

УДК 504.453:556.535

ОЦІНКА МОЖЛИВИХ ЗМІН ВОДНИХ РЕСУРСІВ РІЧОК ВОДОЗБОРУ КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОРІЧЧЯ (2021-2050 РР.) ЗА МОДЕЛЯМИ КЛІМАТИЧНОГО СЦЕНАРІЮ RCP4.5

Н. С. Лобода, А. М. Куза, О. М. Козлов

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>

Актуальність роботи обумовлена необхідністю передбачення стану водних ресурсів малих та середніх річок Північно-Західного Причорномор'я у ХХІ сторіччі з метою обґрунтування стратегії розвитку господарства Одеської області. Серед водних об'єктів території, яка розглядалась, знаходиться Куяльницький лиман, унікальні бальнеологічні властивості якого використовуються для оздоровлення людей ще з кінця ХІХ сторіччя. В результаті глобального потепління та будівництва великої кількості штучних водойм на водозборах річок з 90-х років минулого сторіччя почалося обміління лиману. Прогнози можливого притоку прісних вод від річок до лиману у найближчому майбутньому мають велике значення для оцінки перспектив охорони та збереження природних ресурсів лиману. Метою роботи є визначення можливого стану водних ресурсів водозбору Куяльницького лиману у період 2021-2050 рр. на базі імітаційного математичного моделювання за моделлю "клімат-стік" з використанням метеорологічних даних 14 моделей кліматичного сценарію RCP4.5. Оцінки зонального (кліматичного) річного стоку були надані для шести метеорологічних станцій, розташованих на водозборі Куяльницького лиману та суміжних з ним територіях. Для кожної із розглянутих моделей були надані осереднені по території оцінки водних ресурсів, ресурсів тепла та вологи. Показано, що зміни водних ресурсів при порівнянні із даними минулого сторіччя будуть знаходитися у межах від -82,6 % (модель CLMcom3) до +75,4 % (модель MPI-CSC2). Для подальших розрахунків була розглянута середньостатистична модель, яка являє собою результат осереднення усіх розглянутих моделей. Установлено, що найкраще узгодження розрахункових та фактичних тенденцій змін кліматичних чинників формування стоку спостерігається саме для середньої статистичної моделі. Згідно із цією моделлю на водозборі Куяльницького лиману у 2021-2050 рр. очікується зростання ресурсів тепла на +12,3 % при незначному (-1,80 %) зменшенні ресурсів зволоження. В результаті зменшення водних ресурсів території буде становити 25,5 %. Перехід до природного річного стоку окремих водотоків, які живлять лиман, дозволив виявити, що у 2021-2050 рр. згідно із сценарієм RCP4.5 середній багаторічний приплив прісної води від річки Великий Куяльник буде становити 16,5 млн. м³, а приплив від інших водотоків – 1.3 млн. м³.

Ключові слова: Куяльницький лиман, модель клімат-стік, моделі кліматичного сценарію RCP4.5, зміни водних ресурсів

1. ВСТУП

На території Північно-Західного Причорномор'я на початку ХХІ сторіччя відбувається зростання температур повітря на фоні майже незмінних опадів, що викликало зменшення водних ресурсів досліджуваної території [1]. Скорочення припливу прісних вод від водотоків, які допіру жили закриті лимани Причорномор'я, призвело до всихання останніх, зменшення площ водної поверхні та об'ємів, швидкого зростання солоності води, порушення сталого водного та

сольового балансів [2]. Ці обставини створили загрозу погіршення рекреаційних властивостей лиманів та вплинули на умови риборозведення [3]. Перед загрозою знищення опинилися унікальні природні ресурси Куяльницького лиману [4], на території якого функціонує з кінця ХІХ сторіччя Клінічний санаторій імені Пирогова. З метою запобігання цій загрозі був введений у дію у 2014 р. трубопровід "море-лимани", через який подаються додаткові об'єми води до лиману з Одеської затоки, запобігаючи його вси-

ханню. Разом із морською водою до лиману з Одеської затоки надходять солі та забруднювальні речовини. У зв'язку із цим Одеською облдержадміністрацією [5] була поставлена задача оцінки перспектив часткової компенсації дефіциту води у лимані прісними водами водотоків, які впадають до Куяльницького лиману. Стік річок, які живлять Куяльницький лиман, суттєво трансформований внутрішньорічним його регулюванням штучними водоймами [6]. В умовах потепління наслідки впливу зарегулювання великою кількістю ставків та малих водосховищ посилюються [7]. Виявлено, що збільшення припливу вод від річок водозбору Куяльницького лиману (насамперед, річки Великий Куяльник) можливе лише за умов проведення оптимізації штучних водойм, що буде сприяти відновленню природного стоку. Проте доцільність заходів по відновленню стоку річки Великий Куяльник та інших приток від надмірної кількості штучних водойм залежить від клімату найближчого майбутнього [8]. У випадку значного зменшення стоку річок водозбору Куяльницького лиману за рахунок потепління, суттєвий вплив якого розпочався в Україні з 1989 р. [9], заходи по відновленню природного стоку річки за рахунок оптимізації водогосподарської діяльності не принесуть бажаного ефекту [10]. За моделлю "клімат-стік" визначено, що природний середній багаторічний стік річки Великий Куяльник за розрахунковий період 1989-2014 рр. мав би становити 20,4 млн. м³, а фактично (за даними спостережень) дорівнював лише 3,5 млн. м³. Установлено, що лише 21,5 % зменшення стоку обумовлено змінами клімату, які відбулися [11]. Більш ніж 50 % зменшення водних ресурсів лиману пов'язане із водогосподарською діяльністю, а саме – із втратами на майже щорічне заповнення штучних водойм, повний об'єм яких на деяких притоках перевищує річний об'єм стоку [12]. Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю прогнозування можливих змін водних ресурсів водозбору Куяльницького лиману у майбутньому для наукового обґрунтування заходів по їх збереженню та відновленню.

Метою роботи є визначення можливого стану водних ресурсів водозбору Куяльницького лиману у період 2021-2050 рр. на базі імітаційного математичного моделювання за моделлю "клімат-стік" з використанням даних 14 моделей кліматичного сценарію RCP4.5. Об'єктом дослідження є річки водозбору Куяльницького лиману. Предметом дослідження є характеристики природного річного стоку приток, які впа-

дають до Куяльницького лиману, у найближчі десятиріччя XXI сторіччя. У попередніх дослідженнях можливих наслідків змін клімату та водних ресурсів на території Північно-Західного Причорномор'я були використані сценарії A1B, A2 [13], та за однією з моделей сценаріїв RCP8.5 та RCP4.5 [14]. Отримані результати дозволили установити формування стійких тенденцій до зменшення припливу прісних вод від водотоків у Куяльницький лиман за рахунок потепління. В даній роботі для прогнозів можливого стану водних ресурсів річок водозбору Куяльницького лиману.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У даній роботі розглянуто 14 регіональних математичних моделей сценарію RCP4.5, який відноситься до сценаріїв концентрацій парникових газів сімейства RCP (Representative Concentration Pathways – «характерні траєкторії змін концентрації»). Сценарії RCP являють собою набір сценаріїв, в яких задають зміни середнього вмісту парникових газів в атмосфері Землі в залежності від передбачуваної динаміки викидів парникових газів та інших факторів. Ці сценарії прийняті в П'ятій Доповіді IPCC (2013) [15]. Сценарій RCP4.5 відноситься до "помірних" і передбачає, що глобальні викиди парникових газів у атмосферу Землі повинні почати зменшуватись після 2040 р. Як розрахунковий обраний 30-ти річний період 2020-2050 рр.

Оцінка водних ресурсів досліджуваної території за метеорологічними даними виконана за моделлю "клімат - стік", розробленою в ОДЕКУ під керівництвом професорів Є. Д. Гопченка та Н. С. Лободи [16]. Модель надає можливість розрахунків стоку річок при відсутності даних спостережень, значному перетворенні стоку водогосподарською діяльністю та за даними кліматичних сценаріїв [17]. Базовим для визначення природного стоку річки є рівняння водно-теплогового балансу, яке при використанні сценаріїв змін регіонального клімату представляється у такому виді [18]

$$Y_k^j = X^j + (w_1 - w_2)^j - E_m^j \left[1 + \left(\frac{X^j + (w_1 - w_2)^j}{E_m^j} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

де Y_k^j – значення кліматичного стоку за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм;
 E_m^j – значення максимально можливого випарування за розрахунковий період в умовах змін

клімату, мм; X' – сума річних опадів за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм; $(w_1 - w_2)'$ – зміна запасів води у діяльному шарі ґрунту за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм; n - параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов формування стоку й береться рівним 3. При переході до багаторічного періоду структура рівняння водно-теплового балансу набуває вигляду

$$\overline{Y'_K} = \overline{X'} - \overline{E'_m} \left[1 + \left(\frac{\overline{X'}}{\overline{E'_m}} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (2)$$

де $\overline{Y'_K}$ – середня багаторічна величина кліматичного річного стоку в умовах змін клімату, мм; $\overline{E'_m}$ – середня багаторічна величина максимально можливого випаровування в умовах змін клімату, яка визначається за сценарними температурами повітря, мм; $\overline{X'}$ – середня багаторічна величина річних сум опадів в умовах змін клімату, мм.

За моделлю “клімат-стік” були оцінені характеристики ресурсів зволоження $\overline{X'}$, теплоенергетичних ресурсів $\overline{E'_m}$ клімату та природні водні ресурси $\overline{Y'_K}$ для 30-ти річного періоду (2021-2050 рр.) по кожній із 14 регіональних моделей, які реалізували сценарій RCP4.5. Слід зазначити, що середня багаторічна величина річного стоку $\overline{Y'_K}$, розрахована за метеорологічними даними, має назву кліматичного стоку і може розглядатись як характеристика природного (не порушеного водогосподарською діяльністю) зонального річного стоку. Відносна похибка між середніми багаторічними значеннями річного стоку, установленого за даними спостережень, та розрахованого за моделлю “клімат-стік” знаходиться у межах $\pm 10\%$ [19]. Розрахунки середніх багаторічних значень кліматичного річного стоку виконувались для шести метеорологічних станцій (Любашівка, Одеса, Роздільна, Сербка, Затишшя, Вознесенськ), які знаходяться на водозборі Куяльницького лиману або на прилеглих до нього територіях. Оцінка змін кліматичних чинників та кліматичного стоку надавалися у вигляді відносних відхилень δ середніх багаторічних характеристик, які спостерігались до початку значущих кліматичних змін (1989 р.), та у розрахунковий період 2021-2050 рр. Оцінки ресурсів вологи,

тепла та водних ресурсів виконувались як для кожної із 14 моделей сценарію RCP4.5, так і для середньостатистичної моделі, який є результатом осереднення даних, отриманих для всіх розглянутих моделей. Такий підхід дозволив урахувати особливості кожної із 14 моделей регіональних змін клімату та отримати осереднений варіант, у якому “нівелюються” похибки, окремо розглянутих моделей. За результатами просторового узагальнення зонального річного стоку виконаний перехід до середніх багаторічних значень природного стоку з урахуванням впливу підстильної поверхні [20].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Під час розгляду можливих змін температур повітря (за 14 моделями сценарію RCP4.5) установлено, що у середньому очікується статистично значуще їх зростання як за рік (рис. 1), так і теплий й холодний періоди.

Якщо розглянути коливання середніх температур повітря холодного періоду (ХІІ-ІІІ) по метеостанції Любашівка, яка знаходиться в області формування стоку річки Великий Куяльник і є найбільш впливовою, то можна зробити висновки, що температури повітря переважно знаходяться у області додатних значень. Ця обставина указує на несприятливі умови для формування весняного водопілля, оскільки при додатних температурах повітря у холодний період зменшується запас води у сніговому покриві та зростають втрати талих вод на інфільтрацію у непромерзлі ґрунти. Від'ємні температури можливі тільки у 2020, 2024, 2027 роки (рис. 2).

Дослідження хронологічного ходу річних сум опадів показали, що у середньому на протязі розрахункового періоду 2021-2050 рр. статистично значущі тренди у коливаннях опадів формуватися не будуть (рис. 3, рис. 4).

Виявлено, що прогноз температур повітря та опадів за середньостатистичною моделлю добре узгоджується із даними спостережень (рис. 5, рис. 6), чого не можна сказати про окремі моделі (рис. 7).

Прогнози змін кліматичних чинників формування стоку та стану водних ресурсів водозбору Куяльницького лиману у розрахунковий період 2021-2050 рр. надавалися як у абсолютних величинах, так і у вигляді відносних відхилень δ середніх багаторічних характеристик, які спостерігались до 1989 р., та у розглядуваний розрахунковий період (2021-2050 рр.).

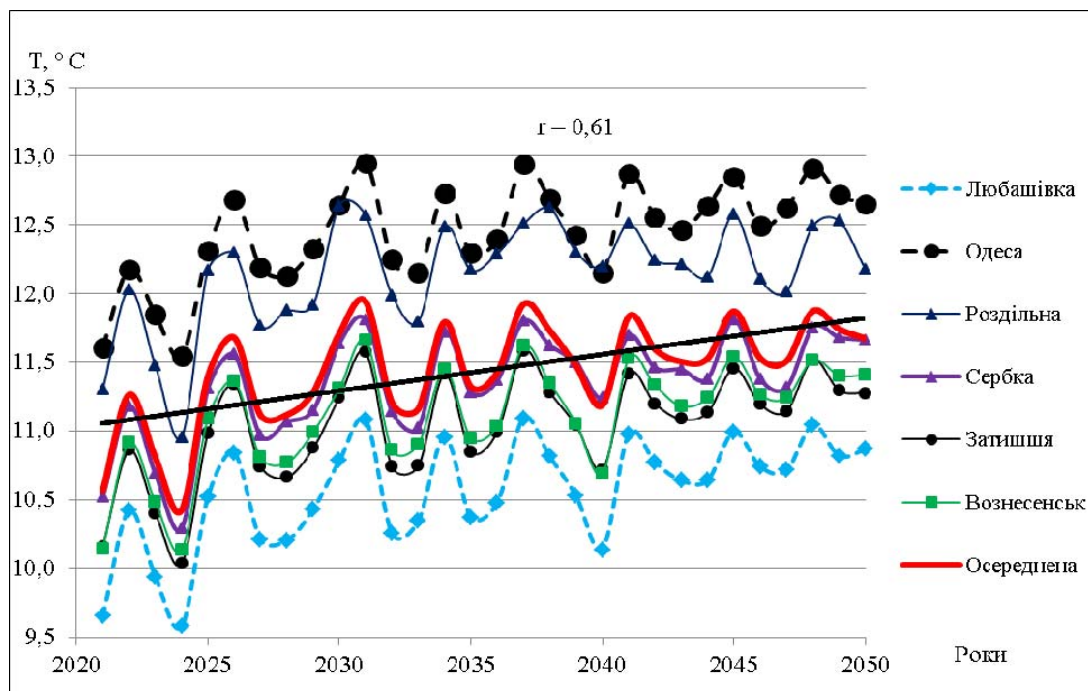


Рис. 1 - Суміщені графіки хронологічного ходу середніх річних температур повітря у розрахунковий період 2021-2050рр., середньостатистична модель та осереднена по даним усіх метеостанцій регресійна залежність температур від часу

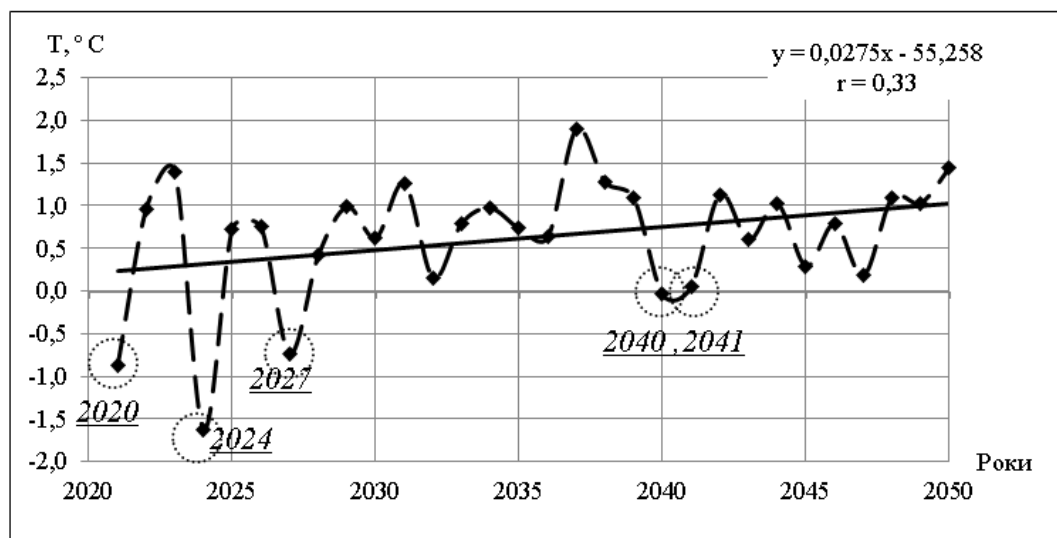


Рис. 2 – Хронологічний хід середніх за холодний період (XII, I-III) температур повітря по метеостанції Любашівка (середньостатистична модель)

Для річних сум опадів оцінка їх змін за розрахунковий період (2021-2050 рр.) виконувалась таким чином

$$\delta = \frac{\bar{X}' - \bar{X}}{\bar{X}}, \quad (3)$$

де \bar{X}' - середня багаторічна величина річних

сум опадів, розрахована за сценарними даними для розрахункового періоду 2021-2050 рр., мм; \bar{X} - середня багаторічна величина річних сум опадів, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління).

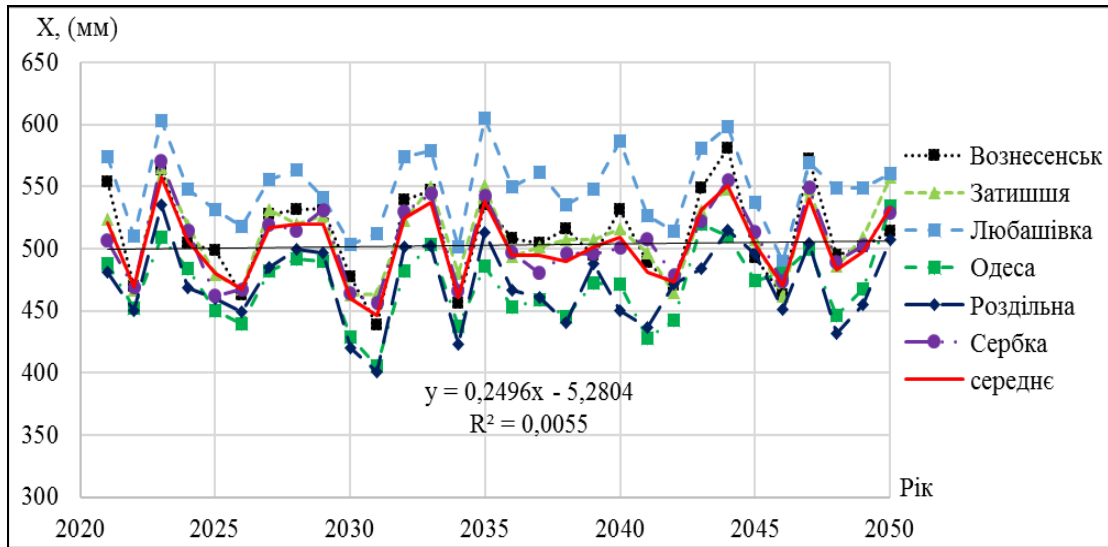


Рис. 3 – Хронологічний хід річних коливань сум опадів за сценарієм RCP4.5 (середньо статистична модель)

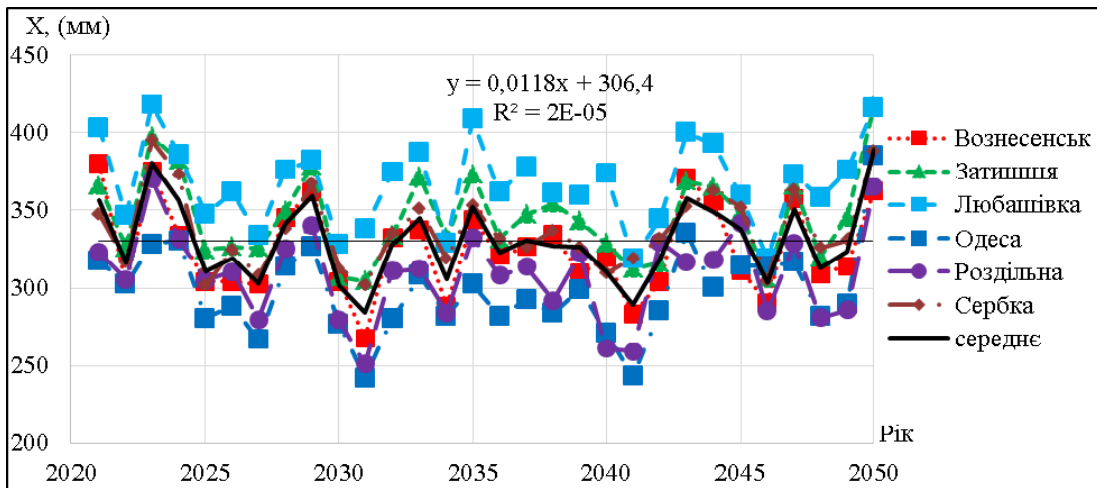


Рис. 4 – Хронологічний хід річних коливань опадів теплого періоду за сценарієм RCP4.5 (середньо статистична модель)

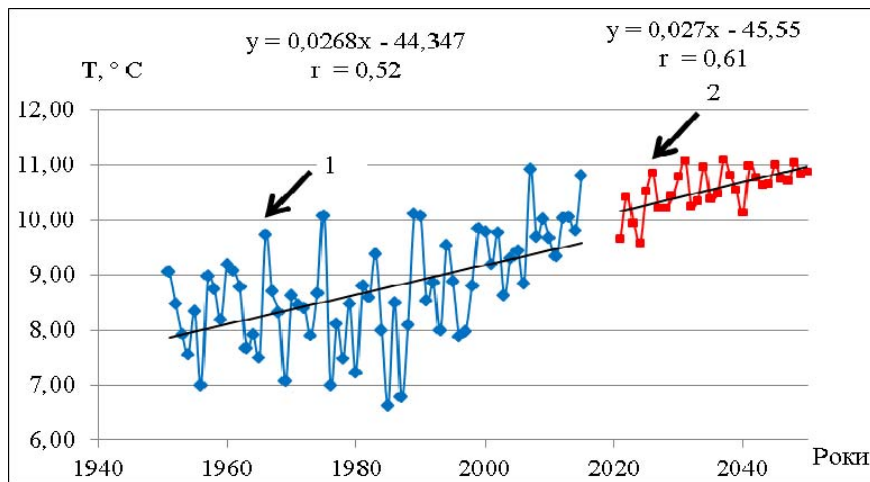


Рис. 5 – Суміщені хронологічні графіки спостережених і прогнозованих середньорічних температур повітря за середньостатистичною моделлю по метеостанції Любашівка (1- спостережені дані, 2 – прогнози дані)

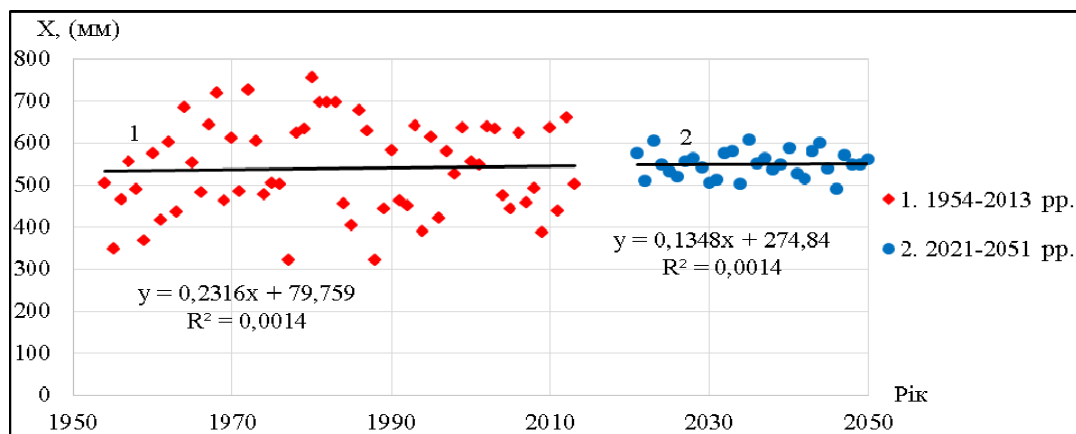


Рис. 6 – Хронологічний хід річних сум опадів ст. Любашівка за сценарієм RCP4.5 (середньостатистична модель)

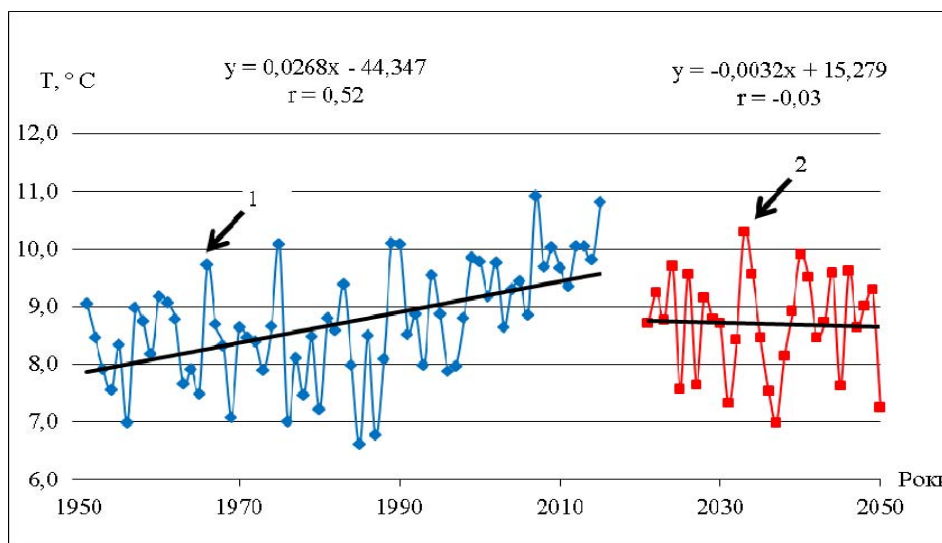


Рис. 7 – Сумішені хронологічні графіки спостережених середньорічних температур повітря і прогнозованих температур повітря за моделлю DMI, метеостанція Любашівка (1- спостережені дані, 2 – прогнозні дані)

Установлено (табл. 1), що крайове зменшення ресурсів зволоження (-24,5 %) відбуватиметься за моделлю CLMcom3, а крайове зростання (+36,4) – за моделлю MPI-CSC2.

Відносне відхилення для максимально можливого випаровування визначалось за таким виразом

$$\delta = \frac{\overline{E_m'} - \overline{E_m}}{\overline{E_m}}, \quad (4)$$

де $\overline{E_m'}$ - середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за сценарними даними, мм; $\overline{E_m}$ - середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління).

Зростання теплоенергетичних ресурсів клімату буде відбуватися за всіма моделями.

Таблиця 1 – Зміни середніх багаторічних значень річних сум опадів за розрахунковий період 2021-2050 рр.

Модель	Зміни ресурсів зволоження, %
CLMcom1	-19,2
CLMcom2	-23,6
CLMcom3	-24,5
CLMcom4	-9,20
CNRM	-0,40
DMI	-18,4
KNM I1	-12,4
KNM I2	-1,9
MPI-CSC1	+2,0
MPI-CSC2	+36,4
SMHI1	+7,8
SMHI2	-0,40
SMHI3	+8,70
SMHI4	+13,5
Середня статистична модель	-1,80

Найбільше зростання встановлене для моделі CLMcom3 і становитиме +32,1 %, найменше - для моделі DMI і дорівнюватиме +0,91% (табл. 2).

Таблиця 2 – Зміни середніх багаторічних значень теплоенергетичного еквіваленту за розрахунковий період 2021-2050 рр. згідно із моделями сценарію RCP4.5

Модель	Зміни ресурсів тепла, %
CLMcom1	+17,6
CLMcom2	+21,2
CLMcom3	+32,1
CLMcom4	+17,3
CNRM	+5,66
DMI	+0,91
KNMI1	+14,3
KNMI2	+15,9
MPI-CSC1	+15,4
MPI-CSC2	+8,83
SMHI1	+3,56
SMHI2	+9,70
SMHI3	+21,2
SMHI4	+11,6
Середня статистична модель	+12,3

Характеристикою кліматичних умов формування стоку є співвідношення ресурсів вологи і тепла β_X , яке також розглядається як характеристика посушливості клімату

$$\beta_X = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}, \quad (5)$$

де \bar{X} - середнє багаторічне значення річних опадів, мм; \bar{E}_m - середнє багаторічне значення максимально можливого випаровування, мм.

Більшість індексів посушливості базуються на порівнянні запасів води \bar{X} із втратами на випаровування, які представляються через радіацію, температури повітря і інші кліматичні змінні. У даному випадку використаний теплоенергетичний еквівалент або максимально можливе випаровування \bar{E}_m . За величиною β_X виділяються області зволоженості (посушливості) [21]:

$$\beta_X \geq 1,0 - \text{зона надмірного зволоження}, \quad (6)$$

$$0,8 < \beta_X < 1,0 - \text{зона достатнього зволоження}, \quad (7)$$

$$0,5 \leq \beta_X < 0,8 - \text{зона недостатнього зволоження}, \quad (8)$$

$$0,2 < \beta_X < 0,5 - \text{напіваридна зона}, \quad (9)$$

$$0,03 < \beta_X < 0,2 - \text{аридна зона}, \quad (10)$$

$$\beta_X < 0,03 - \text{гіпераридна зона}. \quad (11)$$

Значення $\beta_X = 0,5$ розглядається як межа між зоною недостатнього зволоження та напіваридною зоною. Територія розташована нижче ізолінії $\beta_X < 0,5$ означає, що вона знаходиться в напіваридній зоні.

Згідно із даними, отриманими за різними сценаріями (табл. 3), найбільш посушливий клімат буде спостерігатися за моделлю

Таблиця 3 – Показник зволоженості (посушливості) для різних моделей сценарію RCP4.5

Модель	\bar{X} , мм	\bar{E}_m , мм	β_X
CLMcom1	422	1096	0.38
CLMcom2	400	1130	0.35
CLMcom3	395	1221	0.32
CLMcom4	474	1087	0.44
CNRM	521	981	0.53
DMI	427	935	0.46
KNMI1	458	1057	0.43
KNMI2	513	1073	0.48
MPI-CSC1	534	1069	0.50
MPI-CSC2	712	1009	0.70
SMHI1	563	960	0.59
SMHI2	520	1017	0.51
SMHI3	568	1123	0.51
SMHI4	593	1034	0.57
Середня статистична модель	513	1043	0.49

CLMcom3 (досліджувана територія попадає у напіваридну зону), найбільш зволожений – за моделлю MPI-CSC2 (досліджувана територія попадає в зону недостатнього зволоження).

Відносно відхилення середніх багаторічних величин зонального (кліматичного) стоку встановлювалося за виразом

$$\delta = \frac{\bar{Y}_K' - \bar{Y}_K}{\bar{Y}_K}, \quad (12)$$

де \bar{Y}_K' - середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за сценарними даними, мм; \bar{Y}_K - середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління).

Аналіз змін середніх багаторічних величин річного стоку, обчислених за 14 моделями змін

клімату, які реалізували сценарій RCP4.5, показав, що зменшення водних ресурсів на досліджуваній території більш ніж 70% можливе при використанні у розрахунках даних моделі CLMcom3 (табл. 4).

Таблиця 4 – Зміни середніх багаторічних значень зонального (кліматичного) річного стоку, визначеного за моделлю «клімат-стік» для розрахункового періоду 2021-2050 рр.

Модель	Зміни водних ресурсів, %
CLMcom1	-71,7
CLMcom2	-69,6
CLMcom3	-82,6
CLMcom4	-48,4
CNRM	-9,72
DMI	-54,8
KNM I1	-49,8
KNM I2	-35,6
MPI-CSC1	-21,6
MPI-CSC2	+75,4
SMHI1	+28,4
SMHI2	-16,7
SMHI3	-18,4
SMHI4	+ 28,0
Середня статистична модель	-25,5

Саме сценарію CLMcom3 відповідає найбільш посушливий клімат (див. табл. 3). Прогнозоване зростання водних ресурсів може перевищувати рубіж 70 % у моделі MPI-CSC2 і досягати 75,2 %. Для цього сценарію характерне найбільше зростання ресурсів зволоження (+36,4 %) на фоні невеликого зростання ресурсів тепла (+8.83 %). Результати моделювання показують, що за більшістю моделей (78,6 %) прогнозується зменшення водних ресурсів.

Таблиця 5 - Статистичні параметри природного річного стоку, визначені за моделлю «клімат-стік» для розрахункового періоду 2021-2050, сценарій RCP4.5

Річки та балки	Норма кліматичного стоку, \bar{Y}_k , мм	Середня висота водозбору, $H_{сер.}$, м	Площа водозбору, F_2 , км ²	Перехідний коефіцієнт, $K_{пер}$	Параметри природного річного стоку			
					$\bar{Y}_{пр}$, мм	$\bar{W}_{пр}$, м ³ 10 ⁶	C_V	C_S
р.Великий Куяльник	17,1	120	1860	0,52	8,9	16,5	1,61	2,74
р.Довбока	13,4	35,0	69,5	0,369	4,95	0,344	2,32	3,94
б.Млинова	11,9	25,0	2,20	0,235	2,80	0,0616	3,31	5,61
б.Баштанна	11,9	30,0	8,70	0,25	2,98	0,0259	3,18	5,40
р.Кубанка	12,7	37,0	136,5	0,27	3,42	0,467	2,92	4,96
б.Гіндельдорфська	11,2	21,0	15,0	0,22	2,46	0,0369	3,58	6,09
б.Корсунцівська	11,2	20,0	17,0	0,22	2,46	0,0418	3,58	6,09
Боковий приплив	11,2	27	142	0,24	2,68	0,381	3,91	5,77
Сумарний приплив прісних вод до лиману						17,8		

Таблиця 6 - Приплив прісних вод до басейну Куяльницького лиману у минулому (до 1989р.) та за розрахунковий період 2021-2050 згідно із даними сценаріїв

Річки та балки	Об'єми природного річного стоку до 1989 р., м ³ 10 ⁶	Об'єми природного річного стоку для сценарію RCP4.5 (середня статистична модель), м ³ 10 ⁶	Об'єми природного річного стоку для сценарію А1В (модель М10), м ³ 10 ⁶
р. Великий Куяльник	20,4	16,5	12,7
р. Довбока	0,460	0,344	0,219
б. Млинова	0,0352	0,0616	0,0389
б. Баштанна	0,0357	0,0259	0,0160
р. Кубанка	0,628	0,467	0,281
б. Гіндельдорфська	0,0518	0,0369	0,0213
б. Корсунцівська	0,0547	0,0418	0,0236
Бічний приплив	0,530	0,381	0,230
Сума	22,2	17,8	13,5

4. ВИСНОВКИ

Порівняння визначених тенденцій спостережених і прогнозованих чинників формування стоку (опадів та температур повітря) дозволило зробити висновок, що застосування метеорологічних даних середньостатистичної моделі, яка являє собою осереднені дані усіх 14 моделей сценарію RCP4.5 є найбільш доцільним, оскільки установлені фактичні (за даними спостережень) і прогнозні тенденції добре узгоджуються. Згідно із отриманими результатами збільшення середнього багаторічного максимально можливого випаровування у період 2021-2050 рр. на досліджуваній території буде становити у середньому 12,5 %, середні багаторічні суми опадів за рік залишаться незмінними. Такий розподіл кліматичних чинників формування стоку призведе до зменшення водних ресурсів досліджуваної території на 25,5 % у порівнянні із їх станом до 1989 р. Очікуваний приплив прісних вод у природних (непорушених водогосподарською діяльністю) умовах від річки Великий Куяльник до Куяльницького лиману буде становити 16,5 млн. м³, а від усіх інших приток – 1,3 млн. м³. Отриманий прогноз уточнює дані, надані за сценарієм А1В (модель REMO) для періоду 2021-2050 рр., і підтверджує необхідність продовження заходів, спрямованих на збереження природних ресурсів Куяльницького лиману.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : Вид. "ТЕС", 2015. 520 с.
2. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Научно-методические подходы к оценке составляющих водно-солевых балансов лиманов. *Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья* / под ред. Ю. С. Тучковенко, Е. Д. Гопченко. Одесса : ТЭС, 2011. С. 12-44.
3. Шекк В. В., Лобода Н. С. Вплив змін клімату на структуру та функції водних екосистем, стан природних іхтіоценозів і перспективи розвитку аквакультури. *Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти: тези доповідей Міжнародної наук.-практ. конф., 13-14 березня*. Київ, 2018. С. 318-323.
4. Водний режим та гідроекологічні характеристики басейну Куяльницького лиману : монографія / за ред. Н. С. Лободи, С. Д. Гопченка. Одеса : ТЕС, 2016. 332 с.
5. Регіональна програма збереження та відновлення водних ресурсів у басейні Куяльницького лиману на 2012-2016 роки. Затверджена рішенням Одеської обласної ради № 270-VI від 28.10.2011 р. (з усіма змінами та доповненнями). Одеса, 2011. 13 с.
6. Loboda N. S., Bozhok Yu. V. Impact of Climate Change on Water Resources of North-Western Black Sea Region. *International Journal of Research in Earth and Environmental Sciences*. 2015. 02(9). Pp. 1-6.
7. Лобода Н. С., Тучковенко Ю. С., Гриб О. М. Обґрунтування ефективності заходів по відновленню стоку річки Великий Куяльник з метою стабілізації гідрологічного режиму Куяльницького лиману на початку XXI сторіччя (до 2030 р.). *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідро екології*: тези доповідей VII Всеукраїнської наук. конф. з міжнародною участю, присвяченої 100-річчю від дня заснування Національної академії наук України, 13-14 листопада. Київ, 2018. С. 22-23.
8. Рациональне використання та відновлення водних ресурсів водозбору р. Великий Куяльник та Куяльницького лиману у кліматичних умовах XXI сторіччя / Н. С. Лобода та ін. *Вода: проблеми та шляхи вирішення*: збірник статей наук.-практ. конф. з міжнародною участю, 5-8 липня, Рівне. 2017. С. 211-216.
9. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-Центр, 2010. 316 с.
10. Тучковенко Ю. С., Лобода Н. С., Кушнір Д. В. Результати чисельного моделювання внутрішньорічної

- мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за різних обсягів стоку річки Великий Куяльник. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2017. №20. С. 105-119.
11. Лобода Н. С., Отченаш Н. Д., Гриб О. М. Опис штучних водойм на водозборі річки Великий Куяльник та регламентування їх роботи у сучасності та майбутньому. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. №21. С. 50-59.
 12. Лобода Н. С., Куза А. М. Антропогенне навантаження на стік річки Великий Куяльник в умовах кліматичних змін. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. Т. 3(46). С. 33-41.
 13. Лобода Н. С., Сербова З. Ф., Божок Ю. В. Оцінка впливу змін клімату на водні ресурси України на основі моделі “клімат-стік” за сценарієм глобального потепління А2. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. Т. 1(36). С. 32-40.
 14. Лобода Н. С., Божок Ю. В. Вплив кліматичних змін на водні ресурси Північно-Західного Причорномор'я у сценарних умовах (RCP8.5 та RCP4.5). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2016. Т. 2 (41). С. 48-58
 15. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2013 / Edited by: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
 16. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Оценка возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления. *Гидробиологический журнал*. 2000. Т. 36, №3. С. 67-78.
 17. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния : монография. Одесса : Экология, 2005. 208 с.
 18. Loboda N. S. The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climate and Water*. 1998. Vol. 1. Pp.1486-1494.
 19. Лобода Н. С. Влияние изменений климата на водные ресурсы Украины (моделирование и прогнозы по данным климатических сценариев): Глобальные и региональные изменения климата / под ред. В. М. Шестопалова, В. Ф. Логинова, В. И. Осадчего и др. Киев : Ніка-Центр, 2011. С. 340-352.
 20. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях) : монография. Київ : КНТ, 2005. 188 с.
 21. Родда Дж. Грани гидрологии : монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. Т. 2. 534 с.
 22. Лобода Н. С., Сербова З. Ф., Божок Ю. В. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. №15. С. 149-159.
 23. Лобода Н. С., Божок Ю. В. Вплив змін клімату на водні ресурси водозбору Куяльницького лиману у сценарних кліматичних умовах. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. №16. С. 189-195.
- REFERENCES**
1. Stepanenko, S.M. & Pol'ovyy, A.M. (eds). (2015). *Klimatychni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy [Climate changes and its impact on sectors of the economy of Ukraine]*. Odessa. (in Ukr.)
 2. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2012). Nauchno-metodicheskie podkhody k otsenke sostavlyayushchikh vodno-solevykh balansov limanov [Scientific and methodological approaches to the assessment of components of water-salt balances of estuaries]. In: Tuchkovenko, Yu.S. and Gopchenko, E.D. (eds). *Aktual'nye problemy limanov severo-zapadnogo Prichernomor'ya [Actual problems of estuaries of the northwestern Black Sea coast]*. Odessa: TES Publ, pp.12-44. (in Russ.).
 3. Shekk, V.V. & Loboda, N.S. (2018). [The impact of climate change on the structure and functions of aquatic ecosystems, the state of the natural ichthyocenosis and prospects for the development of aquaculture]. *Tezy dopovidei Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii "Klimatychni zminy ta silske hospodarstvo. Vyklyky dlia ahrarnoi nauky ta osvity" [Theses of reports of the International Scientific and Practical Conference "Climate change and agriculture. Challenges for agrarian science and education"]*, 13-14 march. Kyiv, pp. 318-323. (in Ukr.)
 4. Loboda, N.S. & Gopchenko, E.D. (eds). (2016). *Vodnyy rezhym ta hidroekologichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu [Water regime and hydroecological characteristics of Kuyalnitskyi Liman]*. OSENU. Odessa: TES. (in Ukr.)
 5. The Odessa Regional Council. (2011). *Rehionalna prohrama zberezhenia ta vidnovlennia vodnykh resursiv u baseini Kuyal'nyts'koho lymanu na 2012-2016 roky № 270-VI vid 28.10.2011 r. (z usima zminamy ta dopovnenniamy) [Regional program for the conservation and restoration of water resources in the Kuyalnik estuary basin for 2012-2016 No. 270-VI of October 28, 2011 (with all the changes and additions)]*. (in Ukr.)
 6. Loboda, N.S. & Bozhok, Yu.V. (2015). Impact of Climate Change on Water Resources of North-Western Black Sea Region. *International Journal of Research in Earth and Environmental Sciences*, 02(9), pp. 1-6.
 7. Loboda, N.S., Tuchkovenko, Yu.S. & Hryb, O.M. (2018). [Justification of the effectiveness of measures to restore the flow of the Bolshaya Kuyalnik river in order to stabilize the hydrological regime of the Kuyalnik Liman at the beginning of the 21st century (until 2030)]. *Tezy dopovidei VII Vseukrainskoi naukovoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu, prsviachenoi 100-richchiu vid dnia zasnavannia Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy "Problemy hidrolohii, hidrokhimii, hidroekolohii"*. [Theses of reports of the VII All-Ukrainian Scientific Conference with International participation "Problems of hydrology, hydrochemistry, hydroecology"], 13-14 November. Kyiv, pp. 22-23. (in Ukr.)
 8. Loboda, N.S. et al. (2017). [The rational use and restoration of water resources of the catchment area of Velikiy Kuyalnik and Kuyalnitsky estuary in the climatic conditions of the XXI century]. *Zbirnyk statei naukovopraktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Voda: problemy ta shliakhy vyryshennia" [Collection of articles of a scientific and practical conference with international participation "Water: Problems and Solutions"]*, 5-8 July. Rivne, pp. 211-216. (in Ukr.)
 9. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichnyi analiz). [Modern streamflow regime of rivers in Ukraine (landscape-hydrology analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
 10. Tuchkovenko, Yu.S., Loboda, N.S. & Kushnir, D.V. (2017). [Results of numerical modeling of intra-year variability of the hydrological characteristics of the Kuyalnitsky liman

- for different volumes of the river flow of the Big Kuyalnik]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 20, pp. 105-119. (in Ukr.)
11. Loboda, N.S., Otchenash, N.D. & Hryb, O.M. (2018). [Description of artificial reservoirs within the catchment area of the Great Kuyalnik river and regulation of their operation at the present time and in future]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 21, pp. 50-59. (in Ukr.)
 12. Loboda, N.S. & Kuza, A.M. (2017). [Anthropogenic load on the flow of the Great Kuyalnik River in the context of climate change]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3(46), pp. 33-41. (in Ukr.)
 13. Loboda, N.S., Serbova, Z.F. & Bozhok, Ju.V. (2015). [The assessment of the impact of climate change on water resources of Ukraine based on the model "climate-runoff" under global warming scenario A2]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 1 (36), pp. 8-17. (in Ukr.)
 14. Loboda, N.S. & Bozhok, Ju.V. (2016). [Impact of Climate Change on Water Resources of North-Western Black Sea Region in scenario terms (RCP8.5 та RCP4.5)]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 2(41), pp. 45-58. (in Ukr.)
 15. Stocker, T.F., Qin D. & Plattner G.-K. (eds). (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2013*. Cambridge University Press, Camb, United Kingdom and New York, NY, USA.
 16. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2000). [Estimation of possible changes of water resources of Ukraine in the conditions of the global warming.]. *Gidrobiologičeskij zhurnal [Hydrobiological journal]*, 36(3), pp. 67-78.
 17. Loboda, N.S. *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviakh antropogennogo vliianiya. [Calculations and generalizations of descriptions of annual flow of the rivers of Ukraine in the conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ecology Publ. (in Ukr.)
 18. Loboda, N.S. (1998). The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climate and Water*, 01, pp. 1486-1494.
 19. Loboda, N.S. (2011). Vliianie izmeneniy klimata na vodnye resursy Ukrainy (modelirovanie i prognozy po dannym klimaticheskikh scenariiev) [Influence of changes of climate on the water resources of Ukraine (design and prognoses from data of climatic scenarios)]. In: Shestopalov, V.M., Loginov, V.F. and Osadchii, V.I. (eds). *Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata [Global and regional changes of climate]*. Kiev: Nika-Centr, pp. 340-352. (in Russ.)
 20. Loboda, N.S. & Gopchenko, E.D. (2006). *Vodnye resursy severo-zapadnogo Prichernomor'ya (v estestvennykh i narushennykh khozyaystvennoy deyatelnosti'yu usloviakh) [Water resources of the North-Western Black Sea region (in natural and disturbed economic conditions)]*. Kyiv: KNT Publ. (in Russ.)
 21. Rodda, Dzh. (1987). *Grani gidrologii [Verges of hydrology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. Vol.2. (in Russ.)
 22. Loboda, N.S., Serbova, Z.F. & Bozhok, Ju.V. (2014). [Influence of changes of climate on the water resources of Ukraine in modern and future terms (on the scenario of the global warming of A1B)]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 15, pp. 149-159. (in Ukr.)
 23. Loboda, N.S. & Bozhok, Yu.V. (2015). [Impact of climate change on water resources of the catchment of the Kuyalnit-sky Liman in scenic climatic conditions]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp. 189-195. (in Ukr.)

ASSESSMENT OF POSSIBLE CHANGES OF WATER RESOURCES OF THE RIVERS BELONGING TO THE KUYALNYTSKYI LIMAN CATCHMENT AT THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY (2021 -2050) ACCORDING TO THE MODELS OF THE CLIMATIC SCENARIO RCP4.5

N. S. Loboda, A. M. Kuza, O. M. Kozlov

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>*

Relevance of the paper consists in the need of ability to predict the water resources state of small and medium-sized rivers of the North-Western Black Sea Region in the 21st century in order to justify the strategy of Odesa Region's economy development. The water bodies of the studied territory include Kuyalnitskyi Liman with its unique balneological properties used for health improvement purposes since the end of the 19th century. Global warming and construction of numerous artificial reservoirs across the catchments of the liman's rivers resulted in its shallowing since the 90s of the last century. Forecasts for possible inflow of fresh water from the rivers to the liman in the near future have a great importance for assessing the prospects of its natural resources protection and preservation. The aim of the paper is to determine a possible state of water resources of the rivers belonging to the Kuyalnitskyi Liman catchment over the period of 2021-2050 based on imitational mathematical modelling with the climate-runoff model taken as a template and using meteorological data of 14 models of the RCP4.5 climate scenario. Estimations of zonal (climatic) annual runoff were provided for six meteorological stations located across the Kuyalnitskyi Liman catchment and adjacent territories. Each of the studied models has the water resources, heat and moisture resources estimations averaged over the target territory. It is shown

that, compared to the last century's data, water resources changes will range from -82.6 % (model CLMcom3) to + 75.4 % (model MPI-CSC2). An average statistical model which is the result of averaging all the studied models was taken for further calculations. It was established that the best harmonization of estimated and actual tendencies of runoff formation climatic factors changes is observed when the average statistical model is taken. According to this model, over the period of 2021-2050 the Kuyalnitskiy Liman catchment area will see a heat resources expected increase by + 12.3 % with a slight (-1.80 %) humidification resources decrease. This will lead to reduction of territory's water resources by 25.5 %. The transfer of some watercourses feeding the liman to natural annual river runoff made it possible to determine that, according to the RCP4.5 scenario, over the period of 2021-2050 the average long-term inflow of fresh water from the Velykiy Kuyalnik River will constitute 16.5 million m³ and the inflow from other watercourses – 1.3 million m³.

Keywords: Kuyalnitskiy Liman, climate-runoff model, RCP4.5 climate scenario models, changes of water resources

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕК ВОДОСБОРА КУЯЛЬНИЦКОГО ЛИМАНА В НАЧАЛЕ XXI СТОЛЕТИЯ (2021-2050 ГГ.) ПО МОДЕЛЯМ КЛИМАТИЧЕСКОГО СЦЕНАРИЯ RCP4.5

Н. С. Лобода, А. Н. Куза, А. М. Козлов

Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>

Актуальность работы обусловлена необходимостью предсказания состояния водных ресурсов малых и средних рек Северо-Западного Причерноморья в XXI веке с целью обоснования стратегии развития хозяйства Одесской области. Среди водных объектов рассматриваемой территории находится Куяльницкий лиман, уникальные бальнеологические свойства которого используются для оздоровления людей еще с конца XIX столетия. В результате глобального потепления и строительства большого количества искусственных водоемов на водосборах рек с 90-х годов прошлого столетия началось обмеление лимана. Прогнозы возможного притока пресных вод от рек до лимана в ближайшем будущем имеют большое значение для оценки перспектив охраны и сохранения природных ресурсов лимана. Целью работы является определение возможного состояния водных ресурсов водосбора Куяльницкого лимана в период 2021-2050 гг. на базе имитационного математического моделирования по модели "климат-сток" с использованием метеорологических данных 14 моделей климатического сценария RCP4.5. Оценки зонального (климатического) годового стока были предоставлены для шести метеорологических станций, расположенных на водосборе Куяльницкого лимана и смежных с ним территориях. Для каждой из рассмотренных моделей были предоставлены усредненные по территории оценки водных ресурсов, ресурсов тепла и влаги. Показано, что изменения водных ресурсов при сравнении с данными прошлого столетия будут находиться в пределах от - 82,6 % (модель CLMcom3) до + 75,4 % (модель MPI-CSC2). Для дальнейших расчетов была рассмотрена среднестатистическая модель, которая представляет собой результат осреднения всех рассмотренных моделей. Установлено, что наилучшее согласование расчетных и фактических тенденций изменения климатических факторов формирования стока наблюдается именно для средней статистической модели. Согласно этой модели на водосборе Куяльницкого лимана в 2021-2050 гг. ожидается рост ресурсов тепла на + 12,3 % при незначительном (- 1,80 %) уменьшение ресурсов увлажнения. В результате уменьшение водных ресурсов территории будет составлять 25,5 %. Переход к естественному годовому стоку отдельных водотоков, питающих лиман, позволил выявить, что в 2021-2050 гг. по сценарию RCP4.5 средний многолетний приток пресной воды реки Большой Куяльник будет составлять 16,5 млн.м³, а приток от других водотоков - 1.3 млн. м³.

Ключевые слова: Куяльницкий лиман, модель климат-сток, модели климатического сценария RCP4.5, изменения водных ресурсов

Подання до редакції: 20. 02. 2019
Надходження остаточної версії: 18. 03. 2019
Публікація статті: 30. 05. 2019