

УДК 528.8:581.132:551.46.08

Оцінювання гідрофізичних характеристик водного середовища за допомогою космічних знімків в умовах неповної інформації

В. Г. Якимчук*, К. Ю. Суханов

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, Україна

В умовах повної інформації в методі оцінювання стану окремих ланок водної екосистеми на основі космічних знімків (зокрема визначення концентрації загальної зваженої й розчиненої органічної речовини) застосовується алгоритм розрахунків їх концентрації на основі даних космічних сканерів. Це досягається створенням за космічними даними багатомірної лінійної регресійної моделі залежності характеристик температури, солоності, сумарної зваженої речовини і розчиненої органічної речовини від впливаючих факторних змінних — спектральної яскравості 7-ми каналів супутника Landsat-5.

В умовах, коли поверхня води місцями закрита хмарами або знімок частини досліджуваної акваторії з відповідною датою відсутній, для оцінювання характеристик водного середовища за допомогою космічних знімків морської поверхні пропонується використовувати оптимальну інтерполяцію (екстраполяцію) значень спектральної яскравості знімків на ділянках акваторії. Описано метод оптимальної інтерполяції Колмогорова спектральної яскравості космічних знімків в умовах неповної інформації в задачі удосконалення та апробації методів дистанційного визначення гідрофізичних характеристик морського середовища. Виконано апробацію методу оптимальної інтерполяції Колмогорова поля значень спектральної яскравості морської поверхні для задачі оцінювання гідрофізичних характеристик водного середовища на прикладі каналів супутника Sentinel-2, яка показала для просторового розрізнення 10 і 20 м незначні похибки і досить високу кореляцію зі значеннями яскравості, а для каналів з просторовим розрізненням 60 м менші значення коефіцієнта кореляції, що пов'язано зі значно більшими відстанями між пікселями. Ці результати є цілком прийнятними для практичного використання інтерполяції (екстраполяції) значень спектральної яскравості космічних знімків морської поверхні в умовах неповної інформації, що створює передумови до створення багатомірної лінійної регресійної моделі для обчислення гідрофізичних характеристик водного середовища за даними каналів супутника Sentinel-2 в умовах неповної інформації.

Ключові слова: оптимальна інтерполяція Колмогорова, космічний знімок, гідрофізичні характеристики, морське середовище

© В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов. 2018

Вступ

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє майже безупинно стежити за морями й океанами, виявляти в них райони теплових аномалій, спостерігати за зародженням і переміщенням вихрових утворень, змінами теплових полів, кольору морської води, хвилювання, характеру океанських течій і інших гідрофізичних характеристик, що обумовлюють стан і енергетичний баланс Світового океану. Важливим етапом оцінки стану окремих ланок водної екосистеми на основі даних ДЗЗ (зокрема визначення концентрації загальної зваженої й розчиненої органічної речовини) є застосування алгоритму розрахунків їх концентрації на основі даних космічних сканерів.

Метод оцінювання гідрофізичних характеристик водного середовища за допомогою дистанційного сканування морської поверхні за допомогою сучасних космічних методів і засобів був розглянутий у роботі [4]. На підставі цих даних методом

найменших квадратів була побудована багатомір-на лінійна регресійна модель залежності характеристик температури, солоності, сумарної зваженої речовини і розчиненої органічної речовини від впливаючих факторних змінних — спектральної яскравості 7 каналів Landsat-5. За супутниковими даними із застосуванням багатомірної лінійної регресійної моделі були обчислені значення зазначених характеристик за значеннями спектральної яскравості 7 каналів Landsat-5. Обчислення для окремих станцій дають різну погрішність, середні погрішності по всіх станціях наступні: найменша для температури — 2%, для солоності — 9%, сумарного зваженого речовини — 4% і розчиненої органічної речовини — 12%.

Постановка задачі

В умовах, коли поверхня води місцями закрита хмарами або знімок частини досліджуваної акваторії з відповідною датою відсутній, для оцінювання характеристик водного середовища за допомогою дистанційних знімків морської поверхні ми

* E-mail: vladj@ukr.net

пропонуємо використовувати метод оптимальної інтерполяції (екстраполяції) значень спектральної яскравості на вказаних вище ділянках акваторії.

Метод оптимальної інтерполяції Колмогорова описано в роботі [1]. Відоме застосування методу оптимальної інтерполяції Колмогорова для побудови карт поверхневої температури й концентрації хлорофілу по скороченому об'єму даних натурних спостережень на північно-західному шельфі Чорного моря для збільшення кроку сітки полів з 1 до 10 км [3]. В даному дослідженні пропонується оцінити можливість використання методу оптимальної інтерполяції Колмогорова для визначення спектральної яскравості на ділянках акваторії частина поверхні яких закрита хмарами або відсутня на знімку. Сенс колмогоровської інтерполяції полягає в тому, що точка, у якій відновлюється значення, пов'язана з еталонними точками кореляційними й взаємними кореляційними залежностями. Дослідження коефіцієнтів інтерполяції в роботі [2] показали, що в першому наближенні вони пропорційні коефіцієнтам кореляції між точкою інтерполяції й точками вимірювань. Коефіцієнт взаємної кореляції враховує вплив на значення функції в точці інтерполяції, у кожній із точок, для яких це значення відоме. А саме, коефіцієнт взаємної кореляції обчислюється для інтерпольованої точки з кожної з відомих (еталонних) точок, тим самим будується вектор значень кореляційної функції. Так як розглядається просторова кореляція, то кореляційна функція є функцією відстані й будується шляхом розрахунків значень для певних відстаней.

Метод оптимальної інтерполяції Колмогорова

Розглянемо використання оптимальної інтерполяції Колмогорова поля значень спектральної яскравості L морської поверхні. Значення спектральної яскравості в точках навчання (точки, які є на знімку) використовуються як еталонні значення при виконанні просторової інтерполяції Колмогорова. У процесі обчислень, спочатку визначаються значення коефіцієнтів просторової кореляції поля значень спектральної яскравості між кожною парою точок навчання, а потім попарно визначаються значення коефіцієнтів просторової кореляції між кожною точкою, в якій необхідно визначити яскравість, з усіма точками навчання.

Приймаємо, що значення спектральної яскравості є випадковим полем $f(A_i) = L_i$, яке вимірюється в деяких точках $\{A_i\}, i=1, \dots, N$ довільного метричного n -мірного простору. Тобто, кожна точка характеризується сукупністю координат $A_i = (x_i, y_i)$. Оскільки простір метричний, то можна визначити відстань між точками $d(A_1, A_2) \geq 0$ й кожна пара точок характеризується відстанню між ними.

Мета оптимальної інтерполяції (екстрапольован-

ня) знайти, при сформульованих вище припущеннях щодо властивостей випадкових компонентів, оцінку значень невідомого сигналу $\hat{f}(B_j) = K_j$ на деякій множині інших точок $\{B_j\}, j=1, \dots, M$ розглянутого простору. Для оцінки невідомих значень побудуємо лінійну регресію, тобто лінійне перетворення відомих значень L_i методом найменших квадратів. Іншими словами будемо розв'язувати задачу про найкращий лінійний прогноз невідомих значень K_j , тобто шукати оцінку, що забезпечує мінімум математичного очікування квадрата погрешності цієї оцінки щодо дійсного значення, тобто мінімум величини:

$$\varepsilon^2 = E\{[K_j - L_i]^2\} \quad (1)$$

серед усіх можливих лінійних оцінок, тобто оцінок, одержуваних лінійним перетворенням значень $f(L_i)$:

$$K_j = \sum_{i=1}^N b_{ji} L_i \quad (2)$$

Таким чином, задача пошуку оптимальної оцінки K_j зводиться до визначення вагових коефіцієнтів b_{ji} . Для кожного фіксованого вузла B_j , для якого будується оцінка K_j , можна представити значення кореляційної функції $R_f(B_j - A_i), i=1, \dots, N$ невідомого значення f у вигляді лінійної комбінації значень кореляційних функцій $R_f(A_k - A_i)$:

$$R_f(B_j - A_i) = \sum_{k=1}^N b_{jk}^* R_f(A_k - A_i) \quad (3)$$

де $b_{jk}^*, j=1, \dots, M; i=1, \dots, N$, — набір коефіцієнтів, який (для кожного j окремо) може бути визначений з розв'язання системи рівнянь (3).

Підставляючи (2) і (3) в (1) і виконавши низку математичних перетворень отримуємо, що мінімум ε^2 відповідає такому вибору коефіцієнтів b_{ji} при якому $b_{ji} \equiv \hat{b}_{ji}$, де \hat{b}_{ji} визначаються (для кожного вузла B_j) з розв'язку системи рівнянь (3) [1]. Із цього випливає, що, розв'язавши систему рівнянь (3), ми одержуємо шукані коефіцієнти для рівняння (2). Таким чином оцінка (2) записується у вигляді:

$$K_j = \frac{R(B_j, A_1)}{\sum_{i=2}^N G(A_1, A_i)} f(L_1) + \frac{R(B_j, A_2)}{\sum_{i=2}^N G(A_2, A_i)} f(L_2) + \dots + \frac{R(B_j, A_N)}{\sum_{i=2}^N G(A_N, A_i)} f(L_N).$$

Для побудови графіка кореляційної функції (тобто коефіцієнтів апроксимуючої функції) використовується метод апроксимації кубічними сплайнами.

Результати дослідження

Необхідно оцінити значення спектральної яскравості морської поверхні $\hat{f}(B_j) = K_j$ в деяких точках $\{B_j\}, j=1, \dots, M$ певної акваторії за допомогою вимірів

спектральної яскравості в кінцевому числі точок $\{A_i\}$, $i=1, \dots, N$. У системі рівнянь оптимальної інтерполяції (3) використовуються коефіцієнти просторової кореляції між точкою акваторії, де виконується інтерполяція, і точками вимірювань, і коефіцієнти кореляції тільки між точками вимірювань, тим самим ураховуються взаємні статистичні зв'язки між точками вимірювань.

Розглянемо використання оптимальної інтерполяції Колмогорова на космічному знімку супутника Sentinel-2 від 09.09.2018 р. ділянки акваторії Чорного моря (рис. 1). Точки акваторії були розділені на навчальну і перевіірочну вибірки. По навчальній вибірці з розв'язку системи рівнянь (3), ми одержуємо шукані коефіцієнти для рівняння (4). Для одержання середніх погрешностей характеристик морського середовища, розрахованих на основі просторової інтерполяції Колмогорова було повторено кілька разів поділ точок на навчальну та перевіірочну вибірки.

Апробація методу оптимальної інтерполяції Колмогорова поля значень спектральної яскравості морської поверхні всіх каналів супутника Sentinel-2 виконувалась шляхом порівняння реальних значень яскравості $f(B_j)$ зі значеннями K_j , одержаними в результаті інтерполяції. Ділянки, які були вибрані для дослідження мали розмір 100×100 пікселів.

Обчислення значень інтерполяції виконано для всіх каналів супутника Sentinel-2. Замість загальних позначень $f(B_j)$ та K_j введемо для каналів супутника

Sentinel-2 позначення $L01, \dots, L12$ (спектральні яскравості каналів) та $K01, \dots, K12$ (інтерполяція спектральної яскравості по Колмогорову). Точність інтерполяції визначалась за кількома показниками:

- коефіцієнт кореляції ($corr$), як міра статистичної імовірнісної залежності між значеннями яскравості $L01, \dots, L12$ та інтерполяції $K01, \dots, K12$ всієї ділянки;
- різниця $D_t = L_t - K_t$, $t = 1, K, T$ між значеннями яскравості та інтерполяції, обчислена для всіх пікселів знімка ділянки;
- середнє значення (*average value, AV*) $AV_t = \bar{D}_t$ і стандартне відхилення (*standard deviation, SD*), визначене для множини значень різниць;
- відносні: середнє (*average relative, AR*) і стандартне відхилення (*deviation relative, DR*), обчислені, як похибка інтерполяції за формулами:

$$AR_t = AV_t / L_t \quad (7)$$

$$DR_t = SD_t / L_t \quad (8)$$

На рис. 2–4 наведено у вигляді графіків фрагменти значень яскравості каналів Sentinel-2 $L01, \dots, L12$ і отримані в результаті оптимальної інтерполяції Колмогорова значення $K01, \dots, K12$. Над графіками наведено значення просторового розрізнення (*spatial resolution, SR*) каналів, коефіцієнт кореляції ($corr$) між значеннями яскравості та інтерполяції всієї ділянки 100×100 пікселів та відносне стандартне відхилення (*deviation relative, DR*). Відносні середні значення AR_t не перевищують десятих часток процента.



Рис. 1. Космічний знімок Чорного моря супутника Sentinel-2 від 09.09.2018 р., аналізована ділянка позначена червоним кольором. Координати верхнього лівого і нижнього правого кутів ділянки: $46^{\circ}6'06.86''N$ $33^{\circ}0'17.23''E$ і $46^{\circ}5'43.20''N$ $33^{\circ}0'51.23''E$

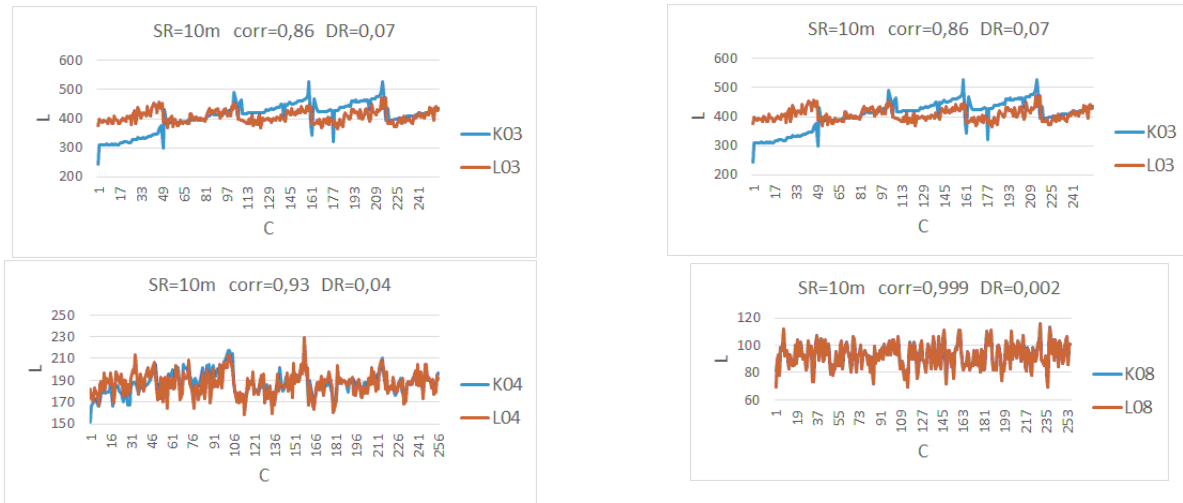


Рис. 2. Графіки фрагменту значень яскравості каналів $L02, L03, L04, L08$ супутника Sentinel-2 з просторовим розрізненням $SR=10\text{ м}$ і значень, отриманих в результаті оптимальної інтерполяції Колмогорова $K02, K03, K04, K08$. Горизонтальна вісь C вказує номери ілюстрованих точок досліджуваної ділянки. $corr$ — коефіцієнт кореляції між значеннями яскравості та інтерполяції, DR — відносне стандартне відхилення

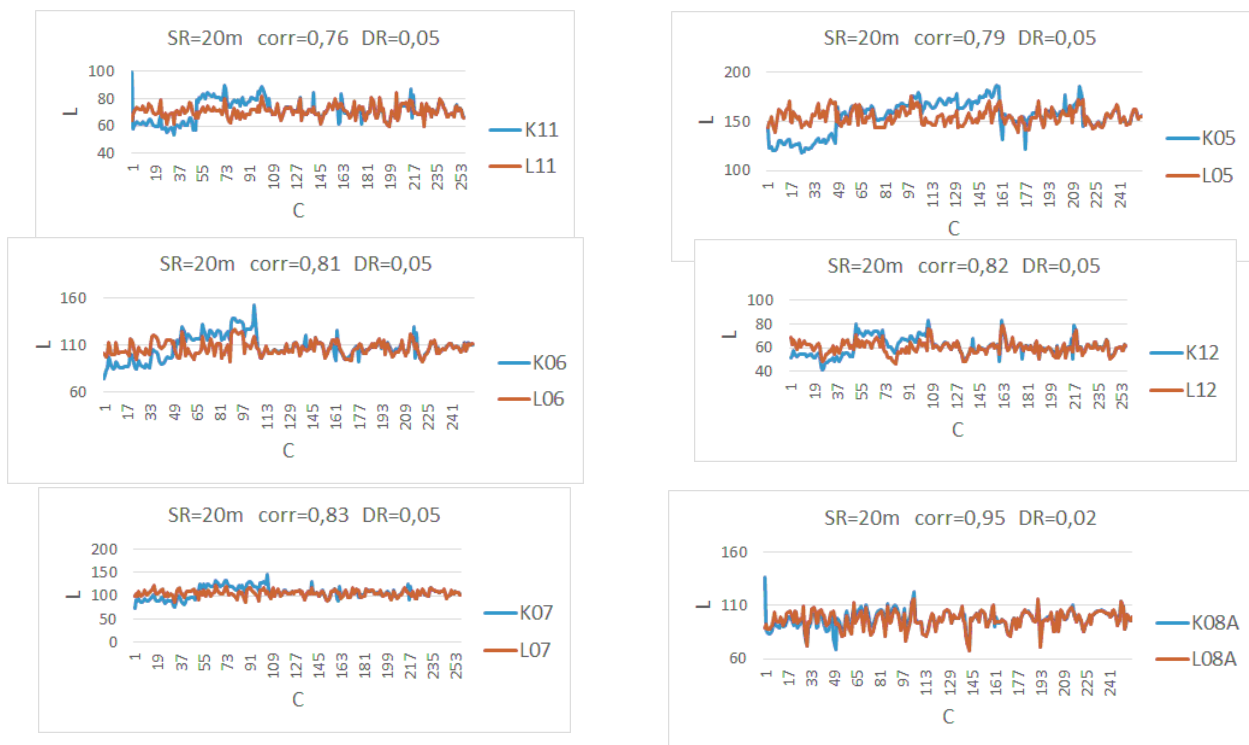


Рис. 3. Графіки фрагменту значень яскравості каналів $L11, L05, L06, L12, L07, L08A$ супутника Sentinel-2 з просторовим розрізненням $SR=20\text{ м}$ і значень, отриманих в результаті оптимальної і нтерполяції Колмогорова $K11, K05, K06, K07, K08A$. Горизонтальна вісь C вказує номери ілюстрованих точок досліджуваної ділянки. $corr$ — коефіцієнт кореляції між значеннями яскравості та інтерполяції, DR — відносне стандартне відхилення

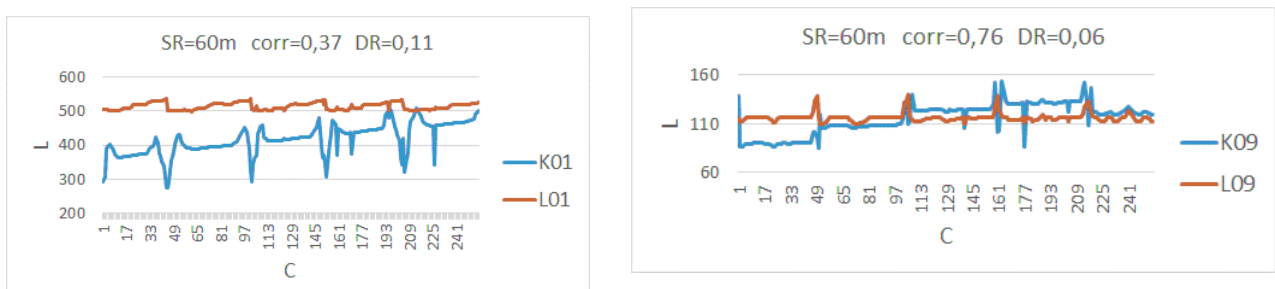


Рис. 4. Графіки фрагменту значень яскравості каналів $B01, B09$ супутника Sentinel-2 з просторовим розрізненням $SR=60\text{ м}$ і значень, отриманих в результаті оптимальної інтерполяції Колмогорова $K01, K09$. Горизонтальна вісь C вказує номери ілюстрованих точок досліджуваної ділянки. $corr$ — коефіцієнт кореляції між значеннями яскравості та інтерполяції, DR — відносне стандартне відхилення

Висновок

Апробація методу оптимальної інтерполяції Колмогорова поля значень спектральної яскравості морської поверхні для задачі оцінювання гідрофізичних характеристик водного середовища показала, що результати є цілком прийнятними для практичного використання інтерполяції (екстраполяції) значень спектральної яскравості космічних знімків морської поверхні в умовах неповної інформації.

Інтерполяція Колмогорова для каналів супутника Sentinel-2 з просторовим розрізненням $SR = 10$ і $SR = 20$ м дає незначні похибки і досить високу кореляцію зі значеннями яскравості, а канали з просторовим розрізненням $SR = 60$ м мають менші значення коефіцієнта кореляції, що пов'язано зі значно більшими відстанями між пікселями. Наступним кроком досліджень планується створення багатомірної лінійної регресійної моделі для обчислення гідрофізичних характеристик водного середовища за даними каналів супутника Sentinel-2.

Література

1. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. *Изв. АН СССР. Серия матем.* 1941. №5. С. 3–11.
2. Оценка нефтегазо-перспективности участков территории методом пространственной интерполяции Колмогорова / Л. Ф. Даргейко, А. Д. Федоровский, А. Е. Лукин, А. Ю. Порушкевич. *Доповіді Національної академії наук України.* 2011. №10. С. 100–103.
3. Пухтяр Л. Д., Станичний С. В., Тимченко И. Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности. *Морской гидрофизический журнал.* 2009. № 4. С. 34–50.
4. Региональные алгоритмы исследования морских акваторий по данным космической съемки на примере Керченского пролива / А. Д. Федоровский, А. Ю. Порушкевич, А. А. Чепыженко, В. Г. Якимчук. *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. пр.* 2013. Вип. 12. С. 33–42.

References

1. Kolmogoroff A. (1941). Interpolation und Extrapolation von stationären zufälligen Folgen. *Izv. AN SSSR. Seriya matem.*, no. 5, pp. 3–14. (in Russian).
2. Dargeyko L. F., Fedorovskiy A. D., Lukin A. Ye., Porushkevich A. Yu. (2011). Evaluation of oil-gas-bearing capacity of territory sites by the Kolmogorov spatial interpolation method. *Dopovidi Nacionalnoji akademiji nauk Ukrainy*, no. 10, pp. 100–103. (in Russian).
3. Pukhtiar L. D., Stanychnyi S. V., Tymchenko I. Ye (2009). The optimal interpolation of remote sensing data of sea surface. *Morskoji hydrofyzicheskyi zburnal*, no. 4, pp. 34–50. (in Russian).
4. Fedorovsky A. D., Porushkevich A. Yu., Chepyzhenko A. A., Yakimchuk V. G. (2013). The regional algorithms with space survey of sea researching on Kerch Strait example. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia: Zb. nauk. pr.*, vol. 12, pp. 33–42. (in Russian).

ОЦЕНИВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОГО СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов

В условиях полной информации в методе оценивания состояния отдельных звеньев водной экосистемы на основе космических снимков (в частности определение концентрации общего взвешенного и растворенного органического вещества) применяется алгоритм расчетов их концентрации на основе данных космических сканеров. Это достигается созданием по космическим данным многомерной линейной регрессионной модели зависимости характеристик температуры, солености, суммарного взвешенного вещества и растворенного органического вещества от влияющих факторных переменных — спектральной яркости 7-ми каналов спутника Landsat-5.

В условиях, когда поверхность воды местами закрыта тучами или снимок части исследуемой акватории с соответствующей датой отсутствует, для оценивания характеристик водного среды с помощью космических снимков морской поверхности предлагается использовать оптимальную интерполяцию (экстраполяцию) значений спектральной яркости снимков на участках акватории. Описан метод оптимальной интерполяции Колмогорова спектральной яркости космических снимков в условиях неполной информации в задаче усовершенствования и апробации методов дистанционного определения гидрофизических характеристик морской среды. Выполнена апробация метода оптимальной интерполяции Колмогорова поля значений спектральной яркости морской поверхности для задачи оценивания гидрофизических характеристик водного среды на примере каналов спутника Sentinel-2, которая показала для пространственного разрешения 10 и 20 м незначительные погрешности и достаточно высокую корреляцию со значениями яркости, а для каналов с пространственным различием 60 м меньшие значения коэффициента корреляции, что связано со значительно большими расстояниями между пикселями. Эти результаты являются целиком приемлемыми для практического использования интерполяции (экстраполяции) значений спектральной яркости космических снимков морской поверхности в условиях неполной информации, что создает

предпосылки к созданию многомерной линейной регрессионной модели для вычисления гидрофизических характеристик водной среды по данным каналов спутника Sentinel-2 в условиях неполной информации.

Ключевые слова: оптимальная интерполяция Колмогорова, космический снимок, гидрофизические характеристики, морская среда

ESTIMATION OF HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE AQUATIC ENVIRONMENT USING SATELLITE IMAGES IN THE CONTEXT OF INCOMPLETE INFORMATION

V. G. Yakimchuk, K. Yu. Sukhanov

In the method of assessing the state of individual parts of the aquatic ecosystem based on satellite images (determining the concentration of total suspended and dissolved organic matter in particular), an algorithm for calculating their concentration based on data from space scanners is used for complete information. This is achieved by creating, using cosmic data, a multidimensional linear regression model of the dependence of the characteristics of temperature, salinity, total suspended matter and dissolved organic matter on the influencing factor variables — spectral values 7 bands of Landsat-5.

To assess the characteristics of the aquatic environment from satellite images of the sea surface, when the surface of the water is sometimes covered with clouds or there is no image of a part of the studied water area with the required data, it is proposed to use an optimal interpolation (extrapolation) of the spectral brightness values of images in the water areas.

The method of optimal interpolation of Kolmogorov spectral brightness of satellite images under incomplete information in the task of improving and testing methods for the remote determination of the hydrophysical characteristics of the marine environment is described.

The optimal Kolmogorov interpolation method was tested for the field of the spectral values of the sea surface for the problem of estimating the hydrophysical characteristics of the aquatic environment using the example of the Sentinel-2 satellite channels, which showed for the spatial resolution of 10 and 20 m insignificant errors and a sufficiently high correlation with the brightness values, and for the channels with the spatial discrimination of 60 m is smaller than the value of the correlation coefficient, which is associated with significantly larger distances between the pixels. These results are acceptable for practical use of interpolation (extrapolation) of spectral brightness values of satellite images of the sea surface under incomplete information, which creates prerequisites for creating a multidimensional linear regression model for calculating the hydrophysical characteristics of the aquatic environment according to incomplete information satellite conditions.

Keywords: optimal interpolation, Kolmogorov, space image, hydrophysical characteristics, sea environment