

УДК 551.467

## ЛЬОДОВІ ЯВИЩА В ЧОРНОМУ І АЗОВСЬКОМУ МОРЯХ ТА ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Р. В. Гаврилюк, Н. М. Ювченко

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, RAISAGAVR@gmail.com

Льодовий покрив є одним з найбільш важливих факторів, який обумовлює стан поверхні моря. Дослідження і прогнозування його параметрів представляє не тільки науковий, а і значний практичний інтерес для морських галузей господарства. Навіть на частково замерзаючих морях – Чорному і Азовському, льодова обстановка буває доволі складною і потребує використання криголамів. Урахування фактичних і прогностичних льодових умов суттєво зменшує ризик проходження суден в льодах і оптимізує використання криголамів. Сучасні глобальні кліматичні зміни відобразились на змінах характерних показників льодового режиму в північно-західній частині Чорного моря і в Азовському морі. Дослідження показали, що за останні 30 років кількість м'яких зим збільшилась на 15%, а суворих – зменшилась на 19%. Скоротилась також тривалість льодового періоду – на декаду в Азовському морі і на місяць в Чорному морі. Це визначає необхідність перевірки методів прогнозу льодових явищ. На теперішній час в практиці гідрометеорологічного обслуговування використовують методи прогнозу льодових явищ, які розроблені у 80-х роках ХХ-го століття і які не враховують кліматичні зміни, що відбулись за останні роки. Основним недоліком емпірико-статистичних методів є той факт, що статистичні залежності мають обмеження щодо строку придатності.

Мета роботи полягала в оцінці змін льодових умов в Чорному і Азовському морях за останні 20 років і перевірці методу прогнозу дат появи льоду і дат очищення від льоду. Аналіз показав, що за досліджуваний період поява льоду настає пізніше, а очищення від льоду відбувається раніше, в порівнянні з середніми багаторічними датами. Перевірка методу прогнозу вказаних дат, який зараз застосовується, показала незадовільні результати, які не відповідають потребам практики. На основі регресійного аналізу запропоновано нові модифіковані рівняння для прогнозу дат появи льоду і дат очищення від льоду в північно-західній частині Чорного моря і в Азовському морі. Забезпеченість прогнозів за модифікованими рівняннями склала 70-94%, отже, прогностичні рівняння можуть бути рекомендовані для практичного використання.

**Ключові слова:** Чорне море; Азовське море; льодові умови; кліматичні зміни; статистичні методи прогнозу льодових явищ.

### 1. ВСТУП

Льодовий покрив є одним з найбільш важливих факторів, який визначає стан поверхні моря. Дослідження та прогнозування його параметрів представляє не тільки науковий, але й великий практичний інтерес для морських галузей господарства. Навіть на частково замерзаючих морях – Чорному та Азовському, льодова обстановка буває доволі складною та потребує використання криголомів. Урахування фактичних та прогностичних льодових умов суттєво зменшує ризик плавання суден в льодах та оптимізує використання криголомів.

Сучасні глобальні кліматичні зміни відобразились й на змінах характерних показників льодового режиму в північно-західній частині Чор-

ного моря та в Азовському морі. Дослідження багаторічної мінливості льодового режиму показали, що за останні 30 років в обох морях повторюваність м'яких зим збільшилась майже на 15%. Повторюваність помірних зим в Чорному морі зменшилась на 6%, а в Азовському – збільшилась на 4%. Найбільші зміни відбулись у повторюваності суворих зим – у Чорному морі вона скоротилась на 9%, а в Азовському на 19%. Відбулись зміни й в строках появи льоду та очищення моря від льоду. На Азовському морі строки появи льоду настають пізніше на 4-7 діб, а очищення від льоду відбувається раніше на 4-17 діб. У північно-західній частині Чорного моря льодоутворення настає пізніше на 2-3 тижні, а очищення від льоду відбувається на 1-2 тижні раніше в порівнянні з попередніми

роками. Зменшилась також тривалість льодового періоду – в Азовському морі на декаду, а в Чорному морі – приблизно на місяць [1,2].

Наведені результати свідчать про суттєві кліматичні зміни льодового режиму в Чорному і Азовському морях за останні роки, причинами яких є зміни макро-циркуляційних атмосферних процесів і зростання температури повітря, особливо помітне в зимовий період. У науковій літературі зміни льодових умов на морях пояснюються впливом різних форм циркуляції атмосфери (W, E і C форм Вангенгейма-Гірса для Євро-Атлантичного сектору) [3]. В роботі [4] показано, що, починаючи з 1991 року, ми живемо в умовах W+E епохи, яка є найбільш м'якою з усіх епох в плані льодових умов на всіх європейських морях, включно з Чорним і Азовським морями.

Виявлено також взаємозалежності між льодовими умовами в Чорному морі і змінами індексів Північно-Атлантичного коливання (ПАК), які відображають кількість, траєкторії і інтенсивність атлантичних циклонів, що визначають погодні умови в Європі [5, 6]. При позитивній фазі ПАК траєкторії переносу повітряних мас і циклонів проходять над північною Європою, а над Середземним і Чорним морями переважає антициклонічна погода. Над північно-західною частиною Чорного моря спостерігаються позитивні аномалії температури повітря і легкі льодові умови. У зв'язку з домінуванням позитивної фази ПАК, який спостерігався в останні десятиріччя минулого століття, структура зимового потепління в Східній Європі подібна зі структурою кореляцій індексу ПАК з температурою повітря, отже, і з льодовими умовами в Чорному морі.

На теперішній час у прогностичній практиці рекомендовано використовувати методи прогнозу льодових умов, які розроблені в 80-х роках ХХ-го століття [7]. У той же час, наукові дослідження, в яких аналізуються результати перевірки емпірико-статистичних схем прогнозу льодових явищ в морі, показують значне зниження виправданості цих прогнозів в останні роки [8, 9]. Відомо, що основним недоліком емпірико-статистичних методів є той факт, що статистичні залежності мають обмеження щодо «строку придатності», тобто прогностичні рівняння потребують оновлення та перерахунку з певною періодичністю. При цьому можлива заміна не тільки коефіцієнтів у прогностичних рівняннях, а й самих провісників [4]. Розроблені в минулому методи прогнозування характеристик льодового режиму в північно-західній частині Чорного

моря та в Азовському морі не ураховують кліматичні зміни, які відбулись в останні роки, тому потребують перевірки, переосмислення та суттєвого вдосконалення.

*Мета роботи* полягає в перевірці і модифікації емпірико-статистичного методу прогнозу дати появи льоду і очищення від льоду в Чорному і Азовському морях на матеріалах спостережень останніх років.

## 2. ОГЛЯД МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЛЬДОВИХ ЯВИЩ В ЧОРНОМУ І АЗОВСЬКОМУ МОРЯХ

Згідно з [10], морські прогнози, в залежності від завчасності, поділяються на короткострокові, завчасність яких складає від декількох годин до трьох діб, прогнози малої завчасності – від 10-15 діб до місяця, і довгострокові – із завчасністю більше місяця. В науковій та методичній літературі докладно представлено методи прогнозування характеристик льодового режиму моря різної завчасності, які розроблені переважно в 80-х роках минулого століття [4, 7], а також деякі нові методи [8, 9]. Розглянемо фізичні основи і деякі методи короткострокових прогнозів льодових явищ для Чорного і Азовського морів.

Короткострокові прогнози льодових фаз – дати появи льоду, замерзання моря, руйнування льоду та очищення моря від льоду – складаються на основі знання про витрати або надходження тепла через поверхню моря, тепловміст діючого шару води, товщин льоду, а також динамічні фактори – вітер, течії та хвилювання моря. Урахування всіх факторів, які обумовлюють появу льоду та замерзання моря, при складанні прогнозів навіть з невеликою завчасністю, практично неможливе. Тому, частіш за все, визначають головні фактори і обмежуються їх урахуванням.

Процес льодоутворення починається з того моменту, коли вода в результаті охолодження досягає температури кристалізації льоду. Цей момент настає тим скоріше, чим більша тепловіддача води (визначається, перш за все, температурою повітряної маси, яка знаходиться над акваторією моря) та чим менше теплонакопичення за попередній весняно-літній період (визначається температурою води). У мілководних районах моря за період, який передують льодоутворенню, конвективне перемішування досягає дна, перенос тепла течіями незначний, роль хвилювання та коливань рівня не велика. Такі умови є характерними для прибережних районів, закритих бухт та заток, де, як правило, розташовані морські порти. Тому короткострокові про-

гнози появи льоду для них представляють особливу значимість, так як замерзання акваторій портів обмежує строки навігації.

Для прибережних районів прогноз появи льоду базується на урахуванні теплозапасу за попередній період та інтенсивності охолодження моря. У багатьох емпіричних дослідженнях показано, що в холодну частину року втрати тепла через поверхню моря залежать від температури повітря. Тому в прогностичних рівняннях в якості аргументу вводиться сума негативних середніх добових температур повітря – сума градусоднів морозу.

Між сумою градусоднів морозу, яка необхідна для появи льоду, та температурою поверхневого шару моря, в момент переходу температури повітря через нуль °С, існує тісна взаємозалежність. Чим вища температура води, тим більша повинна бути сума градусоднів морозу для появи льоду. Такі залежності у вигляді рівнянь регресії отримано на основі натурних даних для більшості прибережних районів моря. Наприклад, для деяких районів прибережної зони Чорного та Азовського морів такі рівняння опубліковані в [7] і мають вигляд:

$$\text{Одеса: } \sum(-t_a) = 10.7t_{w^0} + 7.0, \quad (1)$$

$$\text{Миколаїв: } \sum(-t_a) = 4.0t_{w^0} + 10.0, \quad (2)$$

$$\text{Очаків: } \sum(-t_a) = 5.5t_{w^0} + 1.4, \quad (3)$$

$$\text{Маріуполь: } \sum(-t_a) = 8.8t_{w^0} - 4.8, \quad (4)$$

де  $\sum(-t_a)$  – сума градусоднів морозу;

$\sum t_{w^0}$  – температура поверхневого шару моря в момент переходу температури повітря через нуль °С.

Наведені залежності використовують для прогнозу дати появи льоду, тобто, обчислюють праву частину рівняння, що дорівнює кількісному значенню величини  $\sum(-t_a)$ , а за прогнозом температури повітря визначають, коли ця величина зрівняється з необхідною для появи льоду.

Строки руйнування льодового покриву та очищення моря від льоду залежать від його стану на початок танення, від висоти снігу на льодовій поверхні, метеорологічних умов та динамічних факторів. Найбільш важливими з них є товщина льоду, снігу та тепловий баланс поверхні льоду. З багатьох спостережень відомо, що товщина льоду значно змінюється в просторі і, при обмеженій кількості фактичних вимірювань, важко отримати правильну оцінку середньої

товщини льоду. Тому за показник середньої товщини льоду приймається величина суми негативних температур повітря з початку льодоутворення.

При складанні прогнозів весняних льодових явищ необхідно встановити момент, коли лід досягає максимальній товщини і починається його танення. За початок танення льоду приймається момент стійкого переходу температури повітря через нуль градусів в бік позитивних значень в 13 годину дня. Між цим моментом та датою досягнення товщиною льоду максимального значення існує тісна залежність.

Існування такої залежності пояснюється тим, що зміна знаку суми потоків тепла через поверхню льодового покриву з негативного на позитивний відбувається при позитивних денних температурах повітря, навіть якщо середні добові температури повітря залишаються негативними. Денні позитивні температури повітря призводять до того, що поверхня льоду стає розпушеною, а ямки заповнюються талою водою. Негативні нічні температури призводять до утворення тонкої льодової корки, яка створює так званий парниковий ефект. Цей ефект полягає в тому, що льодова корка пропускає короткохвильову радіацію і не пропускає довгохвильову, іншими словами, температура води під льодом поступово підвищується, що обумовлює початок танення.

У [7] наведено рівняння, яке дозволяє прогнозувати дату очищення моря від льоду:

$$\Delta \sum(+t_a) = 0.08 \Delta \sum(-t_a) \quad (5)$$

де  $\Delta \sum(+t_a)$  – зміни сум позитивних значень температури повітря від одного дня до другого з моменту переходу через нуль °С ;

$\Delta \sum(-t_a)$  – зміни сум негативних значень температури повітря від одного дня до другого за весь період.

Це рівняння дозволяє по сумі градусоднів морозу за зиму визначити суму градусів тепла, необхідну для повного руйнування льоду без урахування даних про його товщину. Але також вказується, що для окремих пунктів коефіцієнти пропорційності треба перераховувати.

З аналізу цих методів можна зробити наступні висновки. Для прогнозу дати появи льоду необхідно використовувати метеорологічний прогноз, на основі якого постійно розраховувати суму градусоднів морозу. Так як метеорологічний прогноз має певну похибку, це впливатиме на похибку льодового прогнозу. Що стосується прогнозу дати очищення моря від льоду, то рів-

няння потрібно уточнювати, що передбачає додаткові дослідження.

У [4, 7] представлено також метод прогнозу дат появи льоду і дати очищення від льоду для Чорного і Азовського морів з більшою завчасністю - від 10 до 15 діб. Основна концепція методу полягає в наступному. По прогнозу погоди на 7 діб можна визначити дату переходу температури повітря через нуль °С для відповідного порту. Вважається, що температура води в день переходу температури повітря через нуль °С в значній мірі визначається температурою повітря за деякий інтервал часу, що передує цій даті. Оптимальний інтервал часу визначено на основі кореляційного аналізу і становить для Чорного і Азовського морів 20 діб. Осереднена температура повітря за 20 добовий попередній інтервал є характеристикою тепловмісту води до початку льодоутворення. Таким чином, по осередненій за такий інтервал часу температурі повітря і даті переходу її через нуль градусів отримано прогностичні рівняння для різних портів. Зокрема, для портів Чорного моря (Одеса і Миколаїв) і Азовського моря (Маріуполь) рівняння є такими:

$$\text{Одеса: } D_{nl} = 0.92T_{20} + 0.9DT_{a(0)} + 33, \quad (6)$$

$$\text{Миколаїв: } D_{nl} = 0.62T_{20} + 0.74DT_{a(0)} + 35, \quad (7)$$

$$\text{Маріуполь: } D_{nl} = 0.66T_{20} + 0.93DT_{a(0)} + 40, \quad (8)$$

де  $D_{nl}$  – дата появи льоду у відхиленнях від 1 вересня;

$T_{20}$  – осереднена за попередні 20 діб до дати переходу через нуль °С температура повітря;

$DT_{a(0)}$  – дата переходу температури повітря через нуль градусів у відхиленнях від 1 вересня.

Для прогнозу весняних льодових явищ (дати очищення моря від льоду) в якості провісників приймається максимальна товщина льоду за зимовий період і дата стійкого переходу температури повітря через нуль °С в 15 годин за Московським часом. Прогностичні рівняння є такими:

$$\text{Одеса: } D_{oc} = 0.93H_{max} + 0.18DT_0 + 122, \quad (9)$$

$$\text{Миколаїв: } D_{oc} = 0.47H_{max} + 0.35DT_0 + 119, \quad (10)$$

$$\text{Маріуполь: } D_{oc} = 1.06H_{max} + 0.03DT_0 + 164, \quad (11)$$

де  $D_{oc}$  – дати очищення моря від льоду у відхиленнях від 1 вересня;

$DT_0$  – дата стійкого переходу температури повітря через нуль °С в 15 годин за Московським часом;

$H_{max}$  – максимальна товщина льоду за зимовий період, в см.

Таким чином, у наведеному методі прогностична метеорологічна інформація не використовується, а тільки фактичні дані, що повинні призводити до зменшення помилки прогнозу. Інформацію, необхідну для виконання розрахунків за рівняннями регресії, можна отримати з даних стандартних гідрометеорологічних спостережень, які містяться в стандартних таблицях ТГМ. Оскільки прогностичні рівняння отримані на матеріалах спостережень минулого століття і не враховують кліматичні зміни льодових умов в Чорному і Азовському морях в останні роки, необхідна їх перевірка і визначення можливості використання методу в теперішній час і в майбутньому.

### 3. ОПИС ОБ'ЄКТУ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження являються деякі характеристики льодового режиму Чорного і Азовського морів – дати першої появи льоду і дати очищення від льоду. Дослідження полягає у перевірці методу прогнозування цих характеристик [4, 7] за матеріалами спостережень останніх років. Для перевірки методу і виконання розрахунків за прогностичними рівняннями регресії використовувались дані стандартних спостережень, які містяться в таблицях ТГМ-1 і ТГМ-2: дати першої появи льоду і дати очищення від льоду, максимальна товщина льоду за зимовий період, температура повітря і дати стійкого переходу її в бік позитивних і негативних значень навесні і восени. Перевірка виконувалась для наступних рядів спостережень: для станції Миколаїв – 1990-2016 рр., для станції Одеса -1984-2014 рр., для станції Маріуполь – 1985-1988 рр. і 1996-2017 рр. Тривалість рядів спостережень щодо дати появи льоду склала для станції Одеса 13 років, для станції Миколаїв – 16 років, а для станції Маріуполь – 24 роки. По даті очищення від льоду для станцій Миколаїв і Маріуполь тривалість рядів спостережень склала 21 рік. Для станції Одеса в таблицях за деякі роки були відсутні дані щодо товщини льоду, що суттєво скоротило довжину ряду і зумовило неможливість перевірки. Після перевірки прогнозів за рівняннями (6-11) і їх аналізу, рівняння регресії

перераховувались і виконувались прогностичні розрахунки дат появи льоду і дат очищення від льоду [11].

#### 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Перш за все, за даними спостережень за досліджуваний період розраховувались статистичні характеристики мінливості дат появи льоду і дат очищення від льоду, які порівнювались з нормами з [1, 2]. Дані спостережень для станції Миколаїв відображають зміни льодових умов в Чорному морі, а дані для станції Маріуполь – в Азовському. В таблицях 1 і 2 представлено результати розрахунків статистичних характеристик мінливості дат появи і дат очищення від льоду для станції Миколаїв і Маріуполь відповідно з [11].

За досліджуваний період на станції Миколаїв лід з'являється в середньому 22 грудня, в той час, як за нормою – 16 грудня, тобто на 6 днів пізніше. Очищення від льоду за нормою відбувається 12 березня, а за досліджуваний період – 1 березня, що на 12 днів раніше. Розмах коливань дат появи льоду становить 68 днів, а дат очищення від льоду – 63 дні. Тривалість льодового періоду за досліджуваний період склала 68 днів, а за нормою – 86 днів, тобто зменшення становить 18 днів.

Середня дата появи льоду на станції Маріуполь за розрахунковий період настає на два дні пізніше середньої дати за багаторічними даними. Рання дата появи льоду спостерігалася пізніше на 14 днів, а сама пізня дата – раніше на 12 днів. Середня дата очищення моря від льоду за останні 20 років змістилися на 8 днів раніше за норму. Сама рання дата спостерігалася на місяць раніше, а пізня дата – на 13 днів раніше норми. Тривалість льодового періоду на станції Маріуполь за досліджуваний період склала 78 днів, а за нормою – 88 днів, тобто зменшення становить 10 днів.

Ці результати свідчать про збереження тенденції полегшення льодових умов в Чорному і Азовському морях в останні роки.

##### 4.1 Прогнози дати появи льоду

Перевірка полягала в складанні прогнозів дати появи льоду на станціях Чорного і Азовського морів за рівняннями (6)-(8) за матеріалами спостережень за досліджуваний період. Для цього з таблиць ТГМ визначалась дата стійкого переходу температури повітря через нуль градусів Це-

льсію у відхиленнях від 1 вересня і від цієї дати розраховувалась осереднена за попередні 20 днів температура повітря. За прогностичними рівняннями виконувались розрахунки дат появи льоду для станцій Одеса, Миколаїв і Маріуполь, результати яких представлено в таблицях 3,4 і 5 відповідно. Допустима помилка при оцінках прогнозів дат осінніх і весняних льодових явищ, згідно з [10], залежить від завчасності прогнозів і приймалася рівною 5 або 6 днів. Знак мінус перед помилкою дат появи льоду означає, що за прогнозом дата настає пізніше фактичної дати.

Для станції Одеса проміжок часу між датою переходу температури повітря через нуль °С і датою появи льоду в середньому дорівнює 17 днів, але ж за досліджуваний період змінюється в широкому діапазоні – від 5 до 43 днів. При цьому чим вища температура повітря за попередні 20 днів, тим більше цей проміжок. Згідно з розрахунками за рівнянням (6), помилки прогнозів знаходяться в межах від 4 до 17 днів, і в більшості прогностичних випадків дата появи льоду настає пізніше фактичної дати. При допустимій похибці 5 днів лише в одному випадку прогноз можна вважати виправданим, тобто забезпеченість складає 8%. Забезпеченість кліматичного та інерційного прогнозів за цим рядом склала 23%.

За фактичними даними рівняння було перераховано є таким:

$$D_{пл} = -0.26T_{20} + 0.638DT_{a(0)} + 62.438. \quad (12)$$

Множинний коефіцієнт рівняння дорівнює  $R=0,885$  і є значущим на рівні не нижче 95%. Якщо порівнювати рівняння (6) і (12), можна бачити, що вагові коефіцієнти провісників значно змінилися. Результати розрахунків за модифікованим рівнянням, які представлені в таблиці 3, свідчать про зниження помилки прогнозів, але ж в чотирьох випадках помилки є достатньо великими, що може бути обумовлено недостатньою довжиною ряду, на якому виконано розрахунки. Забезпеченість розрахунків за новим рівнянням склала 70%, що не є дуже великою, але ж значно вищою ніж інерційний і кліматичний прогнози.

Аналогічні розрахунки виконано для перевірки прогнозу дати появи льоду на станції Миколаїв за рівнянням (7), результати яких представлено в таблиці 4.

**Таблиця 1** - Статистичні характеристики мінливості дат появи і очищення від льоду на станції Миколаїв за досліджуваний період [11] і за нормою [1]

Льодова фаза	Середня дата	Стандартне відхилення (дні)	Пізня дата	Рання дата	Розмах (дні)
Дата очищення від льоду за досліджуваний період	1.03	17	3.04 1996 р.	31.01. 2009 р.	63
Дата очищення від льоду за нормою	12.03	-	17.04	23.01	84
Дата появи льоду за досліджуваний період	22.12	16	31.01. 2005 р.	24.11. 1998 р.	68
Дата появи льоду за нормою	16.12	-	3.02	9.11	80

**Таблиця 2** - Статистичні характеристики мінливості дат появи і очищення від льоду на ст. Маріуполь за досліджуваний період [11] і за нормою [2]

Льодова фаза	Середня дата	Стандартне відхилення (дні)	Пізня дата	Рання дата	Розмах (дні)
Дата очищення від льоду за досліджуваний період	6.03	19	11.04. 2012 р.	1.02 2002 р.	70
Дата очищення від льоду за нормою	14.03	-	24.04	1.03	54
Дата появи льоду за досліджуваний період	18.12	19	24.01. 2007 р.	22.11. 2016 р.	63
Дата появи льоду за нормою	16.12	-	5.02	8.11	89

**Таблиця 3** – Вихідні дані, результати розрахунків дати появи льоду за рівняннями (6) і (12) і помилки прогнозів для станції Одеса [11]

№	Сезон, роки	Фактична дата появи льоду у відхиленнях від 1.09	Дата переходу температури повітря через 0°C у відхиленнях від 1.09	Середня температура повітря за попередні 20 днів, (°C)	Прогнози дати появи льоду за рівняннями (6) – а і (12) – б		Помилки, прогнозів (дні) за рівняннями (6) – а і (12) – б	
					а	б	а	б
1	84-85	161	151	-4.1	165	160	4	1
2	85-86	161	153	1.8	172	160	-11	1
3	86-87	130	124	-1.2	143	142	-13	-12
4	97-98	150	145	3.5	167	154	-17	-4
5	98-99	95	75	9.9	110	108	-15	-13
6	01-02	137	94	4.1	121	121	16	16
7	02-03	112	92	9.2	124	119	-12	-7
8	05-06	143	128	2.3	150	143	-7	0
9	07-08	127	106	5.0	133	129	-6	-2
10	09-10	146	104	6.8	133	127	13	19
11	10-11	152	145	2.0	165	154	-13	-2
12	11-12	152	138	4.0	161	149	-8	3
13	13-14	153	143	4.3	165	152	-12	1

**Таблиця 4** – Вихідні дані, результати розрахунків дати появи льоду за рівняннями (7) і (13) і помилки прогнозів для станції Миколаїв [11]

№	Сезон, роки	Фактична дата появи льоду у відхиленнях від 1.09	Дата переходу температури повітря через 0° С у відхиленнях від 1.09	Середня температура повітря за попередні 20 днів, (° С)	Прогнози дати появи льоду за рівняннями (7) – а і (13) – б		Помилки, прогнозів (дні) за рівняннями (7) – а і (13) – б	
					а	б	а	б
1	90-91	139	136	2.8	137	142	2	-3
2	94-95	110	107	-0.7	114	111	-4	-1
3	96-97	114	111	3.2	119	118	-5	-4
4	97-98	108	106	0.7	114	111	-6	-3
5	98-99	85	75	4.4	92	84	-7	1
6	99-00	114	112	3.6	120	119	-6	-5
7	00-01	116	111	2.1	118	117	-2	-1
8	01-02	97	93	2.3	105	100	-8	-3
9	02-03	99	91	6.4	106	101	-7	-2
10	03-04	102	93	3.9	106	101	-4	1
11	04-05	153	145	1.9	143	150	10	3
12	05-06	112	101	3.2	112	108	0	4
13	06-07	118	111	4.3	120	118	-2	0
14	07-08	124	107	2.2	114	113	10	11
15	08-09	114	103	5.2	114	111	0	3
16	09-10	108	101	5.2	113	110	-5	-2

Проміжок часу між датою переходу температури повітря через нуль °С і датою появи льоду на станції Миколаїв в середньому складає 7 днів і змінюється протягом досліджуваного періоду від 2 до 17 днів. Помилки прогнозів значно менші, ніж для станції Одеса. Максимальна помилка досягає 10 днів і за прогнозом дата появи льоду в більшості випадків є пізнішою за фактичну дату. Виправданість прогнозів за цим рівнянням при допустимій похибці 5 днів склала 56%, що є незадовільним. Забезпеченість розрахунків інерційним методом склала 27%, а кліматичним – 50%. Тому рівняння було переховано і має вигляд

$$D_{nl} = -0.654T_{20} + 0.963DT_{a(0)} + 8.79 \quad (13)$$

Множинний коефіцієнт кореляції цього рівняння дорівнює  $R = 0,971$  і є значущим на рівні не нижче 99%. Результати розрахунків за модифікованим рівнянням, представлені в таблиці 4, свідчать про зниження помилок. При допустимій похибці 5 днів забезпеченість прогнозів за отриманим рівнянням склала 94%.

За рівнянням (8) розраховувались прогнози дат появи льоду в Азовському морі за даними спостережень на станції Маріуполь для ряду довжиною 24 роки (1985-1988 рр., 1996-

2017 рр.). У таблицях ТГМ за деякі роки данні щодо температури повітря були пропущенні, тому розрахунки прогнозів неможливо було зробити. Результати перевірки представлені в таблиці 5.

Проміжок часу між датою переходу температури повітря через нуль °С і датою появи льоду в середньому дорівнює 5 днів, що декілька менше, ніж на станції Миколаїв. При перевірці рівняння помилки в розрахунках склали від 19 до 36 днів, тобто забезпеченість дорівнює 0%. Забезпеченість розрахунків за інерційним методом склала 25%, а за кліматичним – дорівнює 29%. Після перерахування рівняння має вигляд

$$D_{nl} = -0.65T_{20} + 1.0DT_{a(0)} + 4.1 \quad (14)$$

Якщо порівнювати рівняння (8) і (14), то можна побачити, що вагові коефіцієнти провісників майже не змінились, але вільний член в перерахованому рівнянні зменшився на порядок. Множинний коефіцієнт кореляції модифікованого рівняння дорівнює 0,98 і є значущим на рівні не нижче 99%. Забезпеченість прогнозів за новим рівнянням при допустимій похибці 5 днів дорівнює 92%.

**Таблиця 5** - Вихідні дані, результати розрахунків дати появи льоду і помилки прогнозів за рівняннями (8) і (14) на станції Маріуполь [11]

№	Сезон, роки	Фактична дата появи льоду у відхиленнях від 1.09	Дата переходу температури повітря через 0°С у відхиленнях від 1.09	Середня температура повітря за попередні 20 днів, (°С)	Прогнози дати появи льоду за рівняннями (8) – а і (14) – б		Помилки, прогнозів (дні) за рівняннями (8) – а і (14) – б	
					а	б	а	б
1	85-86	86	78	5.43	116	86	-29	0
2	86-87	90	84	1.87	119	89	-29	1
3	87-88	99	95	2.78	130	101	-31	-2
4	96-97	116	112	2.53	146	118	-30	-2
5	97-98	109	98	2.32	133	104	-24	5
6	98-99	90	80	6.62	119	88	-29	2
7	99-00	87	78	3.56	115	84	-28	3
8	00-01	114	111	1.26	144	116	-30	-2
9	01-02	97	93	2.70	128	99	-31	-2
10	02-03	94	91	5.61	128	99	-34	-5
11	03-04	167	165	0.71	194	170	-29	-3
12	04-05	107	105	0.82	138	110	-31	-3
13	05-06	116	111	2.51	145	117	-29	-1
14	06-07	176	174	0.54	202	178	-26	-2
15	07-08	109	106	1.30	139	111	-30	-2
16	08-09	110	102	4.31	138	109	-28	1
17	09-10	109	104	4.19	139	111	-30	-2
18	10-11	135	127	1.96	159	132	-20	3
19	11-12	144	139	1.10	170	144	-26	0
20	12-13	108	103	4.16	138	110	-30	-2
21	13-14	103	99	2.59	134	105	-31	-2
22	14-15	91	83	3.59	120	89	-29	2
23	15-16	134	120	2.48	153	126	-19	8
24	16-17	83	82	4.56	119	89	-36	-6

#### 4.2 Прогнози дат очищення моря від льоду

Розрахунки дат очищення від льоду на станціях Чорного і Азовського морів згідно з [7] виконуються за рівняннями (9)-(11). Данні таблиць ТГМ-2 для станції Одеса, показують, що продовж зимового періоду відбувається неодноразова поява і танення льоду без створення припаю, тому спостереження за товщиною льоду не проводяться зовсім або проводяться епізодично і такі данні в таблицях відсутні. Крім того, для станції Одеса найбільш частіше лід з'являється в результаті його приносу з Дніпровського лиману, а очищення затоки від льоду відбувається в результаті його виносу у відкрите море під дією вітру. Тому виконати розрахунки дати очищення за рівнянням (9) неможливо. У статті наведено результати перевірки розрахунків дат очищення від льоду для станцій Миколаїв і Маріуполь.

Для розрахунків прогнозів дат очищення від льоду, з таблиць ТГМ визначалась дата стійкого переходу температури повітря через нуль градусів Цельсієм в 15 годин Московського часу, а також максимальна за зимовий період товщина льоду. Вихідні дані для перевірки результатів розрахунків і помилки прогнозів за рівнянням (10) для станції Миколаїв представлено таблиці 6.

Проміжок часу між датою стійкого переходу температури повітря через нуль °С за даними спостережень в середньому дорівнює 11 днів і перевищує проміжок часу для дати появи льоду. Але міжрічна мінливість цієї характеристики досить значна – від 2-х до 23 днів. Мінливість другого провісника – максимальної за зимовий період товщини льоду, також значна – від 3 до 37 см. Розрахунки за рівнянням показують, що, при допустимій помилці 5 днів, виправданість прогнозів складає 33%, тобто є незадовільною.



**Таблиця 6** – Вихідні дані, результати розрахунків дати очищення від льоду і помилки прогнозів за рівняннями (10) і (15) для станції Миколаїв [11]

№	Сезон, роки	Фактична дата очищення від льоду у відхиленнях від 1.09	Дата переходу температури повітря через 0° С у відхиленнях від 1.09	Максимальна товщина льоду за зимовий період, см	Прогнози дати очищення від льоду за рівняннями (10) – а і (15) – б		Помилки, прогнозів (дні) за рівняннями (10) – а і (15) – б	
					а	б	а	б
1	95-96	216	201	28	202	207	14	9
2	96-97	178	175	32	195	186	-17	-8
3	97-98	173	163	10	181	176	-8	-3
4	98-99	166	157	17	182	171	-16	-5
5	99-00	183	170	12	184	182	-1	1
6	00-01	184	161	3	177	174	7	10
7	01-02	164	143	26	181	160	-17	4
8	02-03	212	206	34	207	211	5	1
9	03-04	183	177	13	187	187	-4	-4
10	04-05	196	193	9	190	200	6	-4
11	05-06	203	191	17	194	199	9	4
12	06-07	185	172	5	181	183	4	2
13	07-08	180	173	16	187	184	-7	-4
14	08-09	153	136	16	174	154	-21	-1
15	09-10	198	194	32	202	201	-4	-3
16	10-11	198	192	27	199	199	-1	-1
17	11-12	206	194	37	204	201	2	5
18	12-13	159	138	15	174	156	-15	3
19	13-14	178	161	24	186	174	-8	4
20	14-15	178	176	17	189	186	-11	-8
21	15-16	174	163	20	185	176	-11	-2

Забезпеченість розрахунків за інерційним методом дорівнює 30%, а за кліматичним – 24%. Тому за вихідними даними рівняння було перераховано, і має вигляд

$$D_{оч} = 0.007H_{max} + 0.81DT_0 + 43.806. \quad (15)$$

Множинний коефіцієнт кореляції рівняння регресії  $R = 0,956$  є значущим на рівні не нижче 99%. Розрахунки за отриманим рівнянням і помилки прогнозів представлені в таблиці 6. Забезпеченість прогнозів за отриманим рівнянням склала 81% і значно перевищує забезпеченість кліматичного і інерційного прогнозів. Вагові коефіцієнти модифікованого рівняння (15) суттєво відрізняються від коефіцієнтів рівняння (10), а саме, підвищився внесок дати переходу температури повітря через нуль °С весною і значно зменшився вплив максимальної товщини льоду на дату очищення від льоду.

Вихідні дані для розрахунків дати очищення від льоду на станції Маріуполь за рівнянням (11) представлені в таблиці 7. Для Азовського моря проміжок часу між датою стійкого переходу

температури повітря через нуль °С за даними спостережень в середньому дорівнює 9 днів, що менше, ніж для станції Миколаїв в Чорному морі. Мінливість цієї характеристики знаходиться в межах від 1-го до 24-х днів. Максимальна за зиму товщина льоду змінюється за багаторічний період від 5 см до 68 см.

Забезпеченість розрахунків за цим рівнянням, при допустимій похибці 6 днів, складає 29%, що є незадовільним. Забезпеченість розрахунків за інерційним методом складає 10%, а за кліматичним – 29%. Після перерахування рівняння має вигляд

$$D_{оч} = 0.279H_{max} + 0.924DT_0 + 16.64. \quad (16)$$

Вагові коефіцієнти в новому рівнянні, порівняно зі старим, значно змінилися – у старому рівнянні внесок максимальної товщини льоду у три рази більший, ніж внесок цього параметру в новому рівнянні. Також значно змінилися вагові коефіцієнти, який урахує дату переходу температури через нуль °С, та вільний член. Для модифікованого рівняння коефіцієнт множинної

**Таблиця 7** – Вихідні дані, результати розрахунків дати очищення від льоду і помилки прогнозів за рівняннями (11) і (16) для станції Маріуполь [11]

№	Сезон, роки	Фактична дата очищення від льоду у відхиленнях від 1.09	Дата переходу температури повітря через 0°С у відхиленнях від 1.09	Максимальна товщина льоду за зимовий період, см	Прогнози дати очищення від льоду за рівняннями (11) – а і (16) – б		Помилки, прогнозів (дні) за рівняннями (11) – а і (16) – б	
					а	б	а	б
1	95-96	209	195	40	212	208	-3	1
2	96-97	187	180	38	210	194	-23	-7
3	97-98	208	201	29	201	210	7	-2
4	98-99	157	147	18	187	157	-30	0
5	99-00	185	161	30	185	174	0	11
6	00-01	188	180	12	182	186	6	2
7	01-02	154	144	37	208	160	-54	-6
8	02-03	206	185	49	221	201	-15	5
9	03-04	186	179	5	175	183	11	3
10	04-05	195	194	23	194	202	1	-7
11	05-06	206	193	45	217	208	-11	-2
12	06-07	189	181	5	175	185	14	4
13	07-08	179	173	34	205	186	26	-7
14	08-09	168	158	27	197	170	-29	-2
15	09-10	182	172	31	202	184	-20	-2
16	10-11	198	193	20	191	201	7	-3
17	11-12	224	194	68	242	215	-18	9
18	12-13	172	153	30	200	166	-28	6
19	13-14	189	182	22	193	191	-4	-2
20	14-15	180	172	10	180	178	0	2
21	15-16	156	150	21	191	161	-35	5

кореляції  $R = 0,95$  є значущим на рівні не нижче 99%. Результати розрахунків за новим рівнянням та похибки, в порівнянні з фактичними даними, представлені в таблиці 7. При допустимій похибці 6 днів, забезпеченість прогнозів за новим рівнянням складає 76%.

Таким чином, перевірка показала, що забезпеченість прогнозів льодових фаз на станціях Чорного і Азовського морів за старими рівняннями була незадовільною. Після перерахування отримано нові модифіковані прогностичні рівняння, результати розрахунків за якими виявились такими: забезпеченість прогнозів для дати появи льоду на станції Одеса – 70%, на станції Миколаїв – 94% і для станції Маріуполь – 92%; для дат очищення від льоду – для станції Миколаїв – 81%, а для станції Маріуполь – 76%.

Для оцінки методу, окрім забезпеченості, повинна визначатися і друга важлива величина, яка має назву ефективність. Ця величина показує вигреш, який дає розглянутий метод прогнозу в порівнянні з інерційним, або кліматичним методами.

Критерієм ефективності є величина  $S \cdot \sigma_u^{-1}$ , де  $S$  – середня квадратична похибка прогнозу, а  $\sigma_u$  – стандартне відхилення, які розраховуються за формулами:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (u - u_p)^2}{n - m}}, \quad (17)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum (u - \bar{u})^2}{n - 1}}, \quad (18)$$

де  $m$  – число ступенів свободи, яке дорівнює кількості постійних величин в рівнянні регресії,  $n$  – кількість членів ряду,  $u$ ,  $\bar{u}$ ,  $u_p$  – фактичні, середні і розрахункові значення відповідно.

Згідно з [7], для короткострокових і середньострокових прогнозів при різних значеннях довжини ряду  $n$ , критерії ефективності є такими:

$$S \cdot \sigma_u^{-1} \leq 0.57 \text{ при } n \leq 15;$$

**Таблиця 8** – Модифіковані прогностичні рівняння, коефіцієнти множинної регресії ( $R$ ), забезпеченість прогнозів (%), показники ефективності методу ( $S \cdot \sigma_u^{-1}$ ) прогнозу дат появи і очищення від льоду на станції Маріуполь, Миколаїв і Одеса

Станція, льодова фаза, довжина ряду ( $n$ )	Рівняння регресії	$R$	Забезп. прогн. (%)	$S \cdot \sigma_u^{-1}$	Забезпеченість клі- матичного (1) і іне- рційного (2) прогнозів (%)	
					1	2
Маріуполь, дата появи льоду, ( $n=24$ )	$D_{nl} = 0.65 \cdot T_a^{20} +$ $+1 \cdot DT_{a(0)} + 4.1$	0,98**	92	0,16	29	25
Маріуполь, дата очищення від льоду, ( $n=21$ )	$D_{oc} = 0.28 \cdot H_{max} +$ $+0.92 \cdot DT_{a(0)} + 16.64$	0,96**	76	0,32	29	10
Миколаїв, дата появи льоду, ( $n=16$ )	$D_{nl} = 0.65 \cdot T_a^{20} +$ $+0.96 \cdot DT_{a(0)} + 8.79$	0,97**	94	0,20	50	27
Миколаїв, дата очищення від льоду, ( $n=21$ )	$D_{oc} = 0.007 \cdot H_{max} +$ $+0.81 \cdot DT_{a(0)} + 43.81$	0,96**	81	0,31	24	30
Одеса, дата появи льоду, ( $n=13$ )	$D_{nl} = 0.26 \cdot T_a^{20} +$ $+0.64 \cdot DT_{a(0)} + 62.44$	0,89*	70	0,51	23	23

**Примітка:** \* і \*\* - значущість коефіцієнту кореляції  $R$  на рівні не нижче 95% і 99% відповідно

$$S \cdot \sigma_u^{-1} \leq 0.62 \text{ при } 15 < n \leq 25; \quad (19)$$

$$S \cdot \sigma_u^{-1} \leq 0.67 \text{ при } n > 25.$$

Для всіх перерахованих нами прогностичних рівнянь показники ефективності методу наведено в таблиці 8 з [11], де також представлені самі рівняння, забезпеченість прогнозів, множинні коефіцієнти кореляції і забезпеченість кліматичного та інерційного прогнозів. Як видно, показники ефективності для всіх рівнянь відповідають встановленим критеріям, а забезпеченість прогнозів значно перевищує забезпеченість кліматичного і інерційного прогнозів. Все це дозволяє зробити висновок про можливість використання перерахованих рівнянь для середньострокового прогнозу дат появи льоду і очищення від льоду для акваторій портів Чорного і Азовського морів в оперативній практиці.

## 5. ВИСНОВКИ

Аналіз матеріалів спостережень за характеристиками льодового режиму в Чорному морі показав, що на станції Миколаїв в останні десяти-

ліття лід з'являється на 6 днів пізніше, а очищення від льоду відбувається на 12 днів раніше, ніж за багаторічною нормою. Тривалість льодового періоду зменшилась за досліджувані роки на 18 днів. В Азовському морі за даними спостережень на станції Маріуполь середня дата появи льоду за досліджуваний період настає на 2 дні пізніше, а дата очищення – на 8 днів раніше середньої дати за багаторічними даними. Зменшення льодового періоду на станції Маріуполь становить 10 днів. Ці результати свідчать про збереження тенденції полегшення льодових умов в Чорному і Азовському морях в останні роки.

Перевірка прогнозів дат появи льоду і очищення від льоду на станціях Одеса, Миколаїв і Маріуполь за рівняннями розробленими у 80-х роках минулого століття показала незадовільні результати. У результаті перерахування отримано нові модифіковані прогностичні рівняння, розрахунки за якими забезпечують набагато більшу виправданість прогнозів і ефективність, в порівнянні з інерційним і кліматичним методами, що свідчить про можливість їх апробації в оперативній практиці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гидрометеорологические условия морей Украины . Т. 2. Черное море / Ю. П. Ильин и др. Севастополь, 2012. 420 с.
2. Гидрометеорологические условия морей Украины . Т. 1. Азовское море / Ю. П. Ильин и др. Севастополь, 2009. 400 с.
3. Вангенгейм Г. Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики. *Труды ААНИИ*. 1952. Т. 34. 314 с.
4. Абузьяров З.К., Думанская И. О., Нестеров Е. С. Оперативное океанографическое обслуживание. Москва, Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 275 с.
5. Ильин Ю. П. Климатические изменения гидрометеорологических условий Черного моря. *Глобальные и региональные изменения климата*. Киев : Нико-центр, 2011. С. 247-254
6. Hurrell J. W. et al. An overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Geophys. Monogr. Ser.* / Edited by J. W. Hurrell et al. Washington, D.C.: AGU, 2003. Vol. 134. Pp. 1-35.
7. Руководство по морским гидрологическим прогнозам / под ред. З.К. Абузьярова. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1994. 521 с.
8. Думанская И. О., Котилевская А. М. Оценка возможности использования прогностических методик XX века в современной практике ледового обслуживания мореплавания на неарктических морях России. *Труды ГМЦ России*. 2009. Вып. 343. С. 61-79.
9. Думанская И. О. Анализ влияния центров действия атмосферы на характеризм на морях европейской части России. *Труды ГМЦ России*. 2011. Вып. 345. С. 51-73.
10. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 3. Служба морских гидрологических прогнозов. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1982. 143 с.
11. Гаврилюк Р. В. Льодові явища в Чорному і Азовському морях і їх прогнозування в умовах кліматичних змін. *Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей*. 2018. №2. С. 32-51.
3. Vangengeim, G.Ya. (1952). Osnovy makrotsirkulyatsionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlya Arktiki [The basics of the macro-circulation method of the long-term meteorological forecasts for Arctic]. *Tr. AANI [Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute]*, 34. (in Russ.)
4. Abuzyarov, Z.K., & Dumanskaya, I.A. & Nesterov, E.S. (2009). *Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie [Operational Oceanographic Services]*. Moscow, Obninsk : IG-SOCIAL. (in Russ.)
5. Ilin, Y.P. (2011). Klimaticheskie izmeneniya gidrometeorologicheskikh usloviy Chernogo morya [Climate changes in the hydrometeorological conditions of the Black Sea ]. *Globalnyie i regionalnyie izmeneniya klimata [Global and regional climate change]*, Kiev: Niko-tsentr, pp. 247-254 (in Russ.).
6. Hurrell, J.W. et al. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell, J.W. et al (ed.). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Geophys. Monogr. Ser.* Washington, D.C.: AGU, vol. 134, pp. 1-35.
7. Abuzyarov, Z.K. et al. (1994). *Rukovodstvo po morskim gidrologicheskim prognozam [Guidance on Marine Hydrological Forecasts]*. Sankt-Peterburg: Gidrometizdat. (In Russ.).
8. Dumanskaya, I.O. & Kotilevskaya A.M. (2009). Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya prognosticheskikh metodik XX veka v sovremennoy praktike ledovogo obsluzhivaniya moreplavaniya na nearkticheskikh moryakh Rossii [Assessment of the possibility of using prognostic techniques of the twentieth century in the modern practice of ice navigation service on the non-Arctic seas of Russia]. *Trudy GMC [Proceedings Hydrometeorological Centre of Russia]*, 343, pp. 61-79. (in Russ.).
9. Dumanskaya, I. O. (2011). Analiz vliyaniya tsentrov deystviya atmosfery na kharakter zim na moryakh evropeyskoy chasti Rossii [Analysis of the influence of atmospheric action centers on the character on the seas of the European part of Russia.]. *Trudy GMC [Proceedings Hydrometeorological Centre of Russia]*, 345, pp. 51-73. (in Russ.).
10. The service of marine hydrological forecasts (1982). *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' 3 [The service of forecasts. Section 3, part 3]*. Leningrad: Gidrometizdat. (in Russ.).
11. Gavryliuk, R.V. (2018). Liodovi yavyscha v Chornomu i Azovskomu moriakh i ikh prognozuvannia v umovakh klimatichnykh zmin. *Vestnik Gidrometsentra Chernogo i Azovskogo morey [Bulletin of Hydrometeorological centre of the Black Sea and the Sea of Azov]*, 2, pp. 32-51.

## REFERENCES

## ICE PHENOMENA IN THE BLACK SEA AND THE SEA OF AZOV AND THEIR FORECASTING UNDER THE CONDITIONS OF CLIMATIC CHANGES

R.V. Gavrilyuk, N. M. Yuvchenko

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016, Odessa, Ukraine, [RAIISAGAVR@gmail.com](mailto:RAIISAGAVR@gmail.com), [gonani@ukr.net](mailto:gonani@ukr.net)

Ice cover is one of the most important factors determining the state of sea surface. Study and forecasting of its parameters is not only of scientific, but also of great practical interest for maritime economy. In the northern-west part of the Black sea and in the Sea of Azov the ice situation can be quite complicated, resulting in restriction of navigation opportunities and requiring use of icebreakers. Accounting actual and forecast ice characteristics significantly affects the efficiency of hydrometeorological services in marine industries, which determines the relevance of the chosen topic.

Modern global climate change led to changes of specific parameters of the ice regime in the northern-west part of the Black Sea and the Sea of Azov. Studies showed that for the last 30 years

the number of warm winters had increased by 15% and the number of cold winters had decreased by 19%. The duration of the ice period had decreased by a decade in the Sea of Azov and by a month in the northern-west part of the Black Sea. This determines the need for verification of the methods used for ice phenomena forecasting.

Currently, hydrometeorological services are delivered using the methods of ice phenomena forecasting that were developed in the 1980s. The main disadvantage of these methods is the limitation of the period of their application and the fact that they do not consider any climatic changes taking place over recent years.

The article's aim is to assess ice conditions changes in the north-western part of the Black Sea and in the Azov Sea over the past 20 years and to verify the method used for forecasting the dates of ice formation and disappearance.

The analysis showed that during the studied period ice formation begins later and its disappearance is observed earlier than if compared with average multi-year periods. Verification of the ice formation and disappearance forecasting method showed unsatisfactory results that did not meet the practical requirements. Based on the regression analysis new modified equations for forecasting the dates of ice formation and disappearance were defined. The accuracy of a new equation-based calculation technique constitutes 70-94% and the forecasting equations can be recommended for practical use.

**Key words:** the Black Sea; the Sea of Azov; ice phenomena; climate changes; statistical methods of ice phenomena forecasting.

## **ЛЕДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

**Р. В. Гаврилюк, Н. Н. Ювченко**

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, RAISAGAVR@gmail.com, gonani@ukr.net*

Ледовый покров является одним из наиболее важных факторов, определяющих состояние поверхности моря. Исследование и прогнозирование его параметров представляет не только научный, но и большой практический интерес для морских отраслей хозяйства. Даже на частично замерзающих морях – Черном и Азовском, ледовая обстановка бывает довольно сложной и требует использования ледоколов. Учет фактических и прогностических ледовых условий существенно уменьшает риск прохождения судов во льдах и оптимизирует использование ледоколов. Современные глобальные климатические изменения отразились на изменениях характерных показателей ледового режима в северо-западной части Черного моря и в Азовском море.

В настоящее время в практике гидрометеорологического обслуживания используют методы прогноза ледовых явлений, разработанные в 80-х годах XX-го века. Основным недостатком эмпирико-статистических методов является ограничение статистических связей по сроку применения, то есть прогностические уравнения необходимо уточнять с определенной периодичностью. При этом возможна не только замена весовых коэффициентов в уравнениях, но и предикторов.

На основе наблюдений за ледовыми явлениями в Черном и Азовском морях за последние десятилетия выполнена проверка метода среднесрочного прогноза (с заблаговременностью до 15 суток) дат появления льда и очищения ото льда, которая показала неудовлетворительные результаты не соответствующие требованиям практики. После пересчета предложены новые модифицированные уравнения регрессии. Расчеты с использованием предложенных уравнений обеспечивают более высокую оправдываемость прогнозов и эффективность по сравнению с климатическим и инерционным прогнозами, что свидетельствует о возможности их апробации в оперативной практике.

**Ключевые слова:** Черное море; Азовское море; ледовые явления; климатические изменения; статистические методы прогноза ледовых явлений.

*Подання до редакції: 08.04.2019*

*Надходження остаточної версії: 03.07.2019*

*Публікація статті: 28.11.2019*