

ПРОБЛЕМИ  
ГІДРОЛОГІЇ,  
ГІДРОХІМІЇ,  
ГІДРОЕКОЛОГІЇ

**ПРОБЛЕМИ  
ГІДРОЛОГІЇ, ГІДРОХІМІЇ,  
ГІДРОЕКОЛОГІЇ**

Київ  
Ніка-Центр  
2019

УДК 504.4+550.42+550.46+551.468.3+551.579+574.5

За редакцією: чл.-кор. НАН України В.І. Осадчого, д.геогр.н. Л.О. Горбачової, д.геогр.н. В.В.Гребеня, д.геогр.н. Ю.П. Ільїна, д.геогр.н. О.Г. Ободовського, д.геогр.н. Н.М. Осадчої, д.геогр.н. В.К. Хільчевського, к.геогр.н. О.В. Войцеховича, к.геогр.н. Ю.Б. Набиванця

Рецензенти:

*Самойленко Віктор Миколайович*, доктор геогр. наук, професор кафедри фізичної географії та геоecології географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

*Мольчак Ярослав Олександрович*, доктор геогр. наук, професор кафедри екології та агрономії Луцького національного технічного університету

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України  
19 липня 2019 року.

**Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології.** – Київ : Ніка-Центр, 2019. – 330 с.  
ISBN 978-966-7067-39-7

У монографії представлено результати досліджень з моделювання річкового стоку в умовах зміни клімату та антропогенних впливів; розроблення основних засад гідроморфологічного моніторингу; вивчення гідроенергетичного потенціалу річок України; удосконалення методології гідрохімічних досліджень та управління якістю поверхневих вод; узагальнення гідрохімічного режиму та якості поверхневих вод за даними мережі гідрометеорологічних спостережень та експериментальних робіт; застосування сучасних методів математичної статистики; вивчення радіоактивного забруднення довкілля, зокрема водних об'єктів; гідробіологічних показників прісноводних екосистем; гідролого-гідрохімічного режиму прибережних морських вод та методів морських прогнозів.

Монографія призначена для широкого кола науковців, спеціалістів та студентів, діяльність яких пов'язана з вивченням, використанням та охороною водних ресурсів України.

УДК 504.4+550.42+550.46+551.468.3+551.579+574.5

ISBN 978-966-7067-39-7

## АНОТАЦІЯ

В основу державної політики у сфері використання, збереження та відновлення водних ресурсів повинні бути покладені рекомендації науковців та практиків, які працюють в області вивчення гідрологічного та гідрохімічного режиму водних об'єктів та систем, розроблення методології оцінювання кількісних та якісних показників водних ресурсів з врахуванням впливу зміни клімату та нераціональної господарської діяльності. Розгляду зазначеної проблематики присвячена ця колективна монографія, підготована фахівцями провідних наукових установ, навчальних закладів, інших організацій України, які працюють у царині гідрології, гідрохімії та гідроекології, зокрема розроблення методів та технологій оцінювання та прогнозування якісних та кількісних показників поверхневих вод суходолу та прибережної смуги морів, а також рекомендацій із збереження водних екосистем.

У монографії представлено результати досліджень з моделювання річкового стоку в умовах зміни клімату та антропогенних впливів; розроблення основних засад гідроморфологічного моніторингу; вивчення гідроенергетичного потенціалу річок України; удосконалення методології гідрохімічних досліджень та управління якістю поверхневих вод; узагальнення гідрохімічного режиму та якості поверхневих вод за даними мережі гідрометеорологічних спостережень та експериментальних робіт; застосування сучасних методів математичної статистики; вивчення радіоактивного забруднення довкілля, зокрема водних об'єктів; гідробіологічних показників прісноводних екосистем; гідролого-гідрохімічного режиму прибережних морських вод та методів морських прогнозів.

Монографія призначена для широкого кола науковців, спеціалістів та студентів, діяльність яких пов'язана з вивченням, використанням та охороною водних ресурсів України.

## SUMMARY

The governmental policy in the field of use, preservation and restoration of water resources should be based on recommendations of scientists and practitioners working on studying the hydrological and chemical regime of water objects and systems, development of methodology for estimation of quantitative and qualitative indices of water resources taking into account the influence of climate change and irrational economic activity. This collective monograph is devoted to the consideration of the mentioned problems. It was prepared by the specialists of leading scientific institutions, universities and other organizations of Ukraine, which work in the area of hydrology, hydrochemistry and hydroecology, in particular the development of methods and technologies for estimation and forecasting of qualitative and quantitative values of surface land waters and marine coastal zones, as well as recommendations on aquatic ecosystems protection and conservation.

The monograph presents the results of researches on modeling of river runoff under the climate change and anthropogenic impacts; development of hydromorphological monitoring basic principles; study of Ukrainian rivers' hydraulic power potential; improvement of methodology for chemical researches and land water quality management; synthesis of land water chemical regime and water quality assessment basing on the hydrometeorological observations and experimental works data; application of modern methods of mathematical statistics; study of radioactive environmental pollution, in particular water objects; hydrobiological indices of freshwater ecosystems; chemical regime of marine coastal waters and methods of sea wave forecasts.

The monograph is intended for a wide range of scientists, specialists and students, related to the study, use and protection of water resources of Ukraine.

## ЗМІСТ

<i>Є.В. Василенко, О.В. Кошкіна, О.С. Коноваленко, Ю.Б. Набиванець</i> ПІДХОДИ ДО ГІДРОМОРФОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ МАСИВІВ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД КАТЕГОРІЇ «РІЧКИ» В ЄВРОПЕЙСЬКИХ КРАЇНАХ .....	6
<i>В.В. Гребінь</i> ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАЛИХ РІЧОК (ІСНУЮЧІ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИРІШЕННЯ).....	17
<i>Ю.С. Ющенко</i> ВОДООХОРОННІ ЗЕМЛІ.....	32
<i>О.Г. Ободовський, К.Ю. Данько, С.І. Сніжко, В.В. Онищук, О.І. Лук'янець, Е.Р. Рахматулліна, І.В. Купріков, О.О. Почасвець, О.С. Будицько, Є.М. Павельчук, В.О. Корнієнко, Ю.В. Філіппова</i> ГІДРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РІЧОК ПРАВОБЕРЕЖЖЯ БАСЕЙНУ ДНІПРА (В МЕЖАХ УКРАЇНИ)..	39
<i>Ж.Р. Шакирзанова, А.О. Докус, З.Ф. Сербова, Н.М. Швець</i> КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ РІЧОК.....	58
<i>В.А. Овчарук, Є.Д. Гопченко</i> МОДИФІКОВАНИЙ ВАРІАНТ ОПЕРАТОРНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ РІВНИННИХ РІЧОК УКРАЇНИ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ .....	75
<i>О.М. Гриб, М.Г. Сербов, Я.С. Яров, Є.Л. Бояринцев, П.А. Терновий, В.В. Пилип'юк</i> ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ ПРИБЕРЕЖНИХ ЗАХИСНИХ СМУГ У БАСЕЙНІ РІЧКИ ВЕЛИКИЙ КУЯЛЬНИК ТА ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАХОДІВ З ЙОГО ПОЛІПШЕННЯ У МАЙБУТНЬОМУ .....	90
<i>Н.С. Лобода, Ю.С. Тучковенко, О.М. Гриб, Д.В. Кушнір</i> ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ ПО ВІДНОВЛЕННЮ СТОКУ РІЧКИ ВЕЛИКИЙ КУЯЛЬНИК З МЕТОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОРІЧЧЯ (ДО 2030 р.) ..	100
<i>В.І. Осадчий, В.В. Фомін, Ю.П. Ільїн, І.В. Будаєв, В.М. Шпиг</i> ОПЕРАТИВНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУ МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ У ПРИБЕРЕЖНІЙ СМУЗІ АЗОВСЬКОГО ТА ЧОРНОГО МОРІВ .....	116
<i>В.В. Осипов, Н.М. Осадча, О.С. Спєка</i> МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ БАСЕЙНУ РІЧКИ ДЕСНА ЗАСОБАМИ SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) .....	122
<i>О.М. Аксюк, В.П. Ланши, Г.А. Гончаренко</i> ТЕМАТИЧНЕ ЦИФРОВЕ КАРТУВАННЯ РАЙОНІВ ДІЯЛЬНОСТІ СНІГОЛАВИННИХ СТАНЦІЙ УКРАЇНИ .....	132
<i>В.О. Манукало, Н.К. Голеня, Л.Г. Ковальська</i> СТАНДАРТИЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЕКСТРЕМАЛЬНІ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНІ ЯВИЩА – СКЛАДОВА ЧАСТИНА УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ СТИХІЙНИХ ЛИХ.....	148
<i>Н.М. Осадча, В.І. Осадчий</i> МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД .....	157
<i>П.М. Линник, В.А. Жежеря, Р.П. Линник</i> ДОСЛІДЖЕННЯ СПІВІСНУЮЧИХ ФОРМ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПРИРОДНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДАХ ЯК ОДИН З ПРІОРИТЕТНИХ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ СУЧАСНОЇ ГІДРОХІМІЇ .....	168

<i>В.А. Жежеря, П.М. Линник</i> ДЕЯКІ МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СПІВІСНУЮЧИХ ФОРМ МЕТАЛІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ВОДАХ У РОЗЧИНЕНОМУ СТАНІ .....	184
<i>Н.М. Осадча, О.О. Ухань, В.М Чехній, О.Г. Голубцов</i> ОЦІНКА ЕМІСІЇ БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН У ПОВЕРХНЕВІ ВОДИ БАСЕЙНУ Р. СІВЕРСЬКИЙ ДОНЕЦЬ ВІД ДИФУЗНИХ ДЖЕРЕЛ .....	192
<i>Ю.А. Лузовіцька, Н.М. Осадча, О.О. Ухань, С.В. Білецька</i> ЯКІСТЬ ВОДИ Р. ДЕСНА ТА ТЕНДЕНЦІЇ ЇЇ ЗМІНИ З ПОЧАТКУ 2000 рр.....	201
<i>М.Є. Даус</i> БАГАТОРІЧНІ ЗМІНИ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ І ВМІСТУ ГОЛОВНИХ ІОНІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ВОДАХ БАСЕЙНУ ПРИП'ЯТІ У СУЧАСНИЙ ПЕРІОД.....	209
<i>В.К. Хільчевський, С.М. Курило, М.Р. Забокрицька</i> ЗМІНА МІНЕРАЛІЗАЦІЇ РІЧКОВИХ ВОД В КОНТЕКСТІ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ .....	218
<i>Ю.П. Ільїн, Д.Ю. Ільїн, О.І. Ільїна, Д.О. Клебанов</i> ДОВГОТЕРМІНОВІ ЗМІНИ ГІДРОЛОГО-ГІДРОХІМІЧНОГО РЕЖИМУ ТА ПОКАЗНИКІВ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИБЕРЕЖНИХ МОРСЬКИХ ВОД (НА ПРИКЛАДІ ПОРТУ ОДЕСА) .....	231
<i>В.А. Артёменко</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МУЛЬТИЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВОДНОЙ ЭКОЛОГИИ.....	240
<i>Л.А. Ковальчук, Н.М. Осадча</i> МЕТОДИКА РОЗДІЛЕННЯ ВМІСТУ ГІДРОХІМІЧНИХ КОМПОНЕНТ НА ПРИРОДНУ І АНТРОПОГЕННУ СКЛАДОВУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РЕФЕРЕНЦІЙНОГО СТАНУ .....	247
<i>Т.В. Лаврова, О.В. Войцехович, С.Н. Шумов, С.В. Тодосиенко</i> СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДАННЫХ О ГИДРОХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ И РАДИОАКТИВНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ВЛИЯНИЯ БЫВШЕГО УРАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	261
<i>В.Ю. Саприкін, Д.О. Бугай, О.С. Скальський, С.П. Джемпо</i> МОДЕЛЬНІ ОЦІНКИ ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ВОЛОГИ КРИЗЬ ГРУНТОВІ ЕКРАНИ ХВОСТОСХОВИЩ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ПРИДНІПРОВСЬКОГО ХІМІЧНОГО ЗАВОДУ (М. КАМ'ЯНСЬКЕ).....	275
<i>О.О. Протасов, А.А. Силаєва, Ю.Ф. Громова, Т.М. Новосьолова, І.О. Морозовська, Т.І. Меньшова</i> ЗМІНИ СКЛАДУ ТА КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ОКРЕМИХ ГРУП ГІДРОБІОНТІВ У ВОДОЙМІ-ОХОЛОДЖУВАЧІ ЮЖНО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС В БАГАТОРІЧНОМУ АСПЕКТІ .....	285
<i>В.В. Триліс, О.І Цибульський, О.О. Гупало , О.Л. Савицький</i> СУЧАСНИЙ СТАН ДОВКІЛЛЯ В ЗОНІ БУДІВНИЦТВА ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ В ПОНИЗЗІ РІЧКИ СУЛА.....	296
<i>О.К. Гайдаш, Л.В. Шевцова</i> ОЦІНКА ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОПУЛЯЦІЙ МОЛЮСКІВ РОДУ DREISSENA З РІЗНОЮ РОЗМІРНО-ВІКОВОЮ СТРУКТУРОЮ .....	303
<i>В.І. Осадчий, Н.М. Осадча, Ю.Б. Набиванець, Н.М. Мостова, Л.А. Ковальчук, О.О. Ухань, В.В. Канівець, Г.В. Лаптев, В.В. Осипов, Ю.А. Лузовіцька, Д.О. Клебанов, Д.В. Кожем'якін</i> ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД УКРАЇНИ В УМОВАХ ВПЛИВУ ПРИРОДНИХ ТА АНТРОПОГЕННИХ ЧИННИКІВ.....	313

**ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ ПО ВІДНОВЛЕННЮ СТОКУ РІЧКИ  
ВЕЛИКИЙ КУЯЛЬНИК З МЕТОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ  
КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОРІЧЧЯ (ДО 2030 Р.)**

Н.С. Лобода, Ю.С. Тучковенко, О.М. Гриб, Д.В. Кушнір

*Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна***MEASURE EFFECTIVENESS JUSTIFICATION TO RESTORE THE GREAT  
KUYALNYK RIVER RUNOFF TO STABILIZE HYDROLOGICAL REGIME OF  
KUYALNITSKIY ILIMAN IN EARLY XXI CENTURY (UNTIL 2030)**

N.S. Loboda, Yu.S. Tuchkovenko, O.M. Hryb, D.V. Kushnir

*Odessa State Environmental University, Ukraine*

The work is devoted to solving the problem of preserving and restoring the natural resources of the Kuyalnitskiy Liman catchment. This liman is a unique balneological object of the national importance in Ukraine. This liman is of a closed type (there is no natural water exchange with the Black Sea). The natural conditions for the formation of therapeutic mud and brine of the liman are disturbed by climate and water management changes. From the beginning of the nineties of the last century the liman began to dry up gradually. Its volume, water surface area and depth are decreased significantly. The drying process was accompanied by increasing the mineralization which exceeded much the allowable amount in the reproduction of therapeutic mud. To save the liman the Sea-Liman pipeline was commissioned. The sea water replenishes the volume of water in the liman through this pipeline. The effect on the process of a peloid formation of additional salts that come with seawater has not been studied yet. To reduce the amount of seawater from the Odessa Bay it was proposed to restore partially the natural freshwater runoff from the watercourses flowing into the liman. The main river of the catchment is the Great Kuyalnik River. The inflow of the water to the liman from the watercourses is practically absent. The reason of it is the losses on the filling and evaporation from the water surface of a large number of artificial reservoirs. The restoration of the inflow can be achieved by reducing the volume of filling ponds and small storage reservoirs. Using a mathematical modeling the characteristics of hydrological regime of the Kuyalnitskiy Liman were calculated for various options for the pipeline operating, climatic conditions (including the climate scenario data in the 21st century) as well as for various options for filling artificial reservoirs. The simulation results allowed to establish the possible degree of restoration of the Great Kuyalnik River natural runoff due to the optimization of an artificial reservoir filling. A set of mathematical models was used: the «climate-runoff» model for calculating the natural and disturbed by water management transformation river runoff, the liman water-salt balance model for estimating the level and salt regimes of the liman as a whole, the Delft3D-FLOW hydrodynamic model for assessing the features of intra-year spatial-temporal variability hydrological characteristics and salinity in the liman. As a result of simulation, it was established that in order to stabilize the hydrological regime of the liman during the calculation period 1990–2030 the natural flow of the Great Kuyalnik River should be restored by 75–80%. At the same time the pipeline should work for 1,5 months during the winter period (December-January). These activities will allow to preserve the liman, its natural resources and significantly reduce the salt flow into it from the Odessa Gulf.

**Вступ**

Згідно із положеннями Водної Рамкової Директиви (Директива 2000/60/ЄС, 2000) та проектом технічної допомоги ЄС “Додаткова підтримка Міністерства екології та природних ресурсів України у впровадженні секторальної бюджетної підтримки” річка Великий

Куяльник (В.Куяльник) віднесена до басейну річок Причорномор'я. Кілька століть назад більшість цих річок впадали безпосередньо у Чорне море. В результаті затоплення морем долин рівнинних річок та балок підчас відносного занурення прибережних ділянок суші утворилися водойми, які отримали назву "лимани". Слово "лиман" походить від грецького слова "limen", що означає "гавань, бухта".

Сучасна наука (Іванов, Миньковская, 2008) розглядає лиман як один із видів дельтових водойм (поряд із лагуною, естуарієм та затокою), які є елементами гідрографічної мережі гирлової області річок, існують у водно-акумулятивних формах рельєфу та характеризуються відсутністю або уповільненим рухом води. Дельтові водойми формуються у межах гирлового узмор'я, де змішуються річкові та морські води; взаємодіють стокові, вітрові та компенсаційні течії, відбувається накопичення осадів та проходять інші гирлові процеси.

У результаті чергування регресій (відступу) та трансгресій (наступу) моря на суходіл сформувалися сучасні обриси лиманів (Розенгарт, 1974). Ще у часи створення давньогрецьких селищ лимани привертала увагу як зручні гавані. Пізніше вони стали об'єктами рибальства та риборозведення, солепромислів, грязелікування, будівництва портово-промислових та гідротехнічних комплексів, іригаційного землекористування. З метою збереження природних ресурсів лиманів на берегах та в акваторіях деяких з них створені національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, ботанічні та орнітологічні заказники, що включені до природно-заповідного фонду України.

Лимани поділяються на відкриті, які мають тісний зв'язок з морем, та закриті, відокремлені від моря перешийками та косами без постійно діючих проток. Закриті лимани можуть епізодично сполучатися з морем. В умовах посушливого клімату солоність води у закритих лиманах зазвичай вища за морську.

У гирлах малих та середніх річок Причорномор'я сформувалися переважно закриті лимани. Розміри закритих лиманів залежать від співвідношення припливних та витратних статей їх водного балансу (Тучковенко, Гопченко та ін., 2012). Обмін речовинами, енергією закритих лиманів із морем обмежений або повністю відсутній. За таких умов у формуванні гідрологічного, гідрохімічного режимів та гідроекологічного стану лиманів значну роль відіграють річки, які живлять лимани прісною водою. Назви лиманів часто співпадають із назвами річок, які в них впадають.

Значна кількість малих та середніх річок, у гирлах яких сформувалися сучасні закриті лимани, є маловодними. Річний стік формується за рахунок весняного водопілля (II-IVмісяці року). Катастрофічні дощові паводки спостерігаються вкрай рідко. У літній та осінній сезони року такі річки часто пересихають (Гопченко, Лобода, 2005). Існування дефіциту води викликало будівництво значного числа малих штучних водойм для розвитку рибництва і тваринництва, більшість з яких не узаконена. Відсутність протифільтраційних заходів та пристроїв для спускання води у нижній б'єф у ставках обумовила той факт, що вони працюють здебільшого як штучні випарники. В результаті таких дій річки Причорномор'я стали пересихати не тільки у маловодні, а й у середні за водністю роки. Коефіцієнт акумуляції (відношення об'єму штучних водойм до об'єму води, який протікає через створ річки) на річках почав наближатися до 1 та іноді навіть перевищувати її.

Процеси глобального потепління, які розвиваються на території України з початку 90-х років минулого сторіччя, сприяли зменшенню припливу прісних річкових вод до лиманів та зростанню втрат на випаровування (Степаненко, Польовий, Лобода та ін., 2015). Майже для всіх лиманів Причорномор'я є характерним їх поступове обміління, всихання окремих ділянок та засолення. Значне нагрівання води влітку викликало інтенсифікацію процесів евтрофікації, посилення заморних явищ, заростання водоростями, порушення життєдіяльності флори та фауни (Зайцев, Александров та ін., 2006).

Геологічна будова узбережжя Чорного моря сприяла формуванню донних осадів, які під впливом біогеохімічних процесів переформувалися у лікувальні грязі (пелоїди). На даний час найбільш інтенсивно використовуються грязі Куяльницького лиману, які за своїми



властивостями характеризуються як найбільш якісні і не поступаються грязям Мертвого моря (Топчів та ін., 2012). Перший лікувальний заклад був відкритий у 1833 р.

Куяльницький лиман має витягнуту форму у напрямі з північного заходу до південного сходу (рис.1). З півночі до лиману впадає річка Великий Куяльник. Лиман розташований у 3 км від узбережжя Одеської затоки Чорного моря та в 5 км від обласного міста Одеса. Площа лиману знаходиться у межах 50-60 км<sup>2</sup>, довжина досягає 28 км, середня глибина дорівнює 1 м. Лиман є закритим, відокремленим від моря піщаним пересипом до 3 км завширшки. Рівень води в лимані завжди нижче рівня води в морі, а солоність набагато вища за морську. Середня мінералізація морської води у Одеській затоці становить близько 14 г/дм<sup>3</sup>. На березі південно-східної частини лиману у межах міста Одеса розташований «Клінічний санаторій імені Пирогова». Нині цей курорт спеціалізується на лікуванні захворювань суглобів, опорно-рухового апарату, нервової системи, шкіри та інших, включаючи лікування дитячого церебрального паралічу. Рішенням Верховної Ради України у грудні 2018р. прийнятий закон про визнання природних територій Куяльницького лиману курортом державного значення.



Рис. 1. Місцезоложення р. В. Куяльник (Електронний атлас України, 2000)

Зростання посушливості клімату, яке спостерігається на території Північно-Західного Причорномор'я з кінця ХХ сторіччя, призвело до часткового всихання лиману і катастрофічного зростання його мінералізації. Вже восени 1992 р. мінералізація води у лимані перевищила допустиме значення 200 г/дм<sup>3</sup>, при якому деякі розчинені солі почали кристалізуватися та випадати в осад. Одночасно з цим спостерігалася і загибель водних організмів (зник рачок *Artemia salina*) та був поставлений під загрозу процес формування лікувальних пелоїдних грязей. Рівень води у лимані щорічно зменшувався на 5-10 см, а мінералізація води, починаючи з 2009р., стала перевищувати 300 г/дм<sup>3</sup>, досягаючи значень 340-420 г/дм<sup>3</sup>, хоча забезпечення «доброго екологічного стану» Куяльницького лиману можливе при підтриманні мінералізації води в діапазоні від 40 до 200 г/дм<sup>3</sup>.

Таким чином, існування Куяльницького лиману як унікального бальнеологічного об'єкту було поставлене під загрозу повного зникнення. В результаті співпраці фахівців провідних наукових, проектно-вишукувальних та вищих навчальних закладів м. Одеси

(включно з Одеським державним екологічним університетом – ОДЕКУ) та Одеської обласної державної адміністрації були підготовлені та реалізовані програми збереження та відновлення водних ресурсів у басейні Куяльницького лиману (Регіональна програма, 2011) та програма моніторингу стану Куяльницького лиману (Програма, 2015), які були затверджені Департаментом екології та природних ресурсів Одеської області.

В результаті виконання цих програм було визнано, що найбільш оптимальним (з економічної точки зору та термінів реалізації) запобіжним заходом по збереженню Куяльницького лиману буде перекид до нього морських вод із Одеської затоки Чорного моря. З грудня 2014 р. була реалізована періодична подача морської води через трубопровід «море-лиман». Однак тривалий перекид морської води з Одеської затоки до лиману супроводжується додатковим надходженням солей з моря, які акумулюються і накопичуються у водоймі. Їх потенційний вплив на природні ресурси лиману недостатньо вивчений. У зв'язку із цим постало питання про відновлення (приведення до природного стану) річок, які впадають до лиману. Насамперед, мова йшла про річку В. Куяльник із площею водозбору 1860 км<sup>2</sup>, що становить 83% від загальної площі водозбору Куяльницького лиману. Саме ця річка у минулому була основним постачальником прісної води до лиману. Відновлення природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) стоку річки В.Куяльник дозволило б збільшити приплив прісних вод до лиману та зменшити або зовсім уникнути надходження до нього морських вод через трубопровід. Основними проблемами, які постали при вирішенні цієї задачі, стали можливе зменшення стоку річки у ХХІ сторіччі в результаті глобального потепління та ефективність проведення певних заходів із зменшення рівня водогосподарської діяльності на водозборі.

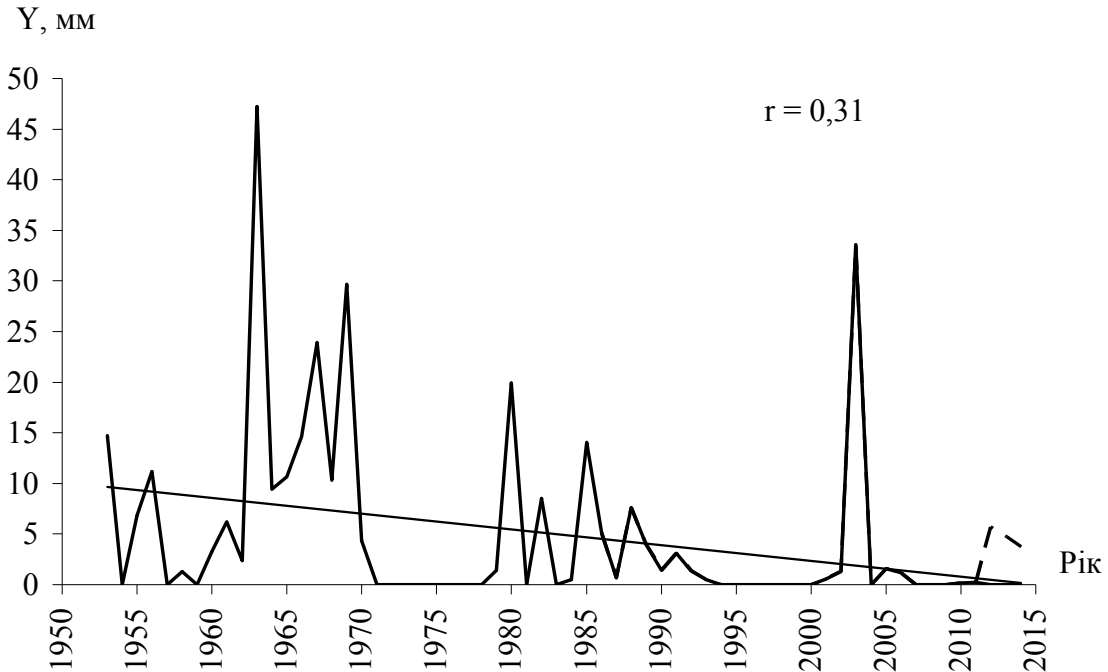
**Мета роботи** полягала у визначенні доцільності та ефективності роботи трубопроводу «море-лиман» при проведенні заходів по повному або частковому відновленню стоку річки В. Куяльник з метою забезпечення стабільного рівневого та сольового режимів лиману з урахуванням наслідків можливих кліматичних змін (за кліматичними сценаріями) у найближчі десятиріччя.

**Матеріали та методи.** У роботі використані архівні дані гідрометеорологічних та гідрохімічних спостережень за період від початку спостережень по 2018 р.включно, а також результати вимірювань рівнів води в лимані, мінералізації води в лимані, річках, балках, штучних скидних лотках і трубопроводі «море-лиман», витрат води через трубопровід та в гирлах водотоків, що живлять лиман водою, здійснених Одеським державним екологічним університетом протягом 2015-2018 рр.

Водозбори річок, які впадають у Куяльницький лиман (табл. 1), є невивченими (рр. Довбока та Кубанка) або недостатньо вивченими (р. В. Куяльник) у гідрологічному відношенні. На річці В.Куяльник Гідрометслужбою України були організовані гідрологічні спостереження, які проводились у створі с. Северинівка (за 5 км від впадіння в Куяльницький лиман) у період 1986-2014 рр. У 2015 році вище створу спостережень побудували дамбу, яка перекрила надходження води у нижню течію. Отже, ряд даних спостережень за стоком обмежився 2014 роком. З метою відновлення ряду річного стоку р.В.Куяльник у минулі роки (1953-1984 рр.) був установлений лінійний зв'язок між значеннями річного стоку у створі р.В.Куяльник – с. Северинівка та річним стоком річки Тилігул у створі Березівка. Коефіцієнт кореляції установленого зв'язку дорівнює 0,84. За отриманим рівнянням лінійної регресії були відновлені значення річного стоку р.В.Куяльник за 31 рік. Слід зазначити, що вимірний стік річки можна класифікувати як побутовий, тобто перетворений водогосподарською діяльністю. Отримано, що з 1953 по 1988 рік середній багаторічний побутовий річний стік річки В. Куяльник становив 7,5 мм, а у період 1989-2014 рр. (після прояву суттєвих змін клімату через глобальне потепління) він дорівнював лише 1,88 мм. У хронологічному ході річного спостереженого (побутового) стоку прослідковується статистично значущий тренд, який показує стійку тенденцію до зменшення стоку (рис. 2).

**Таблиця 1.** Морфометричні характеристики найбільших річок в басейні Куяльницького лиману

Річка	Площа водозбору, км <sup>2</sup>	Довжина річки, км	Середній зважений похил річки, ‰
В. Куяльник	1860	170	0,63
Кубанка	129	17,0	2,60
Довбока	68,3	15,0	5,50

**Рис. 2.** Хронологічний хід річного стоку  $Y$  (мм) у створі р. В. Куяльник – с. Северинівка за період 1953-2011 рр. (— 1953-1985 рр. (відновлені дані), ..... 1986-2014 рр. (спостережені дані), на графіку показана лінія тренду (Лобода, Гопченко та ін., 2016)

З метою визначення характеристик природного і побутового стоку річок, які надають прісну воду лиману, була застосована модель “клімат-стік”, розроблена в ОДЕКУ (Лобода, 2005), яка дає можливість визначення характеристик природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) та побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) стоку з невивчених або недостатньо вивчених у гідрологічному відношенні водозборів, а також може бути застосованою для водозборів із стоком суттєво трансформованим водогосподарською діяльністю. Модель дозволяє виконувати ймовірнісні оцінки характеристик стоку (за рік та по місяцях) на базі метеорологічної інформації та відомостей про водогосподарське використання стоку (зрошування, осушування, перекид та регулювання стоку штучними водоймами та інше) і містить у собі ланцюг розрахункових блоків: “клімат – кліматичний (зональний) стік – підстильна поверхня – природний стік – водогосподарська діяльність – побутовий стік”.

Теоретичною базою моделі при розрахунках природного річного стоку за метеорологічними даними є рівняння водно-теплогового балансу. Річні суми опадів виступають як характеристика ресурсів зволоження, максимально можливе випаровування – як характеристика теплоенергетичних ресурсів клімату. Середній багаторічний річний стік, визначений за моделлю і представлений у вигляді карти ізоліній, ототожнюється із

зональними річним стоком і може слугувати характеристикою водних ресурсів певної території. Оскільки на вході у цей блок використовуються метеорологічні дані, то розрахований за ними зональний стік отримав назву “кліматичного”. Блок розрахунків побутового стоку являє собою стохастичну модель, на вході якої використовуються статистичні параметри природного стоку, визначені за метеорологічними даними, а на виході отримуються статистичні характеристики стоку, трансформованого водогосподарською діяльністю (Loboda, Phan Van Chinnh, 2004). Модель калібрована та верифікована на даних метеорологічних та гідрологічних спостережень минулого сторіччя (до початку значущих змін клімату в Україні, які стали явно проявлятися з 1989 р.) для різних географічних зон України та різних за розмірами водозборів. Модель використана у нормативних документах по розрахунках гідрологічних характеристик республіки Молдова (Молдова, 2012). Точність визначених статистичних параметрів річного стоку відповідає вимогам нормативних документів України по розрахунках гідрологічних характеристик і становить  $\pm 10\%$ . Структура моделі “клімат-стік” дозволяє використовувати її для прогнозних розрахунків характеристик природного (Gorchenko, Loboda, 2000) та побутового стоку з використанням даних кліматичних сценаріїв змін глобального та регіонального клімату (Лобода, 2011). За моделлю “клімат-стік” були надані характеристики стоку річки В.Куяльник за ретроспективний період, у сучасності та майбутньому, згідно із різними кліматичними сценаріями, в залежності від кліматичних умов формування стоку і ступеня впливу на них водогосподарської діяльності (Loboda, Bozhok, 2015).

Для розрахунків стоку води від річок, які впадають у Куяльницький лиман, протягом XXI ст. був використаний найбільш вірогідний для регіону кліматичний сценарій (M10) з бази даних ENSEMBLES (Сайт проекту ENSEMBLES, 2016), який відповідає глобальному сценарію A1B (Wörner та ін., 2012) розрахованому за моделлю MPI-REMO Інституту метеорології ім. Макса Планка (Гамбург).

При вирішенні задачі визначення мінералізації води у лимані в залежності від джерел надходження води до нього (побутовий річковий стік, природний річковий стік, за наявності перекиду морської води та без перекиду) використовувались рівняння водного та сольового балансів лиману. У розрахунках мінералізації води за ретроспективний період та за обраним сценарієм змін клімату на першому етапі визначались складові водного балансу лиману. Об’єм води в Куяльницькому лимані  $W_{K,j}$  (млн. м<sup>3</sup>) наприкінці розрахункового ( $j$ ) місяця визначався як результуюча припливних та витратних складових, з урахуванням початкового об’єму води в лимані наприкінці попереднього та на початку наступного розрахункового місяця  $W_{K,j-1}$  (млн. м<sup>3</sup>). Припливними складовими водного балансу лиману є об’єми надходження прісної води до водної поверхні лиману у вигляді атмосферних опадів  $W_{P,j}$  (млн. м<sup>3</sup>), об’єми стоку річок  $W_{r,j}$  (млн. м<sup>3</sup>), об’єми надходження морської води  $W_{m,j}$  (млн. м<sup>3</sup>) через трубопровід «море-лимани». Основною витратною складовою  $W_{E,j}$  (млн. м<sup>3</sup>) є об’єми води, що випаровуються з водної поверхні лиману кожен місяць. Розрахунки маси солей у лимані виконувались за допомогою балансового рівняння виду

$$C_{K,j} = C_{K,j-1} + (W_{P,j}S_{P,j} + W_{r,j}S_{r,j} + W_{m,j}S_{m,j}) \Delta t \quad (1)$$

де  $\Delta t$ — розрахунковий крок моделі у часі, який брався рівним 1 місяцю, млн. м<sup>3</sup>;

$C_{K,j}$  та  $C_{K,j-1}$ — маса солей в лимані наприкінці розрахункового ( $j$ ) та попереднього (відносно розрахункового) місяця ( $j-1$ ), млн. т;

$S_{P,j}$ ,  $S_{r,j}$ ,  $S_{m,j}$  — значення середньої місячної мінералізації атмосферних опадів, що випали на водну поверхню лиману за розрахунковий період, припливних вод від водотоків, морських вод, що надійшли до лиману трубопроводом «море-лиман», відповідно, г/дм<sup>3</sup>.

Модель водно-сольового балансу калібрована та верифікована на базі архівних даних (щомісячних значень рівнів і мінералізації води в лимані, шарів атмосферних опадів та випаровування з водної поверхні водойми, об'ємів припливу води з водозбору лиману тощо) за період з 1986 по 2018 рр. Порівняння розрахункових (за моделлю водно-сольового балансу) та фактичних (за даними вимірювань) середніх місячних значень рівнів і мінералізації води в лимані, виконаних за умови відсутності надходження морських вод (1987 та 2003 рр.) та умови функціонування трубопроводу «море-лиман» (2015-2018 рр.), дало задовільні результати. Середні відносні відхилення не перевищували  $\pm 4\%$  для рівнів води та  $\pm 17\%$  — для мінералізації (Loboda, Hryb, 2017).

Для вирішення задачі діагнозу та прогнозу просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману (рівня, солоності, температури води), які обумовлюють хімічні та біологічні процеси у ньому, і, таким чином, впливають на властивості ропи та лікувальних грязей, застосована нестационарна тривимірна чисельна гідротермодинамічна модель Delft3D-FLOW (Delft3D-FLOW, 2016, 2018). Модель Delft3D-FLOW базується на чисельному рішенні рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Бусінеска. Система диференціальних прогностичних рівнянь моделі складається з рівнянь руху у горизонтальній площині, рівняння нерозривності, рівнянь переносу тепла і солей, а також з двопараметричної  $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності, яка замикає ці рівняння. Вертикальні компоненти векторів швидкості течій розраховуються через рівняння нерозривності. Для рівняння швидкості вертикального руху береться гідростатичне наближення. Рівняння стану морської води визначається за формулою ЮНЕСКО (Millero та ін., 1980). Тепло- та масообмін з атмосферою розраховуються в моделі з використанням напівемпіричних формул. Випаровування з водної поверхні визначається як сума випаровування під дією вимушеної конвекції та випаровування при вільній конвекції. Ступінь прозорості води, яка впливає на інтенсивність поглинання короткохвильової радіації у водному стовпі, задається в моделі як константа. Кінцево-різницева апроксимація рівнянь моделі виконана на криволінійній розрахунковій сітці С-типу за класифікацією Аракави. Програмна реалізація чисельних рівнянь моделі дозволяє враховувати під час проведення модельних розрахунків всихання-затоплення окремих мілководних ділянок ложа лиману при змінах рівня води у ньому.

Для верифікації результатів модельних розрахунків використовувались дані систематичних безперервних спостережень за мінливістю рівня води в лимані на водпосту «Одеса-Куяльник», а також епізодичних спостережень за рівнем, температурою та солоністю води в лимані, виконані фахівцями ОДЕКУ при проведенні моніторингу протягом 2015 р.

**Результати досліджень та їх обговорення.** В результаті визначення природного та побутового стоку за моделлю “клімат-стік” для різних розрахункових періодів та при співставленні їх із даними спостережень було виявлено, що природний середній багаторічний стік річки В.Куяльник за розрахунковий період 1989-2014 рр. мав би становити 20,4 млн.м<sup>3</sup>, а фактично (за даними спостережень) дорівнював 3,5 млн.м<sup>3</sup>, тобто був на 83% менший. Оцінка змін водних ресурсів досліджуваної річки, які відбулися після 1989р., показала, що кліматичні зміни обумовили зменшення стоку лише на 21,5%. Було зроблено висновок, що основною причиною зменшення стоку річки В.Куяльник та інших водотоків басейну Куяльницького лиману є водогосподарська діяльність. Серед розглянутих чинників водогосподарської діяльності на водозборі річки (урбанізація, агролісомеліорація, додаткове випаровування з поверхні штучних водойм, втрати на заповнення штучних водойм, надходження скидних вод) основними визнані втрати на наповнення штучних водойм та додаткове випаровування з водної поверхні.

Збір інформації про сучасний стан штучних водойм на водозборі р.Великий Куяльник проводився на базі матеріалів Одеського обласного управління водних ресурсів до 2012 року

включно та сучасних даних супутникових знімків, наведених в Google Earth та Google Maps (<https://www.google.com.ua/maps/>). Всі штучні водойми були нанесені на карту, для побудови якої використаний ресурс SRTM Data Selection Options та програма Surfer. Виконаний аналіз векторних карт місцевості та рельєфу земної поверхні з масштабом 1:20000 і горизонталями, проведеними через кожні 20 м, а також сучасних супутникових знімків досліджуваної території. Згідно з даними Одеського обласного управління водних ресурсів станом на 2012 рік, в басейні річки В.Куяльник знаходилися 59 штучних водойм. З них лише для шести штучних водойм із загальною площею 167,36 га та об'ємом 5,29 млн. м<sup>3</sup> були складені паспорти. Аналіз супутникових знімків дозволив виявити ще 62 несанкціонованих штучних об'єкти. Було прийняте рішення про оптимізацію розміщення штучних водойм на водозборі, яка має бути проведеною за рахунок зменшення об'ємів заповнення штучних водойм. В залежності від масштабів розчищення річки від водойм буде відновлюватися її стік, а, отже, збільшуватися приплив прісних вод до Куяльницького лиману. Проведення такої роботи у теперішній час буде доцільним, оскільки питне водопостачання забезпечується у Причорномор'ї водами великих річок (Дунай, Дністер, Південний Буг) та підземними водами, а штучні водойми відіграють важливу роль лише для дрібних господарств. На базі моделі "клімат-стік" були розраховані граничні (максимально допустимі) об'єми заповнення штучних водойм, при яких стане можливим відновлення природного стоку річки В.Куяльник на 75, 80 та 90 %. Рекомендовані об'єми заповнення штучних водойм дорівнюють 5,1; 4,08 та 2,04 млн. м<sup>3</sup>, відповідно, при максимально можливому загальному об'ємі заповнення 15,6 млн.м<sup>3</sup>.

З метою визначення перспектив відновлення стоку річки В.Куяльник в умовах змін клімату у XXI сторіччі та ролі збільшення річкового стоку у формуванні гідрологічного режиму Куяльницького лиману, був використаний сценарій M10 (з гілки сценаріїв A1B, модель REMO). В результаті аналізу різницевих інтегральних кривих багаторічних коливань річних сум опадів та середніх річних температур повітря у XXI ст. за обраним регіональним кліматичним сценарієм, були встановлені розрахункові кліматичні періоди, які відповідають циклам коливань водності в межах водозбірної басейну Куяльницького лиману: 1990-2030 рр.; 2031-2070 рр.; 2071-2098 рр. З метою встановлення відмінностей внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик вод Куяльницького лиману, викликаних зміною кліматичних умов, для кожного з виділених кліматичних періодів XXI ст. були обрані типові за гідрометеорологічними умовами (формування стоку на водозборі лиману) роки із 25% (багатоводний), 50% (середньоводний) та 75% (маловодний) ймовірністю перевищення (забезпеченість) надходження річкового стоку в лиман.

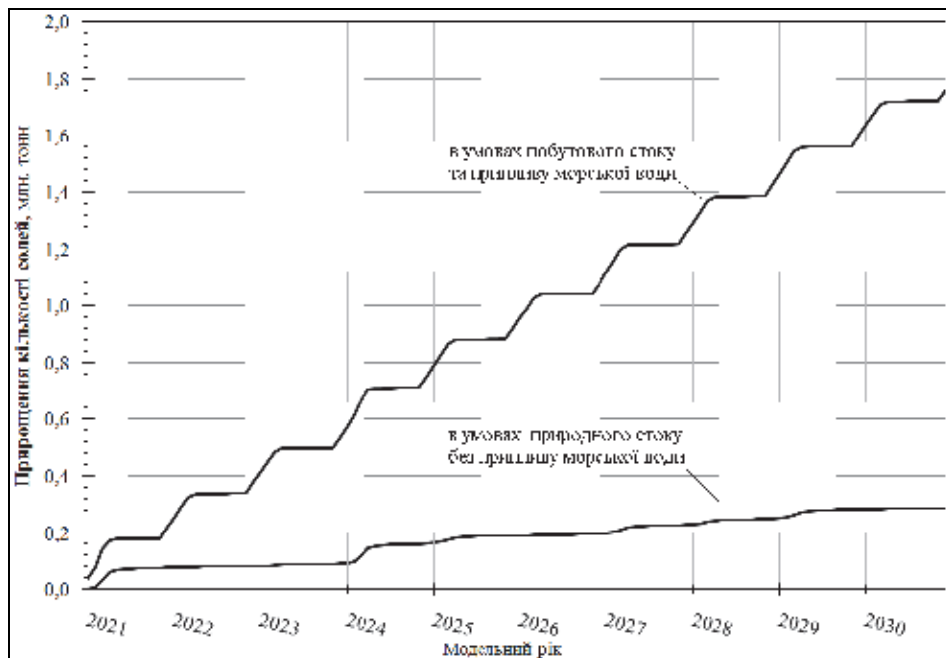
У роботі авторів (Loboda, Hryb, 2017) наведені результати прогнозних розрахунків для різних кліматичних періодів характеристик природного та побутового річного стоку річки й мінералізації вод у типовий за водністю рік та за роки різної водності (багатоводні, середні та маловодні). Показано, що при відновленні природного стоку річки В.Куяльник на 100%, тільки у період 1990-2030рр. можливе утримання середньої багаторічної мінералізації нижче гранично допустимого її значення 200 г/дм<sup>3</sup>. Слід відзначити, що через мінливість гідрометеорологічних характеристик у окремі маловодні роки та місяці другої половини року, коли стік річки В. Куяльник відсутній, можливі суттєві перевищення значення 200 г/дм<sup>3</sup>. У наступні інтервали часу (2031-2070 рр.; 2071-2098 рр.) через поступове зменшення водності річки за рахунок кліматичних змін утримувати необхідну мінералізацію навіть при 100% відновленні природного стоку річки В.Куяльник можливо буде лише у багатоводні роки. Отже, заходи по розчищенню річки В.Куяльник після 2030 р. будуть неефективними і перекид морської води по трубопроводу буде необхідним.

За розрахунками статистичних характеристик природного річного стоку за період 1990-2030 рр. середній багаторічний об'єм притоку прісних вод від річки В.Куяльник до Куяльницького лиману становитиме 19 млн. м<sup>3</sup>, що відрізняється від величини природного стоку до 1989р. (20,4 млн. м<sup>3</sup>) лише на 6,9%. Ця обставина дозволила зробити висновок про

відносно збереження природних умов формування стоку річок басейну Куяльницького лиману до 2030р.

Згідно із результатами проведеного імітаційного моделювання за моделлю “клімат-стік” були визначені граничні (допустимоможливі) об’єми заповнення штучних водойм у кліматичних умовах розрахункового періоду 1990-2030 рр. Їх оптимізація дозволить частково відновити природний стік. Отримано, що відновлення природного стоку (19 млн.м<sup>3</sup>) на 90% можливе при граничному об’ємі заповнення рівному 0,4 млн. м<sup>3</sup>, на 80% – при граничному об’ємі у 2 млн. м<sup>3</sup>, на 75% – при граничному об’ємі заповнення у 3 млн. м<sup>3</sup> (з урахуванням втрат на додаткове випаровування з водної поверхні). При таких граничних об’ємах середня багаторічна величина (в період 1990-2030 рр.) надходження прісного стоку від річки В.Куяльник до Куяльницького лиману становитиме відповідно 17,0 млн. м<sup>3</sup>; 15,0 млн. м<sup>3</sup>; 14,5 млн. м<sup>3</sup>.

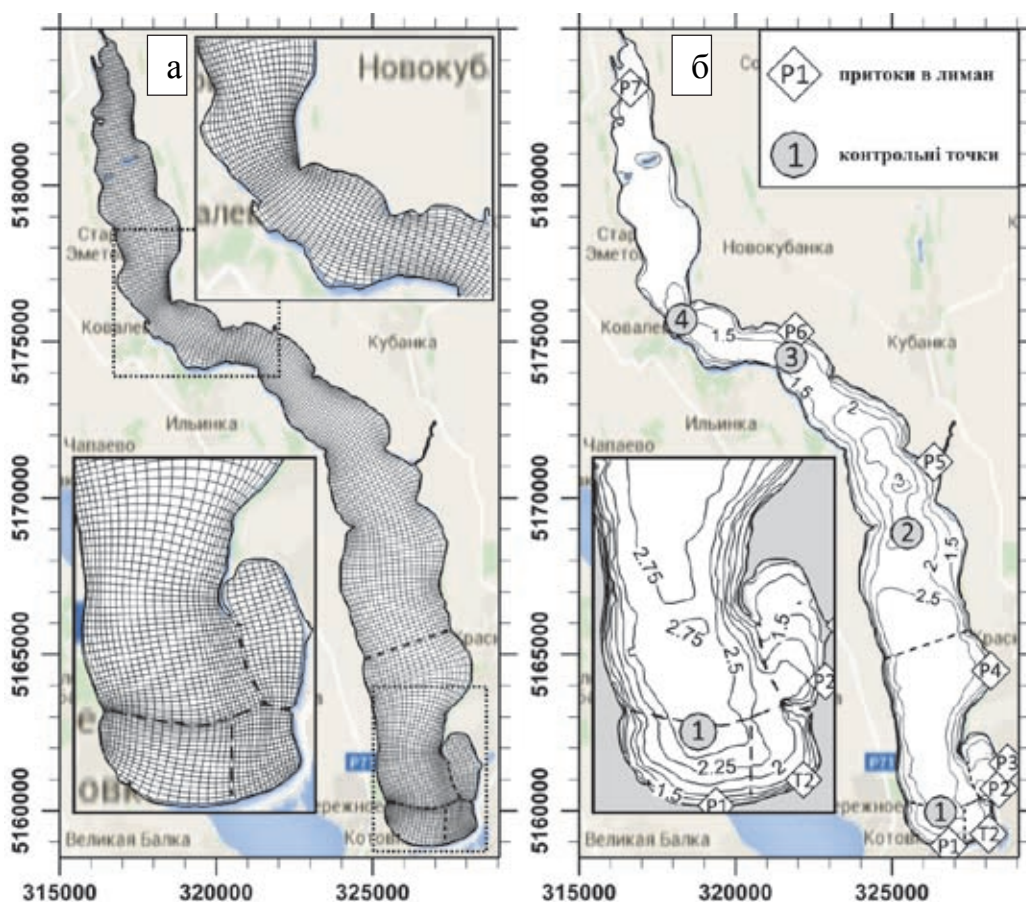
Аналіз мінливості середньомісячних значень рівнів та мінералізації води у Куяльницькому лимані, визначених за моделлю водно-сольового балансу показав, що підтримання мінералізації води в оптимальному діапазоні від 40 до 200 г/дм<sup>3</sup> та збереження так званої «бальнеологічної біоти», насамперед зяброногого рачка *Artemia salina*, можливе лише за умови відновлення стоку річки В. Куяльник на 75-80%. Ефект від такого відновлення природного стоку майже такий самий як і від роботи трубопроводу протягом 4-5 місяців на рік. Обидва варіанти регулювання гідрологічного режиму лиману забезпечать сприятливі умови для збереження бальнеологічного призначення лиману. Однак, аналіз динаміки накопичення солей у лимані показав, що в умовах роботи трубопроводу відбувається суттєве прирощення кількості солей у лимані, у той час як при забезпеченні лиману прісними водами річки приріст солей суттєво зменшиться (рис. 3).



**Рис. 3.** Прирощення кількості солей в Куяльницькому лимані в умовах природного стоку р. В.Куяльник без надходження морської води з Одеської затоки (нижня крива) та в умовах побутового стоку річки і надходження морської води (верхня крива) у період 2021-2030 рр.

З метою визначення особливостей внутрішньорічної просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик лиману, включно із солоністю його вод, за різних об’ємів стоку річки В.Куяльник, режимів поповнення лиману морськими водами через трубопровід “море-лиман”, з урахуванням кліматичних чинників, використовувалась тривимірна нестационарна гідротермодинамічна модель Delft3D-FLOW.

Для дискретизації гідродинамічних рівнянь у 3-D просторі використовувалась структурована криволінійна система координат в горизонтальній площині та  $\sigma$ -система координат – по вертикалі. Криволінійна розрахункова сітка, яка була згенерована та пристосована до меж акваторії лиману, складалась з  $40 \times 280$  розрахункових осередків у горизонтальній площині (рис. 4а). Осередки сітки мають змінні розміри по горизонталі, які плавно змінюються в межах 60-210 м вздовж повздовжньої вісі лиману та 40-280 м – у поперечному напрямку. По вертикалі задавались 3 розрахункових рівня у криволінійній  $\sigma$ -системі координат. Глибини в лимані, приведені до позначки рівня води мінус 4,8 м БС (рис. 4б), задавались на основі батиметричних даних, знятих з відцифрованої карти Одеської області масштабу 1:25000 та відміток дна лиману, отриманих за результатами батиметричних зйомок 2009 та 2016 рр. (ОДЕКУ, 2016). Часовий крок рішення рівнянь моделі приймався рівним 30 с. Початкові умови для модельних розрахунків (відмітка рівня води у лимані, температура, солоність води) задавались на основі даних спостережень та приймались однорідними у просторі.



**Рис. 4.** Розрахункова сітка (а) та схема розташування на акваторії Куяльницького лиману контрольних точок (б) для аналізу результатів моделювання (позначені 1-4) та приток в лиман: Т2 – водопропуск «лиман-море»; Р1 – лоток зі ставків пересипу; Р2 – лоток з ВНС №5; Р3 – б. Корсунцівська; Р4 – б. Гільдендорфська; Р5 – р. Кубанка; Р6 – р. Довбока; Р7 – р. В. Куяльник. На осях координат позначені відмітки сітки Універсальної поперечної проекції Меркатора (UTM) з кроком 1000 м, зона 36N. Глибини в лимані, приведені до відмітки рівня води мінус 4,8 м БС, показані на рис. 4.б контурами та цифрами

Адаптація моделі до умов Куяльницького лиману та її верифікація були виконані (ОДЕКУ, 2016) із використанням архівних гідрометеорологічних даних для двох обраних екстремальних років: 1987 р. та 2003 р. У 1987 р. стік річки В.Куяльник в лиман був майже відсутній: невеликий стік (із витратами до  $1,54 \text{ м}^3/\text{с}$ ) спостерігався лише наприкінці березня –



на початку квітня. У 2003 р., навпаки, мала місце найбільша за останні десятиріччя повінь: витрати річки В.Куяльник досягали  $34,5 \text{ м}^3/\text{с}$  наприкінці березня. В процесі адаптації моделі було виконано калібрування значень найбільш значущих коефіцієнтів рівнянь моделі, які використовувались у подальшому при розрахунках. Валідація гідродинамічної моделі проводилась за даними моніторингу 2015 р. (поповнення лиману морською водою відбувалось протягом 4,5 зимово-весняних місяців) і показала задовільну узгодженість результатів моделювання рівнів, температур та солоності води зі спостереженими значеннями (Тучковенко, Кушнір, 2016). Для гідрометеорологічних умов 2015 р. також були отримані оцінки змін внутрішньорічної просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за різних обсягів надходження до нього стоку річки В.Куяльник. Моделювались варіанти, в яких, за інших незмінних умов, задавались: спостережені середньомісячні витрати річки; розраховані за моделлю «клімат-стік» середньомісячні витрати побутового стоку; середньомісячні витрати, які становлять 25% природного стоку розрахованого за моделлю «клімат-стік»; середньомісячні витрати, які дорівнюють 75-80% природного стоку розрахованого за моделлю «клімат-стік».

Результати моделювання показали (Тучковенко, Кушнір, Лобода, 2017), що відчутні позитивні зміни гідрологічних характеристик лиману відбудуться лише у разі відновлення природного стоку річки Великий Куяльник не менш ніж на 70-80%. Надходження до лиману відновленого до 75% природного стоку річки В.Куяльник призвело би до підвищення рівня води в ньому протягом року на 0,08-0,1 м (рис. 5), зменшення середньорічних значень солоності води: на 21‰ – в південній частині лиману (точка 1, рис. 4) і 24-28 ‰ – в центральній і північній його частинах, порівняно з базовим варіантом фактичного надходження стоку від річок у 2015 р. У разі забезпечення надходження в лиман лише 25% відновленого природного стоку, середньорічні значення солоності води зменшилися б лише на 7-9‰ – в основній глибокій частині акваторії лиману (точки 1-3) і на 2,4 ‰ – на мілководній ділянці північної частини (точка 4). Найбільша внутрішньорічна мінливість солоності є характерною для точки 4, яка знаходиться ближче до місця впадіння річки Великий Куяльник, найменша – для точки 1, найбільш віддаленої від гирла річки (рис. 6).

Моделювання внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик лиману для різних за водністю типових років сучасного кліматичного періоду XXI ст. (1990-2030 рр.), виконане за умов відновлення стоку річки В. Куяльник до 75 % від природного, але без урахування надходження до лиману морських вод і стоку малих водотоків в лиман показало, що в цьому разі стабілізація річного циклу мінливості солоності води в лимані відбудеться лише в багатоводні роки. У всіх інших розглянутих випадках солоність води в лимані наприкінці року буде значно більшою, ніж початкова. Виникне міжрічна тенденція значного підвищення солоності вод лиману. У маловодні роки, коли навіть природний стік річки В.Куяльник майже відсутній, у вересні відбудеться розділення основного ложа лиману на дві відокремлені водойми (рис. 7). На підставі цих результатів був зроблений висновок, що збільшення природного стоку річки В. Куяльник не здатне самостійно забезпечити стабілізацію гідроекологічного режиму Куяльницького лиману без періодичного поповнення його морською водою Одеської затоки та здійснення заходів щодо стабілізації і збільшення надходження вод від інших водотоків, які впадають в лиман: малих річок Довбока, Кубанка, балок Гільдендорфська та Корсунцівська.

Як зазначалось, систематичне щорічне поповнення Куяльницького лиману морською водою з Одеської затоки протягом 4-5 місяців на рік, хоча і вирішує проблему стабілізації і поступового підвищення рівня води в ньому, але призводить до виникнення іншої проблеми – інтенсивного накопичення в лимані солей, які надходять з морськими водами. Тому модель була застосована для відповіді на питання: наскільки можна скоротити подачу морської води до лиману у разі відновлення стоку річки В. Куяльник до 80 % від природного. Моделювання внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик лиману виконувалось за метеорологічних умов середнього за водністю (типового) року для розрахункового періоду 1990-2030 рр. (сценарій M10 з гілки сценаріїв A1B). При розрахунках задавались

середньомісячні витрати відновленого на 80% стоку річки Великий Куяльник (що відповідає скороченню об'єму заповнення штучних водойм на водозборі річки з 12 до 2 млн. м<sup>3</sup>), враховувався стік малих водотоків в лиман протягом року.

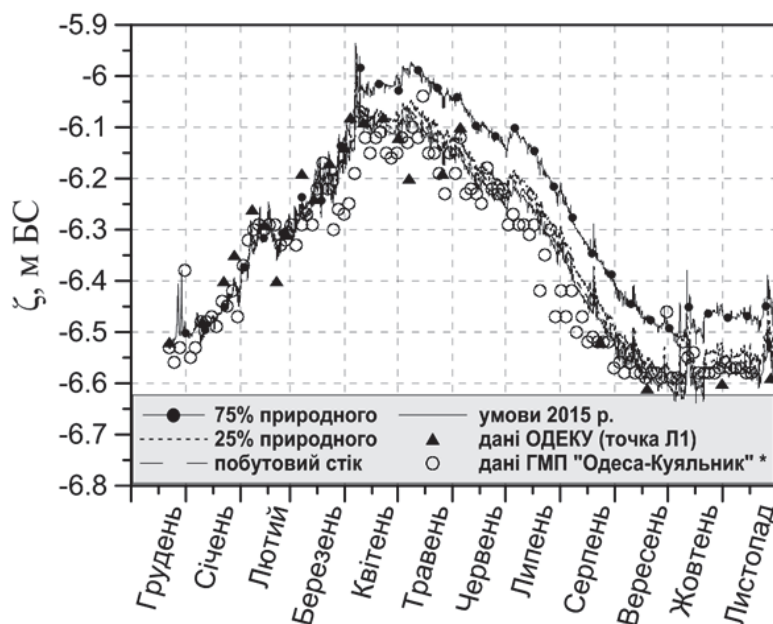


Рис. 5. Внутрішньорічна мінливість відміток рівня води, м БС, у Куяльницькому лимані за даними натурних спостережень (точки) та отримана в результаті моделювання за різними варіантами надходження стоку р. В.Куяльник у 2015 р. – контрольна точка №1 (див. рис. 4)

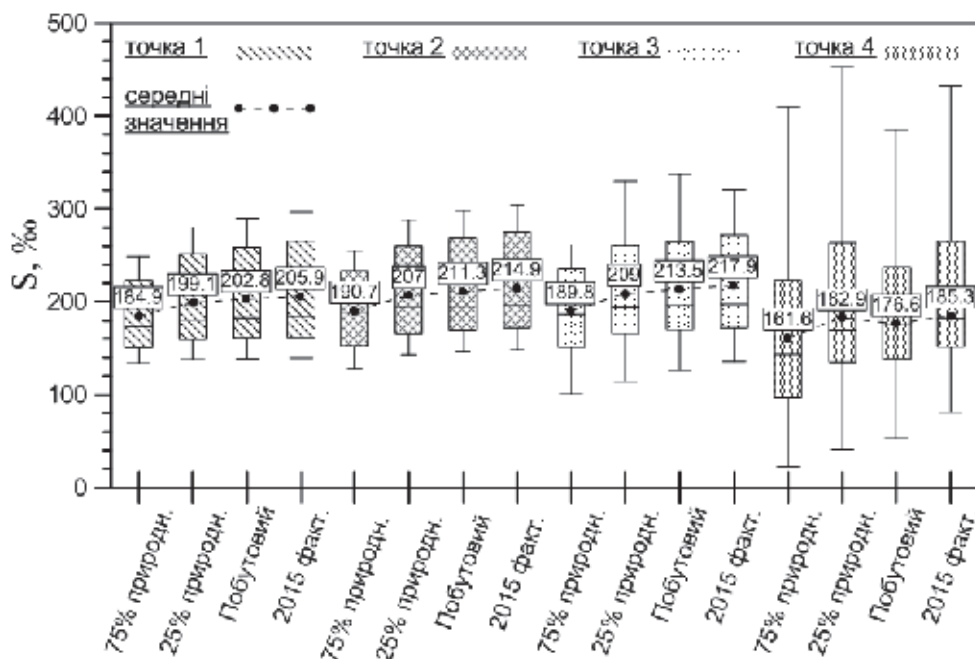
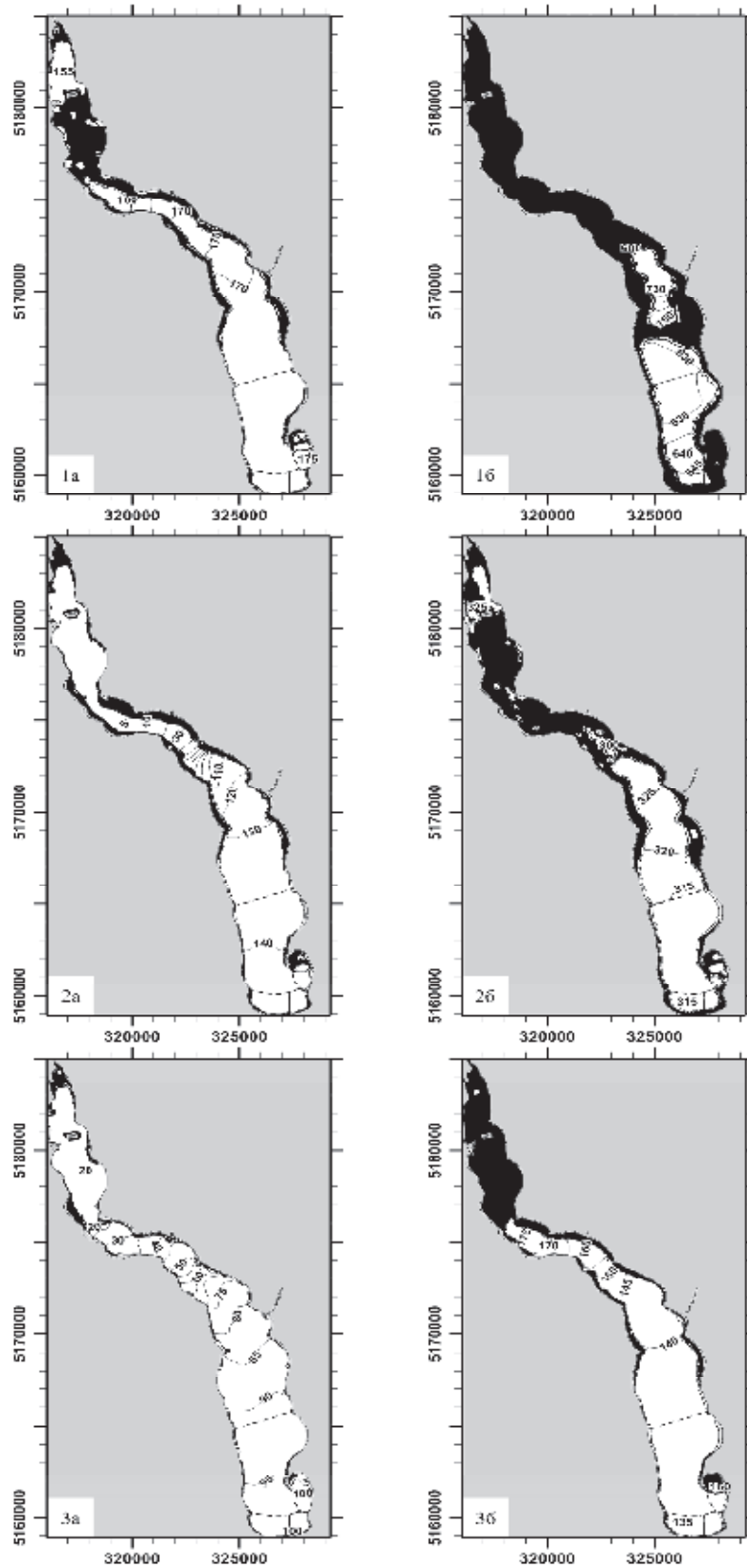
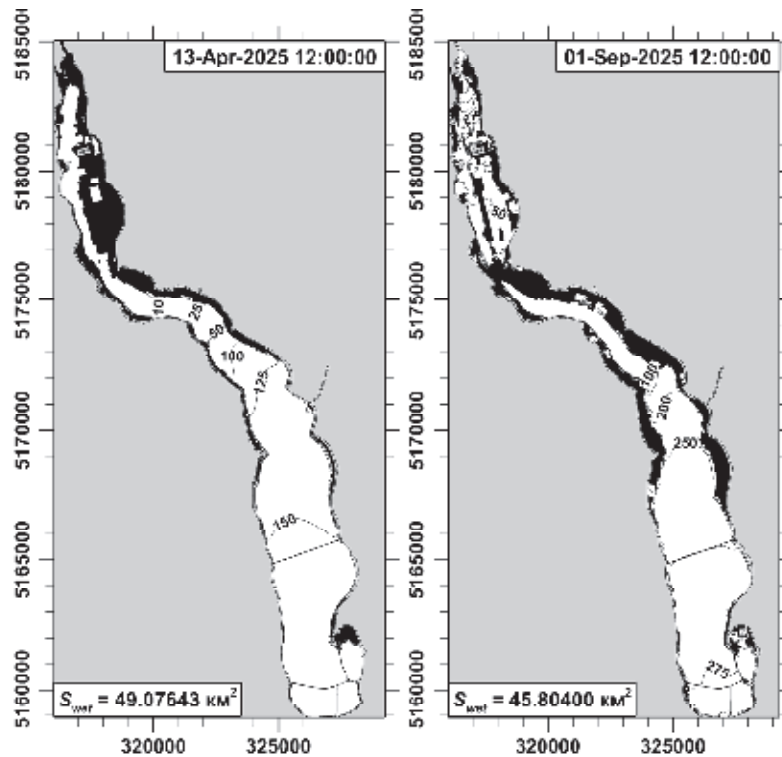


Рис. 6. Характеристики річної мінливості солоності води, ‰, в контрольних точках на акваторії Куяльницького лиману (див. рис. 4), отримані в результаті моделювання за різними варіантами відновлення стоку річки В.Куяльник у 2015 р. Наведені значення 0,25 та 0,75-квантилей; медіанні (риски) та середні (точки) значення; мінімальні (нижні вуса) та максимальні (верхні вуса) значення



**Рис. 7.** Змодельована мінливість просторового розподілу солоності вод лиману, ‰, та меж його водного дзеркала за умов надходження 75% обсягів розрахованого природного стоку р. В. Куяльник у різні характерні роки кліматичного періоду 1990-2030 рр.: 1 – маловодний; 2 – середній за водністю; 3 – багатоводний роки; а) 15 квітня; б) 15 вересня



**Рис. 8.** Просторовий розподіл солоності води в різних частинах Куяльницького лиману у середній за водністю рік для сучасного кліматичного періоду 1990-2030 рр. при відновленні природного стоку річки Великий Куяльник на 80% та скороченій тривалості (1,5 місяці) роботи трубопроводу “море-лиман”

В результаті імітаційного моделювання було визначено, що за кліматичних умов сучасного періоду (1990-2030 рр.), у разі відновлення стоку річки до 80 % від природного, час подачі морської води в лиман через трубопровід в середній за водністю рік можна скоротити з п’яти місяців (грудень-квітень) до 1,0-1,5 місяців (з середини грудня до кінця січня). За цих умов буде забезпечена стабільність рівня води в лимані на міжрічному часовому масштабі та значне зниження солоності води в північній частині лиману з січня до серпня, а також зменшення максимальних значень солоності в південній та центральній частинах лиману порівняно із сучасним варіантом регулювання його гідрологічного режиму. Просторовий розподіл солоності у різні місяці року, отриманий за результатами моделювання, представлений на рис. 8.

### Висновки

Проведення заходів з оптимізації штучних водойм у басейні річки В. Куяльник призведе до ефективного покращення гідрологічного режиму Куяльницького лиману у розрахунковий період 1990-2030 рр. і сприятиме збереженню його бальнеологічних особливостей при виконанні таких умов:

- відновленні на 80% середнього багаторічного природного стоку річки шляхом скорочення сумарного об’єму заповнення штучних водойм з 12 млн.м<sup>3</sup> до 2 млн.м<sup>3</sup>;
- збереженні та стабілізації надходження прісних вод від інших водотоків (річки Довбока, Кубанка, балки Гільдендорфська та Корсунцівська)
- продовженні роботи трубопроводу море-лиман у зимовий сезон при скороченій тривалості періоду поповнення лиману морською водою з Одеської затоки (до 1,0-1,5 місяця).

В цьому разі буде забезпечена стабілізація гідрологічного режиму лиману, а щорічне додаткове надходження до нього солей з морськими водами буде становити 20-50 тис. тонн, у той час як в умовах побутового стоку та перекиду морської води через трубопровід протягом 4-5 місяців на рік щорічне надходження солей до лиману досягає 230-250 тис. тонн.

## Список літератури

- Гопченко, Е.Д., Лобода, Н.С., 2005. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях). К.: КНТ. 188 с.
- Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики. 2000. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/371-2015%D1%80>
- Електронний атлас України. 2000. Інститут географії НАН України. Інтелектуальні Системи ГЕО.
- Зайцев, Ю.П., Александров, Б.Г. и др. 2006. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / Отв. ред. Ю.П. Зайцев, Б.Г. Александров. К.: Наукова Думка. С. 132-136.
- Иванов, В.А., Миньковская, Р.Я. 2008. Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Часть I. Севастополь: Морський гідрофізичний інститут НАН України. 446 с.
- Лобода, Н.С. 2011. Влияние изменений климата на водные ресурсы Украины (моделирование и прогнозы по данным климатических сценариев). Глобальные и региональные изменения климата / под ред. Шестопалова В.М., Логинова В.Ф., Осадчего В.И. и др. К.: Ніка-Центр. С. 340-352.
- Лобода, Н.С. 2005. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния. Од. держ. еколог. ун-т. Одеса: Екологія. 208 с.
- Лобода, Н.С., Гопченко, Є.Д. та ін. 2016. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману / За ред. Н.С. Лободи, Є.Д. Гопченка. Од. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС. 332 с.
- Молдова. 2012. Определение гидрологических характеристик для условий республики Молдова. CP D.01.05-2012. 180 с.
- ОДЕКУ. 2016. Науково-дослідні роботи з гідрологічного, гідрохімічного, гідробіологічного та медико-біологічного обстеження стану Куяльницького лиману та морської води з Одеської затоки (гідрологічне обстеження) на 2016 рік. Звіт з НДР заключний (наук. кер. Н.С. Лобода). База даних УкрНТЕІ, бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. ДРН№0116U007903, 2016. 263 с.
- Програма моніторингу стану Куяльницького лиману у 2015 році. 2015. Затверджена наказом директора Департаменту екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації № 17 від 25.02.2015 р.
- Регіональна програма збереження та відновлення водних ресурсів у басейні Куяльницького лиману на 2012-2016 роки. 2011. Затверджена рішенням Одеської обласної ради № 270-VI від 28.10.2011 р. (з усіма змінами та доповненнями).
- Розенгургт, М.Ш. 1974. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов. К.: Наукова думка. 224 с.
- Сайт проекту ENSEMBLES. 2016. URL: <http://ensemblesrt3.dmi.dk>
- Степаненко, С.М., Польовий, А.М., Лобода, Н.С. та ін. 2015. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / За ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса: ТЕС, 520 с.
- Топчієв, О.Г. та ін. 2012. Одеський регіон: передумови формування, структура та територіальна організація господарства: навч. посібник / За заг. ред. О.Г. Топчієва. Одеса: Астропринт. 184 с.
- Тучковенко, Ю.С., Гопченко, Е.Д. и др. 2012. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья / Под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко. Од. гос. еколог. ун-т. Одесса: ТЭС. 224 с.
- Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В. 2016. Результати чисельного моделювання внутрішньорічної мінливості характеристик гідрологічного режиму Куяльницького лиману. Український гідрометеорологічний журнал 17: 137-139.
- Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Лобода, Н.С. 2017. Результати чисельного

модельовання внутрішньорічної мінливості гідрологічних характеристик Куяльницького лиману за різних обсягів стоку річки Великий Куяльник. *Український гідрометеорологічний журнал* 20: 105-119.

Delft3D-FLOW. 2016. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments (посібник користувача гідродинамічної моделі Delft3D-FLOW). *Delta res systems. Delft, The Netherlands*. URL: [http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW\\_User\\_Manual.pdf](http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf)

Delft3D-FLOW. 2018. Вихідний код. *Співка користувачів відкритого програмного забезпечення Delft3D*. Дата оновлення: 13.09.2017 р. URL: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/source-code>

Gopchenko, E.D., Loboda, N.S. 2000. An evaluation of possible changes in the water resources of Ukraine under global warming conditions. *Hydrobiological Journal* 37(5): 105-117.

Loboda, N. S., Phan Van Chinnh. 2004. Statistical modelling and estimating the irrigation and man-made effect on annual runoff and water resources. *IAHS Publication in the IAHS Series of Proceedings and Reports* 289, p. 215-218.

Loboda, N., Bozhok, Y. 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): 1-6.

Loboda, N.S., Gryb, O.M. 2017. Hydroecological Problems of the Kuyalnyk Liman and Ways of Their Solution. *Hydrobiological Journal* 53(6): 87-95.

Millero, Frank J., Poisson, Alain, Chen Chen Tung, Bradshaw, Alvin L., Schleicher, K. 1981. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater, 1980. *Unesco technical papers in marine science* 38. 192 p.

Wörner, V., Hesse, C., Stefanova, A., Krysanova, V. 2012. Evaluation of climate scenarios for the lagoons. *Potsdam Institute for Climate Impact Research*. 40 p.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ПРОБЛЕМИ ГІДРОЛОГІЇ, ГІДРОХІМІЇ, ГІДРОЕКОЛОГІЇ**

Підп. до друку 21.11.2019. Формат 60x84/8. Папір офсетний. Друк офсетний.  
Умовн. друк. арк. 38,36. Зам. №19.

Український гідрометеорологічний інститут.  
03028, Київ-28, пр-т Науки, 37, т. (044) 525-12-50, 525-86-53

Видавництво «Ніка-Центр». 03142, Київ, вул. Кржижановського, 4  
т./ф. (044) 39-011-39; e-mail:psyhea9@gmail.com  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції ДК №5368 від 27.06.2017

Видання здійснено за участі ТОВ «Консент»  
Віддруковано у ТОВ «Видавництво «Ніка-Центр»

