

DOI:
УДК528.92

Морозюк Б.О.,
mob2401ang@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3916-1613,
к.т.н, доцент **Мельник О.В.**,
hockins@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5429-4038,
Східноєвропейський національний
університет іменіЛесі Українки

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ РУСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ Р. ЗАХІДНИЙ БУГ У МЕЖАХ ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Розглянуто причини змін горизонтального та висотного положення русел, руйнування берегів та дна річок, вплив цих процесів на господарську діяльність людини, підкреслюється важливість своєчасного виявлення таких процесів, особливо на прикордонних річках. Наголошується на важливості постійного моніторингу за природними об'єктами, який є можливим завдяки сучасному дистанційному зондуванню Землі за допомогою проекту Copernicus Європейського космічного агентства (ESA) та даних КА Sentinel-2, а також їх порівняльного аналізу із результатами топографо-геодезичних вишукувань.

У роботі проведено розрахунки звивистості русла, досліджено геотопографічний параметр. Проаналізовано шість методів, їхні недоліки та переваги у використанні і вибрано саме той, який є універсальним при застосуванні середніх і малих масштабів. Використано вимірювання індексу синусоїдальності, зокрема компонента Мюллера індексу синусостійкості, що обумовлює, який відсоток відхилення русла річки від прямолінійного ходу обумовлений або гідравлічним фактором у долині, або топографічними перешкодами. Проаналізовано показники синусості, за допомогою яких здійснено розрахунок показників звивистості русла р. Західний Бугна ділянці протяжністю 25 км. Встановлено значне збільшення показника звивистості на п'яти відрізках між населеними пунктами Новоугрузьке та Гуца, проте, середні значення звивистості на цій ділянці практично не змінився.

Вирішено завдання, як отримувати регулярні дані, встановлювати ділянки для більш детальних геоморфологічних, інженерно-геологічних та геодезичних досліджень, щоб впроваджувати берегоукріплюючі заходи. У статті наголошується на необхідності вдосконалень комплексного аналізу карт четвертинних відкладів, особливо побудовою точних цифрових моделей місцевості, що дасть змогу прогнозувати зміни русла в період повеней.

Ключові слова: супутникові знімки; геодезія; руслові процеси; меандри; синусоїдальність русла.

Постановка проблеми.

З плином часу русла річок змінюють своє горизонтальне і висотне положення [1]. За 20 років русло річки може зміститись на відстань, що дорівнює або перевищує ширину русла, можуть утворитись нові протоки, рукави, заплави тощо.

Під дією руслових процесів розмиву річища і акумуляції відкладів утворюються меандри. Поверхневі потоки річки спрямовуються до зовнішнього краю берега, поступово збільшуючи його розмив, а донні, насичені наносами,— до внутрішнього, де внаслідок зменшення швидкості течії відбувається відкладання продуктів розмиву. Зовнішній край меандри переважно крутий, а внутрішній — пологий. Поступово меандр перетворюється на петлеподібну звивину, яку річка може прорвати в найвужчій частині (шийці), прокладаючи новий коротший шлях.

До основних причин таких явищ є кліматичні, фізико-географічні та антропогенні чинники, а саме часті повені, слабкостійкі породи та ґрунти, вирубка лісів та забір гравійно-піщаних матеріалів з русла ріки [2]. Зміни русла значною мірою впливають на природні і культурні ландшафти та на господарську діяльність людини. З іншого боку, антропогенна діяльність, зокрема, гірничодобувні та будівельні роботи у долинах ріки теж зумовлюють зміну русла ріки [3]. Через здійснення таких природних процесів відбувається і зміна кордонів держав, що проходять по таких ріках, зокрема між Україною та Республікою Польща.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематикою теоретичних та практичних аспектів дослідження руслових процесів дистанційними методами насичені роботи: Чалова Р.С., Маккавеева Н.І., [4] Лохтіна В.М.[5], Кондратьєва Н.Е.[6]. Вони заклали основи розвитку вчення про руслові процеси як науки. Ними досліджено вплив чинників на руслові процеси, формування русел, морфологічні особливості та аналіз руслових зміщень річок.

Із закордонних вчених дослідження руслових процесів належить передусім: Blackwell W.[7], Buffington, J. M. [8], Grenfell, M.C.[9], та ін. У своїх працях вони розглядали питання дослідження проблем руслових процесів, аналізу зміни русел річок, дослідження їх зміщень за допомогою різних методів, аналіз впливу чинників на руслові деформації та інше.

Безпосередньо дистанційними методами оцінки руслових процесів займались Бурштинська Х.В., Третьак С.К., Шевчук В.М.[10,11,12].

Постановка завдання проблеми

Переформування річки Західний Буг відбувається під дією водяних паводків і розмиванні берегів. Усе це зумовлено швидкістю течії та крутістю поворотів. На зміну русла Західного Бугу впливають також багато інших чинників: будівництво різних споруд на руслі річки, розроблення руслових кар'єрів, меліоративні роботи в заплавах рік, будівництво водосховищ, ставків, каналів, вирубування дерев на берегах рік.

Меандрування супроводжується руйнуванням русел, берегів і дна річки. У деяких випадках меандри можуть зблизитися один з одним настільки, що земля на перемичці між ними проривається. У такому разі утвориться нове, коротше русло, в якому значно більші похил та швидкість течії. Внаслідок цього на кінцях залишеного потоком меандра почнуть відкладатись наноси і згодом утвориться стариця.

Своєчасне виявлення таких процесів, особливо на прикордонних річках, є стратегічним та своєчасним завданням.

Виклад основного матеріалу проблеми

Дослідження проводилися на відрізку річки Західний Буг довжиною 25 кілометрів, між населеними пунктами Новоугрузьке та Гуца. За основу було використано матеріали топографо-геодезичних вишукувань в масштабі 1:2 000 за 2001 рік, та супутникова зйомка 2020 року з космічного апарату Sentinel-2 з просторовою роздільною здатністю 10 м.

Топографічні вишукування у 2001 році виконувалась тахеометром Toro Con GPT-2000. Тахеометричний хід був прокладений по правому березі річки, планова основа була створена за програмою 1 розряду згідно вимог «Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98)». Вихідними пунктами для топографічних вишукувань слугували пункти Державної геодезичної мережі I-III класів.

Одним із новітніх елементів у сучасному дистанційному зондуванні Землі є проект Copernicus Європейського космічного агентства (ESA). ESA у 2014 році розпочало створення автоматичної системи отримання інформаційних продуктів супутників Sentinel-2 (S2). Місія Sentinel-2, має великий потенціал для точної класифікації та моніторингу природних угідь, оскільки може поєднувати високе просторове розрізнення, широке покриття та швидкий час оновлення (близько 5 днів). S2 має мультиспектральний сенсор з 13 смугами, від 0,443 до 2,190 мкм. Мультиспектральні дані у видимому та NIR діапазонах, що доступні у великому просторовому розрізненні (10 м) як найкраще придатні для застосування в дослідженнях природних об'єктів. Також доступні чотири сегменти червоного спектру з просторовим розрізненням 20 м, які підходять для аналізу вмісту хлорофілу та для параметризації еколого-фізіологічних великомасштабних моделей [13].

Вихідними матеріалами дослідження слугували дані мультиспектрального знімка Sentinel-2 від 06.04.2020 р., що були завантажені з ресурсу SentinelHub(<https://apps.sentinel-hub.com>), код продукту "S2A_MSIL1C_20200406T093031_N0209_R136_T34UFB_20200406T105852".

Для отриманих знімків було здійснено атмосферну корекцію за методом DOS1 та передискретизацію з роздільною здатністю 10 м у середовищі вільної географічної інформаційної системи з відкритим кодом QGIS в актуальній на момент написання статті версії з довготривалою підтримкою 3.12.0-Bucureșt.

Для визначення змін рельєфу русла річки Західний Буг були проведені розрахунки звивистості русла. Поняття синусоїдальності використовується для визначення ступеня меандрування річки, за яким потім встановлювалися геоморфологічні типи річок. Існують різноманітні синусоїдальні показники, кожен з яких описує певний гео-топографічний параметр.

- Тотальний (повний) метод синусоїдальності, що базується на коефіцієнті між довжиною русла річки, її початком і кінцем.
- Метод Бріца, індекс, який виражається як відношення між довжиною русла річки та довжиною осі меандрів.
- Метод перегину синусоїдальності отримується шляхом зв'язування всіх точок перегину ряду меандрів з розбитою лінією, при цьому ця лінія використовується як знаменник формули.
- Метод Леопольда і Вольмана полягає у поділі довжини тальвега (канал) на довжину долини.
- Гідравлічний метод синусоїдальності русла формулюється як коефіцієнт між довжиною русла річки та середньою довжиною долини.
- Метод топографічної синусоїдальності визначається як відношення середньої довжини долини з найменшою відстанню між початком і кінцем русла річки.

Описані вище шість методів, мають як переваги, так і недоліки у їх використанні. Індекс Бріца, також відомий як метод довжини центральної осі меандр, є найбільш універсальним завдяки його швидкому розрахунку і можливості пристосуватися до середніх і малих масштабів.

Гідрогеоморфна динаміка річки та інші зовнішні чинники безпосередньо спотворюють її хід від найкращого шляху, і це добре вимірюється індексом синусоїдальності. Ми проаналізували декілька показників синусості, які сформулювали Leopolda Wolman (1957), Brice (1964), Schumm (1963), Mueller (1968), Knighton (1998), Friendta Sinha (1993). Недолік згаданих індексів полягає в тому, що всі русла зі значенням одиниці є прямими. За винятком індексу Мюллера [14], усі індекси мають певні труднощі у вимірюванні, застосуванні та універсальному сприйнятті.

Основна привабливість компонента Мюллера індексу синусостійкості полягає в тому, що він обумовлює, який відсоток відхилення русла річки від прямолінійного ходу обумовлений або гідравлічним фактором у долині, або топографічними перешкодами. Показники синусоїдності Мюллера Мюллера (рис.1) коротко описані наступним чином [14]:



Рис. 1. Ключові елементи русла

CL = довжина каналу (тальвег) у досліджуваному потоці;

VL = довжина долини вздовж потоку, довжина лінії, яка знаходиться посередині між основою стіни долини (у цьому випадку половина загальної довжини правого та лівого берега доступу);

XY – найкоротша відстань між початком і кінцем досліджуваної ділянки;

CI (індекс русла) = CL / XY ;

VI (долинний індекс) = VL / XY ;

HSI (індекс гідравлічної синусності) = % еквівалент $(CI - VI) / (CI - 1)$;

TSI (індекс топографічної синусності) = % еквівалент $(VI - 1) / (CI - 1)$;

SSI (стандартний індекс синусності) = CI / VI .

В загальному, нами запропоновано схему дослідження яка зображена на рис. 2

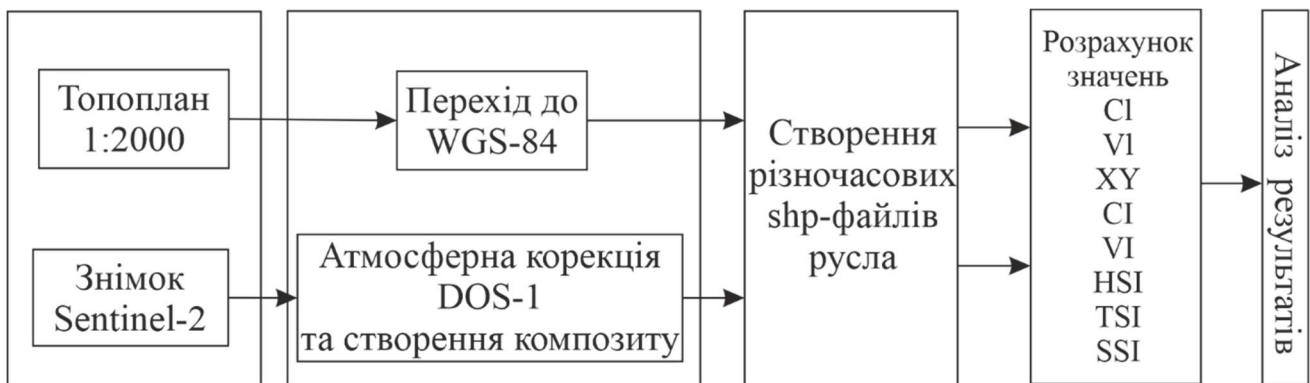


Рис. 2. Схема виконання дослідження

Результати дослідження. На основі запропонованої методики нами здійснено розрахунок показників звивистості русла р. Західний Буг (табл.1) на основі векторизованих середовищі QGIS основних русел за 2001 та 2020 роки. Оверлей векторних шарів на космоснімок Sentinel-2 2020 року представлений на рис. 3.

Окрім загальних показників для всієї досліджуваної ділянки р. Західний Буг, нами здійснено розрахунок коефіцієнтів звивистості за ключовими

ділянками з кроком 100 м, результати якого представлені графічно на рис. 4.



Рис. 3. Векторизовані русла р. Західний Буг накладені на космознімок Sentinel-2 2020 р.

Таблиця 1
Показники звивистості русла
р. Західний Буг

Показни к	Роки	
	2001	2020
CI	23247,085	24735,37
VI	23222,104	24670,883
XY	10415,317	10567,553
CI	2,232	2,340
VI	2,229	2,334
HIS	0,002	0,004
TSI	0,998	0,995
SSI	1,001	1,003

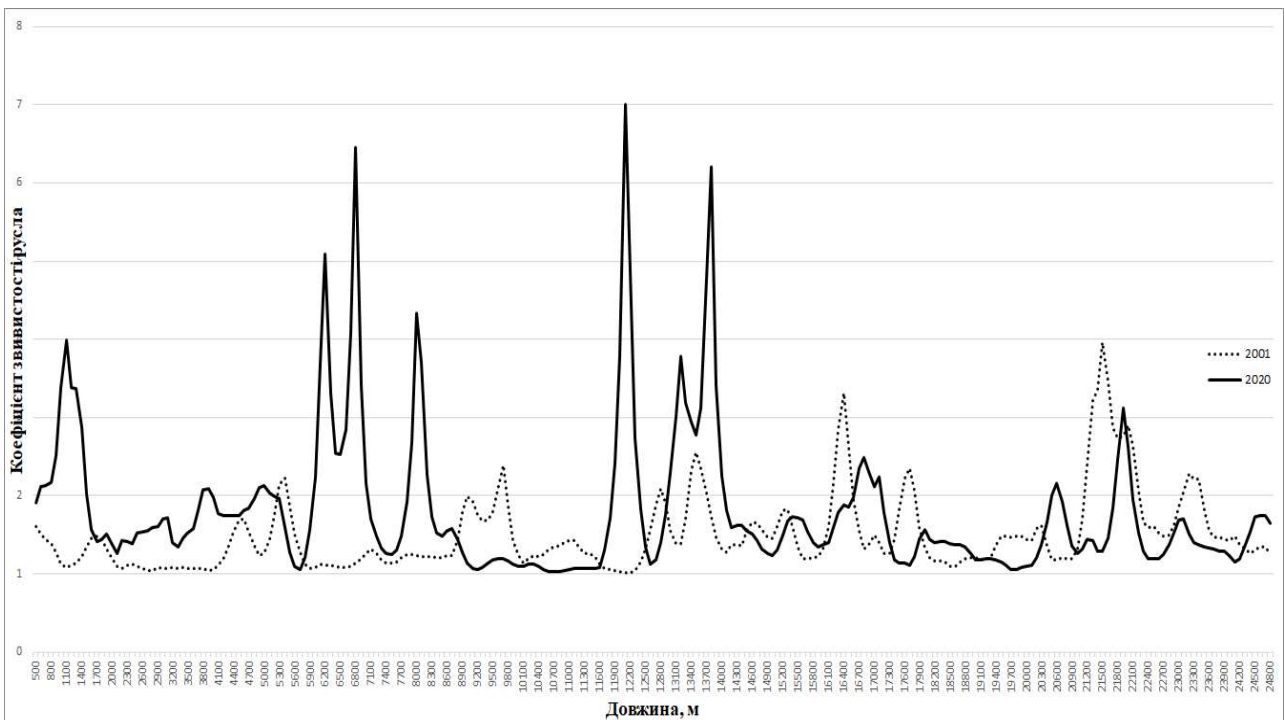


Рис. 4. Звивистість русла р. Західний Буг на досліджуваній ділянці за 2001 та 2020 роки.

Аналіз результатів чітко вказує на значне збільшення звивистості русла на досліджуваній ділянці на відрізках 500-1700 м, 5700-7400 м, 7700-8300 м, 11600-12400 м, 12700-14000м. При цьому мінімальні і максимальні коефіцієнти звивистості становили 1,0164 та 7,2489 для 2001 року і 1,0182 та 7,0004 для 2020 року. Проте середні значення звивистості на даній ділянці залишились практично без зміни: 1,618 та 1,621 відповідно для 2001 та 2020 року.

Висновки. Запропонована в статті методика моніторингу руслових процесів із використанням даних космічного знімання дозволяє отримувати регулярні дані та значно економити ресурси в порівнянні із інструментальними вишукуваннями. Завдяки проведеному аналізу, можна чітко встановити ділянки для більш детальних геоморфологічних, інженерно-геологічних та геодезичних досліджень і подальшого впровадження берегоукріплюючих заходів.

Подальші дослідження можуть бути вдосконалені комплексним аналізом карт четвертинних відкладів, побудовою точних цифрових моделей місцевості, аналізу заболоченості територій за даними дистанційного зондування та прогнозуванням змін русла в період повеней.

Література

1. Бурштинська Х.В. Моніторинг руслових процесів та повеневих явищ ріки Дністер за космічними зображеннями / Х. Бурштинська, Л. Мовчко, В. Шевчук // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2015. – Вип. 1. – С. 124–128.
2. Mahmood R. Assessment of temporal and spatial changes of future climate in the Jhelum river basin, Pakistan and India /R. Mahmood, M.S. Babel,S. J.A. // Weather and Climate Extremes, 10, с. 40–55.doi: 10.1016/j.wace.2015.07.002
3. Ободовський О.Г. Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів (на прикладі річок України). – К.: Ніка-Центр, 2001. – 274 с.
4. Чалов Р.С. Русловые процессы / Р.С. Чалов, Н.И. Маккавеев // - М.: МГУ, 1986. – С. 264.
5. Лохтин В.М. О механизме речного русла / В.М. Лохтин// - Казань,1985. - С. 76.
6. Кондратьев А.Н. Причины образования извилистости: меандрирование рек и других природных потоков / А.Н. Кондратьев // Известия А.Н. Серия Географическая. – 2000. – No 4. – С. 42–44.
7. Blackwell W. Tools in fluvial geomorphology / W. Blackwell, G.M. Kondolf, H. Piegay // Advancing river restoration and management. Second Edition, 2003. – pp. 541.

8. Buffington J.M. Geomorphic classification of rivers /J.M. Buffington, D.R. Montgomery, J. Shroder, E. Wohl // *Treatise on Geomorphology. Fluvial Geomorphology*, 2013. - Vol. 9.- pp. 730-767. doi:10.1016/B978-0-12-374739 - 6.00263-3.

9. Grenfell M.C. Mediative adjustment of river dynamics: The role of chute channels in tropical sand-bed meandering rivers /M.C. Grenfell, A.P. Nicholas, R. Aalto// *Sedimentary Geology*, 2014. –Vol. 301. – pp. 93-106. doi:10.1016/j.sedgeo.2013.06.007.

10. Бурштинська Х.В. Дослідження горизонтальних зміщень частини річки Дністер з використанням даних ДЗЗ та ГІС-технології / Х.В. Бурштинська, С.К. Третьяк, М.К. Галочкін // *Геодинаміка* (входить до наукометричної бази Web of Science). – 2017. р. - Випуск 2(23). - С. 14-24. doi: 10.23939/jgd2017.02.014.

11. Burshtynska K.H. Monitoring of the riverbeds of rivers Dniester and Tisza of the Carpathian region / K.H. Burshtynska, V. Shevchuk, S. Tretyak, V. Vekliuk //XXIIIISPRS Congress, Commission VII (Vol. XLIB7) 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. -p. 177–182, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B7-177-2016

12. Бурштинська Х.В. Моніторинг змін русла річки Стрий з використанням ГІС-технологій / Х.В. Бурштинська, С.К. Третьяк, В.М. Шевчук// *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, випуск I (35). – 2018. - С. 138-146.

13. ESA Sentinel Online. [Електронний ресурс] – Режимдоступудоресурсу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

14. Mueller, J.R. An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes./ J. R Mueller // *Annals of the Association of American Geographers*, 1968, Vol.58, No.2, 371-385.

Морозюк Б.А., к.т.н., доцент Мельник А.В.,
Восточноевропейский национальный
университет имени Леси Украинки

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ Р. ЗАПАДНЫЙ БУГ В ПРЕДЕЛАХ ВОЛЫНСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье рассмотрены причины изменений горизонтального и высотного положения русел, разрушения берегов и дна рек, влияние этих процессов на хозяйственную деятельность человека, подчеркивается важность своевременного выявления таких процессов, особенно в приграничных реках. Отмечается важность постоянного мониторинга за природными объектами, который возможно благодаря современному дистанционному зондированию Земли с помощью проекту Copernicus Европейского космического агентства

(ESA) и данных КА Sentinel-2, а также их сравнительного анализа с результатами топографо-геодезических изысканий.

В работе проведены расчеты извилистости русла, исследованы геотопографический параметр. Проанализированы шесть методов, их недостатки и преимущества в использовании и выбрано именно тот, который является универсальным в применении средних и малых масштабов. Используются измерения индекса синусоидальности, в частности компонента Мюллера индекса синусостойкости, что обуславливает, какой процент отклонения русла реки от прямолинейного хода обусловлен или гидравлическим фактором в долине, или топографическими препятствиями. Проанализированы показатели синусности, с помощью которых произведен расчет показателей извилистости русла р. Западный Буг на участке протяженностью 25 км. Установлено значительное увеличение показателя извилистости на пяти отрезках между населенными пунктами Новоугружское и Гуца, однако, средние значения извилистости на этом участке практически не изменились.

Решена задача, как получать регулярные данные, устанавливать участки для более детальных геоморфологических, инженерно-геологических и геодезических исследований, чтобы внедрять берегоукрепляющие мероприятия. В статье подчеркивается необходимость усовершенствований комплексного анализа карт четвертичных отложений, особенно построением точных цифровых моделей местности, что позволит прогнозировать изменения русла в период наводнений.

Ключевые слова: спутниковые снимки; геодезия; русловые процессы; меандры; синусоидальность русла.

Morozyuk Bohdan,
Ph.D., associate professor Melnyk Oleksandr,
Lesya Ukrainka Eastern European National University

REMOTE MONITORING OF CHANNEL PROCESSES OF THE WEST BUG RIVER IN THE BORDER OF THE VOLYN REGION

The article deals with the causes of changes in horizontal and altitude position of the river beds, the destruction of the banks and bottom of the rivers, the impact of these processes on human economic activity, emphasizes the importance of timely detection of such processes, especially on the border rivers. The importance of continuous monitoring of natural objects, which is possible due to modern remote sensing of the Earth with the help of the Copernicus project of the European Space

Agency (ESA) and the Sentinel-2 data, as well as their comparative analysis with the results of topographic-geodetic surveys, is emphasized.

The calculations of the meandering of the channel are made in the work, the geotopographic parameter is investigated. Six methods have been analyzed, their disadvantages and advantages in use, and one that is versatile for medium and small scale applications has been selected. Measurements of the sinewave index, in particular the Muller component of the sinewave index, are used, which determines what percentage of deviation of the river bed from a straight line is due either to a hydraulic factor in the valley or to topographic obstacles. Sinus indices were analyzed, with the help of which the indices of the winding channel of the Western Bug River in the length of 25 km were calculated. A significant increase of the tortuosity index by five segments between settlements Novougruzhske and Guscha was established, however, the average tortuosity values in this area practically did not change.

The task was to obtain regular data, to set up areas for more detailed geomorphological, engineering-geological and geodetic surveys in order to implement coast-strengthening measures. The article emphasizes the need for improvements in the complex analysis of Quaternary sediment maps, especially the construction of accurate digital terrain models, which will allow forecasting the changes of the channel during the flood.

Key words: satellite imagery; geodesy; river processes; meanders; sinusoidal channel.

REFERENCES

1. Burshtynska Kh.V. Monitorynh ruslovykh protsesiv ta povenevykh yavlyshch riky Dnister za kosmichnymy zobrazhenniamy / Kh. Burshtynska, L. Movchko, V. Shevchuk // Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva. – 2015. – Vyp. 1. – S. 124–128. {in Ukrainian}
2. Mahmood R. Assessment of temporal and spatial changes of future climate in the Jhelum river basin, Pakistan and India /R. Mahmood, M.S. Babel,S. JIA. // Weather and Climate Extremes, 10, c. 40–55.doi: 10.1016/j.wace.2015.07.002 {in English}
3. Obodovskyi O.H. Hidroloho-ekolohichna otsinka ruslovykh protsesiv (na prykladi richok Ukrainy). – K.: Nika-Tsentr, 2001. – 274 s. {in Ukrainian}
4. Chalov R.S. Ruslovykh protsessy / R.S. Chalov, N.Y. Makkaveev // - M.: MHU, 1986. – S. 264. {in Russian}
5. Lokhtyn V.M. O mekhanyzme rechnoho rusla / V.M. Lokhtyn// - Kazan,1985. - S. 76. {in Russian}

6. Kondratev A.N. Prychyny obrazovanyia yzvylystosty: meandryrovanye rek y druhykh pryrodnykh potokov / A.N. Kondratev // Yzvestyia A.N. Seryia Heohrafycheskaia. – 2000. – No 4. – S. 42–44. {in Russian}
7. Blackwell W. Tools in fluvial geomorphology / W. Blackwell, G.M. Kondolf, H. Piegay // Advancing river restoration and management. Second Edition, 2003. – pp. 541. [in Ukrainian]
8. Buffington J.M. Geomorphic classification of rivers /J.M. Buffington, D.R. Montgomery, J. Shroder, E. Wohl // Treatise on Geomorphology. Fluvial Geomorphology, 2013. - Vol. 9.- pp. 730-767. doi:10.1016/B978-0-12-374739 - 6.00263-3. {in English}
9. Grenfell M.C. Mediative adjustment of river dynamics: The role of chute channels in tropical sand-bed meandering rivers /M.C. Grenfell, A.P. Nicholas, R. Aalto// Sedimentary Geology, 2014. –Vol. 301. – pp. 93-106. doi:10.1016/j.sedgeo.2013.06.007. {in English}
10. Burshtynska Kh.V. Doslidzhennia horyzontalnykh zmishchen chastyny richky Dnister z vykorystanniam danykh DZZ ta HIS-tekhnologii / Kh.V. Burshtynska, S.K. Tretiak, M.K. Halochkin // Heodynamika (vkhodyt do naukometrychnoi bazy Web of Science). – 2017. r. - Vypusk 2(23). - S. 14-24. doi: 10.23939/jgd2017.02.014. {in Ukrainian}
11. Burshtynska K.H. Monitoring of the riverbeds of rivers Dniester and Tisza of the Carpathian region / K.H. Burshtynska, V. Shevchuk, S. Tretiak, V. Vekliuk //XXIIIISPRS Congress, Commission VII (Vol. XLIB7) 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. -p. 177–182, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B7-177-2016 {in English}
12. Burshtynska Kh.V. Monitorynh zmin rusla richky Stryi z vykorystanniam HIS-tekhnologii / Kh.V. Burshtynska, S.K. Tretiak, V.M. Shevchuk// Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva, vypusk I (35). – 2018. - S. 138-146. {in Ukrainian}
13. ESA Sentinel Online. [Elektronnyiresurs] – Rezhymdostupudoresursu: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>. {in English}
14. Mueller, J.R. An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes./ J.R. Mueller // Annals of the Association of American Geographers, 1968, Vol.58, No.2, 371-385. {in English}