изменения стока и прогнозирования водных ресурсов при потеплении климата на ближайшую и далекую перспективу рекомендуется использовать в условиях Беларуси. В будущем необходимо уточнение прогнозов для более детальных расчетов водных ресурсов обеих стран. Применение балансового метода при оценке водных ресурсов имеет хорошую перспективу.

Ключевые слова: ПОТЕПЛЕНИЕ, ПРОГНОЗ, БАЛАНСОВЫЙ МЕТОД, ЦИРКУЛЯЦИЯ, ЭНЕРГЕТИКА, КАРПАТЫ, БЕЛАРУСЬ

ABSTRACT

UDC 556.5

RIVERS FLOW FORECAST FOR ASSESSMENT OF THEIR USE IN THE ENERGY TO IN MOUNTAIN AND CONDITIONS RAVNINNYH (ON THE EXAMPLE OF BELARUS AND UKRAINIAN CARPATY)

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 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.

Keywords: Warming, forecast, balance sheet liability method, Circulation, Energy, Carpaty, Belarus.

**Подписи к рисункам и таблицам (ответственный автор – П.С. Лопух, 605-3930 велком)**

Fig. 1. Prospects for the use of hydropower potential of Belarus

Table1. Quantitative characteristyk of the initial information (weather stations and grid nodes) used in climate modeling

Table. 2. The results of the calibration of the model parameters according to the base climate period (1991-2010 gg.)

Fig. 2. The results of the comparison of the actual average annual costs of water of the rivers studied with simulated

Table 3. Results of the validation of water-balance model Turka (retroprognoz average annual flow of the rivers selected for the multi-year period)

Table 4. Baseline and projected values of river flow of the Tisza Basin

Table 5. Basic and forecast values of river runoff basins of the rivers Prut and Siret

Table 6. Basic and predicted values of the river Dniester Basin

Fig. 2. Forecast of change (%) of water flow of the main rivers of the Ukrainian Carpathians for different time periods

Table 7 Long-term scenario deviations from multiyear averages largest water spring tide expenses (%)

Названия рек и населенных пунктов я направил на Украин7у в Киев для координации и перевода на русский.