

С.В. Краковська, Н.В. Гнатюк

## ЗМІНИ ПОВЕРХНЕВОГО РІЧКОВОГО СТОКУ В УКРАЇНІ ДО 2050 Р. ЗА ПРОЕКЦІЄЮ РЕГІОНАЛЬНОЇ КЛІМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕМО

Проведено оцінку майбутніх змін поверхневого річкового стоку на території України на основі результатів розрахунків регіональної кліматичної моделі РЕМО. Проаналізовано кількісні сценарії щодо можливих змін багаторічного середнього поверхневого стоку води для чотирьох сезонів і сумарного за рік у період 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр. для п'яти регіонів та всієї території України. Разом з усередненими за площею значеннями поверхневого стоку обчислено їх мінімальні та максимальні зміни у кожному регіоні відносно рівня стоку у контрольний стандартний кліматичний період 1961–1990 рр.

**Ключові слова:** поверхневий річковий стік в Україні, регіональна кліматична модель, проекція кліматичних змін.

**Вступ.** Індустріалізація світового виробництва призвела до порушення глобальної кліматичної системи Землі. Глобальні зміни клімату протягом ХХ ст. характеризувалися такими особливостями: глобальна приземна температура повітря підвищилась приблизно на  $0,74 \pm 0,18$  °С, кількість опадів у Північній півкулі збільшилась на 5–10 %, зросли кількість злив і випадків екстремальних опадів у середніх та високих широтах Північної півкулі, зокрема у Європі, а також темпи аридизації в Азії та Африці, середній рівень Світового океану підвищувався щорічно на 1–2 мм, тривалість льодоставу на річках і озерах Північної півкулі знизилась приблизно на два тижні, товщина льодового покриву арктичних морів зменшилась на 15–40 %, сніговий покрив скоротився на 10 %, а багаторічна мерзлота почала деградувати [6, 13].

Високою є ймовірність того, що значне підвищення глобальної приземної температури, яке спостерігається з середини ХХ ст., здебільшого спричинено підвищенням концентрацій парникових газів, які утворилися внаслідок саме промислової діяльності. Значне зростання вмісту в атмосфері групи антропогенних газів призвело до парникового ефекту в приземному шарі атмосфери і стало причиною глобальних змін клімату [12, 13]. Кліматичні зміни не могли не вплинути на материкові водні ресурси, однією із складових яких є річковий стік. Зменшення стоку може означати зменшення водопостачання та загрозу економічному розвитку будь-якої держави. Зростання стоку може загрожувати переповненню побудованих водосховищ та потенційною можливістю розвитку паводків із значними матеріальними збитками та можливими людськими жертвами.

Завдання цього дослідження – виявлення тенденцій зміни поверхневого річкового стоку в Україні в умовах можливих змін клімату до 2050 р.

**Методика.** Одним із основних інструментів вивчення кліматичних змін у сучасній кліматології є чисельне кліматичне моделювання [3, 4, 7–11]. Для оцінки майбутніх змін поверхневого водного стоку були використані результати розрахунків регіональної кліматичної моделі РЕМО, розробленої в Інституті Макса Планка з метеорології (м. Гамбург, Німеччина) [9–11]. Ця модель була багаторазово успішно перевірена в моделюванні сучасного клімату практично всіх європейських країн, є одною з базових моделей двох європейських проєктів FP-6 CECILIA (<http://www.cecilia-eu.org/>) та CLAVIER (<http://www.clavier-eu.org/>) для побудови сценаріїв кліматичних змін у країнах Східної Європи. Крім того, регіональна модель РЕМО визначена як оптимальна для прогнозу можливих змін регіонального клімату України в ХХІ ст. на основі проведених досліджень в УкрГМІ у відділах фізики атмосфери та чисельних гідрометеорологічних досліджень [1, 2, 5].

Регіональну модель РЕМО розроблено в Інституті Макса Планка з метеорології (м. Гамбург) на основі гідродинамічної прогностичної моделі Центру погоди Німеччини [10]. Використано повернуту сферичну систему координат – екватор проходить через центр області моделювання для зменшення впливу кривизни Землі на прямокутність координатної сітки, вертикальні рівні розміщені вздовж підстильної поверхні і з висотою перетворюються в паралельні до ізобаричних за спеціальним співвідношенням. Підстильна поверхня представлена більш ніж 10 типами з різними властивостями, зокрема альbedo, теплопередачі, інфільтрації та змін рослинного покриву протягом року, що впливає саме на формування поверхневого стоку. Оскільки поверхневий стік є комплексним параметром, що залежить від низки факторів, у моделі РЕМО він параметризований як результат взаємодії кількості опадів, підстильної поверхні, від типу якої зале-

жить інфільтрація, та приземної температури, з якою пов'язане випаровування [11].

Початковими та граничними умовами для регіональної моделі можуть бути дані метеорологічних спостережень (для верифікації моделей та досліджень сучасних кліматичних змін) або результати розрахунків моделей загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО), які ще називають глобальними кліматичними моделями. В проведеному дослідженні використані дані регіональної моделі РЕМО, розрахованої з початковими та граничними умовами МЗЦАО ЕСНАМ5, яку також було розроблено в Інституті Макса Планка з метеорології (м. Гамбург) і яка визнана найоптимальнішою для території України [3, 4]. Такий підхід отримав назву “динамічне масштабування”, коли від сітки глобальних моделей з горизонтальними кроками у 100–250 км переходять на регіональний масштаб з кроком сітки 10–50 км за допомогою розрахунків гідродинамічних моделей, які спроможні врахувати вплив на кліматичні характеристики саме регіональних особливостей підстильної поверхні, на відміну від “статистичного масштабування”, коли використовують досить прості співвідношення між даними глобальних моделей та параметрами регіонального клімату.

Проекції майбутніх кліматичних умов МЗЦАО будують за спеціально розробленими “сценаріями”, в яких, зокрема, передбачені різні можливі напрями розвитку як суспільства (гомогенізований або гетерогенний світ), так і економічних умов, від чого залежатимуть майбутні зміни концентрацій та розподілів за площею планети парникових газів та аерозолів, які здатні значно впливати на кліматичну систему. У проведеному дослідженні використано розрахунки моделі ЕСНАМ5, що ґрунтувалися на емісійному сценарії А1В за номенклатурою ІРСС [12], який є найуживанішим у сучасних наукових дослідженнях. Цей сценарій вважають найвірогіднішим за сучасних тенденцій розвитку паливно-енергетичного комплексу з помірним та збалансованим використанням викопних видів палива і альтернативних джерел енергії.

Фізико-географічне положення та розміри території України зумовлюють певну відмінність прояву тут сучасних кліматоутворювальних процесів – розподілу й кількісних значень радіаційних потоків, впливу різнорівневих циркуляційних процесів, відмінностей у характері рельєфу та типах підстильної поверхні. Як наслідок, фактичний просторовий розподіл кліматичних характеристик є неоднорідним. З огляду на зазначені обставини і з метою виявлення і врахування можливих територіальних відмінностей у змінах поверхневого стоку в межах України, а також адекватного використання числових моделей не лише для всієї території в цілому, а й для окремих її частин, в ме-

жах території України виділено 5 регіонів – захід, північ, схід, південь і центр. Під час районування враховували такі чинники: *подібність* фізико-географічних умов, *однотипність* прояву кліматоутворювальних чинників, відносну *однорідність* кліматичних полів температури та опадів, адміністративно-територіальний поділ держави. Останній чинник застосовано з метою адаптування даних досліджень до стратегічного планування ведення господарства й розвитку регіонів.

Оцінювали зміну багаторічного середнього поверхневого стоку для чотирьох сезонів і сумарного за рік у період 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр. за значеннями у кожній комірці 25×25 км розрахункової сітки регіональної кліматичної моделі РЕМО ( $\approx 1200$  вузлів), які усереднювали для 5 регіонів і всієї території країни (табл.1, 2, рис. 1, 2).

**Результати та висновки.** Аналіз результатів обробки даних проекцій регіональної кліматичної моделі дає змогу дійти таких висновків:

- 1) зміни поверхневого водного стоку нерівномірні як у просторі, так і за часом для всієї території країни і для кожного з регіонів, але усереднені за регіонами значення становлять  $\pm 10$  мм для всіх сезонів і регіонів;
- 2) максимальне збільшення поверхневого стоку прогнозується у Карпатських горах, на півночі й на сході країни для річних значень та в усі сезони, за винятком весни;
- 3) значне зменшення стоку передбачається навесні майже на всій території держави, вочевидь через зменшення снігового покриву взимку.

Проаналізуємо прогнозовані зміни поверхневого стоку за сезонами та регіонами окремо.

Для зими зміни мають найбільший діапазон (від  $-28$  до  $38$  мм). Збільшення стоку передбачається на Лівобережжі Дніпра, Поліссі та у Карпатах максимально до  $40\%$ . Зменшення поверхневого стоку очікується в центрі та на півдні держави – до  $-10$  мм, що може перевищити зменшення на  $80\%$  від кліматичної норми в окремих вузлах півдня.

Навесні, як зазначено вище, зміни стоку переважно від’ємні з мінімальним абсолютним значенням  $-28$  мм на півночі, що становить зменшення на  $35\%$  від кліматичної норми. У відносних одиницях максимальне зменшення обчислено для півдня ( $-46\%$ ), хоча й абсолютні зменшення там найменші, ніж для інших регіонів ( $-12$  мм). Це пов’язане з тим, що абсолютні значення стоку на півдні найменші, тому у відносних одиницях навіть невеликі зміни даватимуть значні відсотки.

Для літа зміни здебільшого позитивні. Максимальне значення вираховано для півночі ( $+29$  мм), усереднене відносне збільшення також максимальне серед регіонів і дорівнює  $38\%$ . Загалом збільшення понад  $20$  мм визначено для  $1\%$  території, від  $15$  до  $20$  мм –  $1,5\%$  території, від  $10$  до

Таблиця 1. Зміни поверхневого річкового стоку в 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр., мм

| Сезон (місяці)        | Регіон |      |       |       |      |       |       |      |       |      |      |       | Україна |      |       |      |      |       |
|-----------------------|--------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|---------|------|-------|------|------|-------|
|                       | Північ |      |       | Захід |      |       | Центр |      |       | Схід |      |       | Південь |      |       | мін. | сер. | макс. |
|                       | мін.   | сер. | макс. | мін.  | сер. | макс. | мін.  | сер. | макс. | мін. | сер. | макс. | мін.    | сер. | макс. |      |      |       |
| Зима<br>(XII–I–II)    | -8     | 10   | 27    | -21   | 6    | 38    | -8    | 1    | 21    | -4   | 7    | 25    | -10     | -4   | 5     | -21  | 4    | 38    |
| Весна<br>(III–IV–V)   | -28    | -11  | 3     | -24   | -5   | 8     | -22   | -9   | 3     | -18  | -4   | 7     | -12     | -4   | 2     | -28  | -7   | 8     |
| Літо<br>(VI–VII–VIII) | -2     | 8    | 29    | -5    | 5    | 17    | -3    | 4    | 13    | -2   | 5    | 11    | -2      | 1    | 5     | -5   | 4    | 29    |
| Осінь<br>(IX–X–XI)    | -2     | 3    | 14    | -24   | 0    | 8     | -5    | 0    | 4     | -1   | 1    | 4     | -3      | 0    | 2     | -24  | 1    | 14    |
| Рік                   | -17    | 10   | 54    | -34   | 5    | 40    | -20   | -5   | 17    | -4   | 9    | 25    | -18     | -8   | 6     | -34  | 2    | 54    |

Примітка: Тут і в табл. 2: мін. – мінімальні значення, сер. – середні, макс. – максимальні. Области, що увійшли в регіони: *північ* – Житомирська, Київська, Чернігівська, Сумська; *захід* – Закарпатська, Львівська, Івано-Франківська, Чернівецька, Хмельницька, Тернопільська, Волинська, Рівненська, Кіровоградська, Черкаська, Дніпропетровська, Полтавська; *схід* – Харківська, Донецька, Луганська, Миколаївська, Запорізька, Херсонська, АР Крим. Кількість вузлів в регіонах, за якими проводилися усереднення: *північ* – 235, *захід* – 263, *центр* – 253, *схід* – 169, *південь* – 249. Загалом по Україні – 1169.

Таблиця 2. Зміни поверхневого річкового стоку в 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр., %

| Сезон (місяці)        | Регіон |      |       |       |      |       |       |      |       |      |      |       | Україна |      |       |      |      |       |
|-----------------------|--------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|---------|------|-------|------|------|-------|
|                       | Північ |      |       | Захід |      |       | Центр |      |       | Схід |      |       | Південь |      |       | мін. | сер. | макс. |
|                       | мін.   | сер. | макс. | мін.  | сер. | макс. | мін.  | сер. | макс. | мін. | сер. | макс. | мін.    | сер. | макс. |      |      |       |
| Зима<br>(XII–I–II)    | -14    | 16   | 42    | -26   | 8    | 33    | -23   | 0    | 38    | -10  | 11   | 41    | -83     | -19  | 10    | -83  | 3    | 42    |
| Весна<br>(III–IV–V)   | -35    | -15  | 4     | -32   | -6   | 12    | -41   | -18  | 9     | -32  | -7   | 32    | -46     | -15  | 19    | -46  | -13  | 32    |
| Літо<br>(VI–VII–VIII) | -26    | 38   | 151   | -16   | 14   | 89    | -17   | 25   | 162   | -26  | 33   | 135   | -100    | 13   | 196   | -100 | 24   | 196   |
| Осінь<br>(IX–X–XI)    | -8     | 15   | 62    | -56   | -1   | 27    | -59   | -6   | 43    | -22  | 10   | 60    | -100    | -6   | 187   | -100 | 2    | 187   |
| Рік                   | -12    | 5    | 21    | -28   | 2    | 23    | -20   | -5   | 12    | -3   | 6    | 16    | -73     | -15  | 13    | -73  | -2   | 23    |

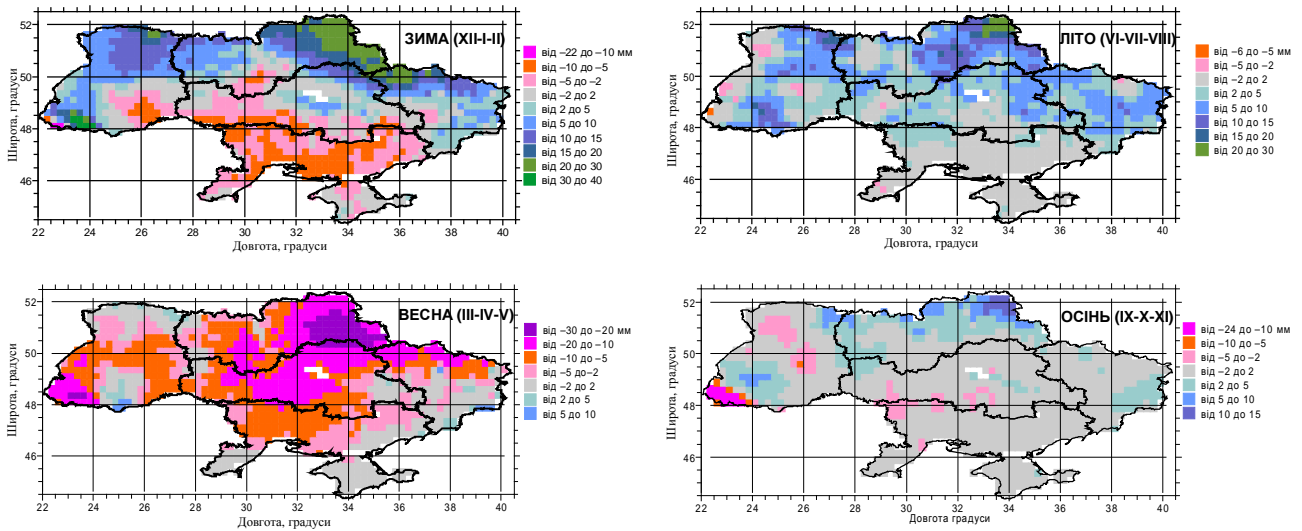


Рис. 1. Зміни поверхневого стоку (мм) за сезонами у 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр.

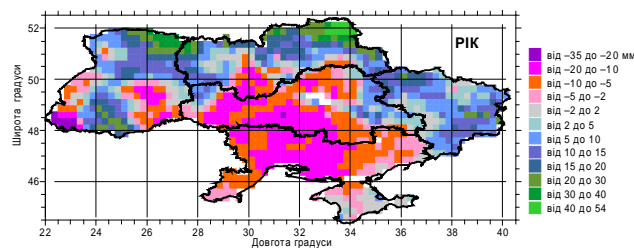


Рис. 2. Зміни річного поверхневого стоку (мм) у 2021–2050 рр. відносно 1961–1990 рр.

15 мм – 7 %, від 5 до 10 мм – понад 25 %, від 2 до 5 мм – майже 30 % території. На третині території країни (33,4 %) зміни поверхневого стоку влітку становлять  $\pm 2$  мм, зменшення від  $-2$  до  $-6$  мм прогнозується тільки у 1,5 % загальної кількості модельних вузлів на території України. У відносних одиницях таке зменшення в усіх регіонах не перевищує  $-26$  % від кліматичної норми, за винятком півдня, де зменшення навіть на декілька міліметрів призводить до повного припинення поверхневого стоку ( $-100$  %, див. табл. 2). Зауважимо також, що й максимальне збільшення до майже  $+200$  % також отримано для півдня влітку (як і для осені) через низькі (декілька міліметрів) абсолютні значення річкового стоку в регіоні.

Восени зміни мають діапазон від  $-24$  мм у Закарпатті (1,5 % території України) до  $+15$  мм на сході Чернігівської та півночі Сумської областей (північний регіон). На переважній більшості території України (69,7 %) зміни поверхневого стоку незначні і становлять  $\pm 2$  мм. Практично такі самі усереднені значення отримано для кожного з регіонів та всієї країни. Втім у відносних одиницях є відмінності між регіонами, оскільки отримано збільшення усередненого стоку на 10 % на сході й на 15 % на півночі, зменшення на  $-6$  % у центрі і на півдні та практично без змін ( $-1$  % або 0 мм) на заході.

Зміни річного поверхневого стоку, усереднені для всієї території України, близькі до

нуля (див. табл. 1, 2), але їх просторовий розподіл – неоднорідний в межах держави (рис. 2). Це означає, що відбуватиметься перерозподіл річного поверхневого стоку на території країни із зменшенням на півдні (в середньому на  $-15$  %, максимально до  $-73$  %) і Закарпатті (максимально до  $-28$  % або на  $-34$  мм) й збільшенням на півночі (максимально на  $+54$  мм або  $+21$  %), сході (максимально на  $+25$  мм або  $+16$  %) та Прикарпатті (максимально на  $+40$  мм або  $+23$  %). Відбудеться перерозподіл сумарного річного стоку і за сезонами із збільшенням стоку взимку і влітку, зменшенням навесні та практично без змін восени (див. рис. 1).

Таким чином, результати дослідження мають знайти широке практичне застосування в галузях економіки і наукових напрямках, пов'язаних із використанням водних ресурсів, та можуть стати основою для подальшої розробки адаптаційних та пом'якшувальних заходів щодо зміни річкового стоку в Україні до середини XXI ст.

Авторами використано дані європейського проекту EU-FP6 ENSEMBLES, зокрема регіональної кліматичної моделі REMO [8]. Дослідження частково виконано в рамках науково-дослідних робіт Інституту газу НАН України “Дослідження вразливості до зміни клімату енергетичної галузі, включаючи процеси виробництва електричної і теплової енергії, передачу і споживання паливно-енергетичних ресурсів”.

1. *Краковская С.В.* Региональная модель (РЕМО) в изучении сильных осадков в Карпатах / Краковская С.В., Паламарчук Л.В., Дюкель Г.А. // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2008. – Т. 50, ч.1. – С. 75–80.
2. *Краковська С.В.* Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (РЕМО) щодо прогнозу приземної температури повітря за контрольний період 1961–90 рр. / Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. // *Наук. праці УкрНДГМІ*. – 2008. – Т. 257. – С. 42–60.
3. *Краковська С.В.* Моделі загальної циркуляції атмосфери та океанів у прогнозуванні змін регіонального клімату України в XXI ст. / Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. // *Геофиз. журн.* – 2011. – Т. 6, № 33. – С. 68–81.
4. *Паламарчук Л.В.* Сезонні зміни клімату в Україні в XXI столітті / Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Краковська С.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О. // *Наук. праці УкрНДГМІ*. – 2010. – Т. 259. – С. 104–120.
5. *Паламарчук Л.В.* Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (РЕМО) щодо прогнозу поля опадів в Україні за контрольний період 1961–1990 рр. / Паламарчук Л.В., Краковська С.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. // *Там само*. – 2009. – Т. 258. – С. 69–84.
6. *Alcamo J.* Europe // *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / J. Alcamo, J.M. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, R.J.N. Devo, C. Giannakopoulos, E. Martin, J.E. Olesen, A. Shvidenko [Eds M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson ]. – Cambridge: Cambr. Univ. Press, UK, 2007. – P. 541–580.
7. *Christensen J.H.* Regional Climate Projections // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of* WG I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // J.H. Christensen, B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, P. Whetton [Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller]. – Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, 2007. – P. 847–940.
8. *ENSEMBLES* [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://ensembles-eu.metoffice.com>
9. *Jacob D.* A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin // *Meteorol. Atmos. Phys.* – 2001. – V. 77. – P. 61–73.
10. *Jacob D.* Sensitivity studies with the regional climate model REMO / Jacob D., Podzun R. // *Ibid.* – 1997. – V. 63. – P. 119–129.
11. *Kotlarski S.* Regional climate model simulations as input for hydrological applications: Evaluation of Uncertainties / S. Kotlarski, A. Block, U. Böhm, D. Jacob, K. Keuler, R. Knoche, D. Rechid, A. Walter // *Advances in Geosciences*. – 2005. – V. 5. – P. 119–125.
12. *Nakićenović N.* Special Report on Emissions Scenario / Eds N. Nakićenović, R. Swart // *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, 2000. – 599 p.
13. *Trenberth K.E.* Observations: Surface and Atmospheric Climate Change // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / K.E. Trenberth, P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden, P. Zhai [Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller]. – Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, 2007. – P. 235–336.

*Український гідрометеорологічний інститут, Київ, Україна*  
E-mail: [krasvit@ua.fm](mailto:krasvit@ua.fm)

*Надійшла до редакції 27.05.2013 р.*

*С.В. Краковская, Н.В. Гнатюк*

## **ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЧНОГО СТОКА В УКРАИНЕ ДО 2050 г. ПО ПРОЕКЦИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕМО**

Проведена оценка будущих изменений поверхностного речного стока на территории Украины на основе результатов расчетов региональной климатической модели РЕМО. Проанализированы количественные сценарии возможных изменений многолетнего среднего поверхностного речного стока для четырех сезонов и суммарного за год в период 2021–2050 гг. относительно 1961–1990 гг. для пяти регионов и всей территории Украины. Вместе с осредненными по площади значениями поверхностного стока определены их минимальные и максимальные изменения в каждом регионе относительно уровня стока в контрольный стандартный климатический период 1961–1990 гг.

**Ключевые слова:** поверхностный речной сток в Украине, региональная климатическая модель, проекция климатических изменений.

**CHANGES OF SURFACE RIVER RUNOFF IN UKRAINE TILL 2050 BASED ON THE PROJECTION OF REGIONAL CLIMATE MODEL REMO**

An assessment of future changes in surface river runoff in Ukraine has been performed on the basis of projections of the regional climate model REMO. We have analyzed quantitative scenarios of possible changes in multi-year average surface runoff for four seasons and annually in the period of 2021–2050 relative to 1961–1990 for five selected regions and the entire territory of Ukraine. The area averaged values of surface runoff with minima and maxima in each selected area are determined in mm and in percentage to the level of runoff in the control standard climate period 1961–1990.

**Keywords:** surface river runoff in Ukraine, regional climate model, climate change projection.