

Б.В. Киндюк, В.А. Овчарук

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКИ СЕРЕТ

Рассмотрены вопросы строения гидрографической сети реки Серет, рассчитаны её топологические характеристики и исследована их динамика во времени.

Постановка задачи

Река Серет является важной водной артерией, протекающей по территории Тернопольской области. Этот водоток широко используется в гидроэнергетике, орошении, водоснабжении, рыборазведении и других областях хозяйственной деятельности. Вместе с тем, гидрографическая сеть р. Серет является слабо изученной и отсутствуют данные о топологических характеристиках этого водотока. В настоящее время появились методы гидрографической индикации, которые могут быть использованы для решения этой задачи.

Анализ публикаций

Достаточно подробное исследование характеристик речной сети р.Серет выполнено в 60-х годах прошлого века М.С.Каганером [6] и Н.И.Дроздом [7]. Вопросы геоморфологии долины этого водотока изучались П.М.Цысем [10], К.И.Геренчуком [2], а неотектоники – Гофштейном И.Д. [3]. С момента опубликования этих работ прошло от 25 до 40 лет. К сожалению, за этот период появилось только одно фундаментальное исследование И.П.Ковальчука [4], которое посвящено этому вопросу. Исходя из этого, необходимо продолжить эти разработки и более детально изучить топологию этого водотока.

Изложение материалов исследования с полным обоснованием выполненных работ

Река Серет берёт своё начало из родников в балке у с. Ныжчэ на высоте 368 м, находящейся на Волыно-Подольской возвышенности. Впадает в р. Днестр с левого берега, на 921-ом км от устья у с. Городок. Длина реки 248 км, площадь водосбора 3900 км², средний уклон 0,39‰.

По своему географическому положению водосбор р. Серет находится на Тернопольском плато, являющемся частью Волыно-Подольской возвышенности. Гидрографическая сеть рек этого региона является классическим примером параллельного плана её рисунка. Общей чертой рек Волыно-Подоллии является их меридиональное направление и наличие угла, равного примерно 45° , под которым они впадают в Днестр.

Согласно существующей теории развития рельефа этого региона, современная гидрографическая сеть реки Серет сформировалась под влиянием двух поднятий Подольской плиты [2, 3, 10]. Одновременно с этими тектоническими колебаниями происходил процесс регрессии, существовавший на этой территории в период сармата, древних морей [3, 10]. Первое из значительных поднятий И.Д.Гофштейн [3] относит к раннему плейстоцену, а его амплитуда составила 60-70 м. Второе из поднятий охватило всю исследуемую территорию и по времени оно пришлось на поздний плейстоцен. Уход с этой территории Сарматского моря привел к тому, что первоначально древние водотоки двигались за кромкой берега на юго-восток. Позже, под действием поднятий Подольской плиты, они изменили направление своего течения с юго-восточного на меридиональное. Доказательством реальности этих событий является то, что верховья р. Серет сохранили древнее юго-восточное направление. Достаточно резкий поворот направления течения произошел в районе с. Ореховка и река начала двигаться на юго-запад. Поднятие подстилающей поверхности нашло своё отражение в двух особенностях строения речной сети. Первое – достаточно резкий характер перехода от мягких форм рельефа к глубоким долинам. Это сказывается на увеличении скоростей течения и форме живого сечения русла. Все эти признаки свидетельствуют об омоложении рельефа вследствие новейших его поднятий [3]. Второе – хорошо прослеживаемое изменение характера долины водотока от г. Тернополь до устья. Так, если в верхней части водосбора Серет протекает по плоской и болотистой местности, то ниже г. Тернополь он имеет вид горной реки. Начиная с этого места, долина водотока приобретает каньйоноподобную форму и становится V-образной. На отдельных участках она сужается до 0,5-0,8 км. Склоны долины могут достигать в высоту до 100-115 м и имеют значительную крутизну. От г. Чертков и до устья берега реки во многих местах становятся отвесными.

Второе из поднятий Волыно-Подольской плиты было настолько мощным, что изменило характер долины даже такой крупной реки, как Днестр [3]. Так, на Подольском участке, река движется по глубокому каньону с мощными меандрами.

Другой важной характерной чертой строения гидрографической сети р. Серет является наличие на её водосборе следов многочисленных перехватов. Так, в нижней части бассейна этой реки, на расстоянии 10 км от её устья, в нее впадает р. Дуба с площадью водосбора равной 229 км². Этот водоток дважды пострадал от перехватов. В первый раз верхний отрезок этой реки перехватила р. Черкаска с площадью бассейна равной 96,2 км². Второй из перехватов более сложен по своей сущности. По мнению К.И.Геренчука [2], ранее р. Дуба впадала в р. Днестр, однако, активная эрозионная деятельность одного из оврагов р. Серет изменила её направление. Этот водоток на расстоянии всего в 1,5 км от р. Днестр был им перехвачен эродирующим оврагом и стал притоком р. Серет.

В состав гидрографической сети исследуемого водотока входит 11 основных рек (рис. 1). Их подробные морфометрические характеристики приведены в таблице 1. Так, наибольшим притоком является р. Гнезна с площадью водосбора 111 км² и длиной 81 км. К достаточно крупным, по своим размерам, относятся реки Луг и Дуба, имеющие площади водосбора 228 км² и 229 км² соответственно (табл. 1). Уклоны водотоков изменяются от 0,77‰ у р. Черкаска до 2,8‰ у р. Белая. Наибольшая средняя высота водосбора отмечается на р. Вятына – 406 м, а наименьшая – 277 м на р. Храмова.

Для бонитировки гидрографической сети р. Серет использована схема, предложенная Р.Е.Хортоном [9] и усовершенствованная Гарцманом И.Н. [1]. Подробное изложение этой методики выполнено в работе автора [5]. Согласно этой схеме бонитировки р. Серет с места впадения р. Вятына у с. Ореховка имеет третий уровень иерархии ($\Pi_i = 3$). Величина порядка реки увеличивается на единицу и становится равным четырём после слияния р. Серет с р. Луг, которая имеет третий уровень иерархии. Ниже этой точки в Серет впадают реки Нестеровка и Должанка, соответствующие второму уровню иерархии ($\Pi_i = 2$) и не изменяющие порядок основного водотока. В районе с. Варваровцы река Серет сливается с р. Нишла, имеющей третий уровень иерархии. По используемой в настоящей работе схеме бонитировки, в этом случае уровень иерархии р. Серет остается неизменным ($\Pi_i = 4$).

Следующим притоком р. Серет является река Гнезна, имеющая площадь водосбора 111 км² и четвёртый порядок.

Таблица 1

Основные параметры гидрографической сети рек бассейна р. Серет

№ п/ п	Река	Пло- щадь водо- сбора F_i , км ²	Поря- док водо- тока Π_i	Дли- на реки L_i , км	Ук- лон русла I_i , ‰	Сред- няя высота m	Колич. при- токов 1-го поряд- ка, S_i	Энтро- пия реч- ной сети H_i
1	р. Вятына	56,3	2	23	2,3	406	6	2,31
2	р. Луг	228	3	22	1,50	402	4	11,16
3	р.Нестеровка	104	2	16	1,25	381	3	4,28
4	р. Должанка	69,6	2	25	1,24	369	7	4,11
5	р. Нишла	107	3	18	2,00	352	2	5,83
6	Р Гнезна	1111	4	81	1,00	340	77	45,9
7	р. Гнилая Рудка	98,1	4	19	1,00	350	13	8,74
8	р. Белая	90,2	3	23	2,80	355	2	3,39
9	р. Черкаска	96,2	2	25	0,77	330	4	4,61
10	р. Дуба	229	3	44	2,50	288	11	9,7
11	р. Храмова	80,5	3	20	1,45	277	5	3,54
12	р. Серет	3900	5	248	1,41	348	235	137

Слияние двух однопорядковых водотоков у с. Зэлэнэ увеличивает уровень иерархии р. Серет и он становится равным пяти. Это значение $\Pi_i = 5$ р. Серет сохраняет до своего впадения в р. Днестр. Промежуточные притоки – р. Гнилая Рудка ($\Pi_i = 4$), р. Белая ($\Pi_i = 3$), р. Черкаска ($\Pi_i = 2$) и р. Дуба ($\Pi_i = 3$) имеют меньшие уровни иерархии и не изменяют порядок основной реки.

Результатами бонитировки р. Серет позволили выполнить расчеты по всем значениям Π_i следующих гидрографических характеристик: числа притоков S_i , их средних длин $\bar{L}_i$ и площадей водосборов F_i . В качестве исходных данных использовались карты масштаба М 1:200 000, а также материалы по типизации рек Украины [7]. Это дало возможность получить итоговые параметры распределения топологических характеристик (табл. 2).

Анализ данных таблицы 2 показывает, что значения количества притоков, средних длин, площадей и уклонов образует геометрическую

прогрессию. Это даёт возможность рассчитать по методике, описанной в работе [5], величины трёх топологических показателей. Их численные составили: бифуркационного коэффициента $\delta_0 = 4,02$, длин $\lambda_0 = 2,91$, площадей $\varphi_0 = 1,32$ (табл. 2).

Таблица 2

Основные гидрографические и топологические характеристики р. Серет

Порядок водотока														
I			II			III			IV			V		
S_i	$\bar{l}_i$	F_i	S_i	$\bar{l}_i$	F_i	S_i	$\bar{l}_i$	F_i	S_i	$\bar{l}_i$	F_i	S_i	$\bar{l}_i$	F_i
247	3,53	1286	60	9,3	1721	15	28	2136	3	105	2822	1	242	3900

Ранее подобными исследованиями по р. Серет занимался И.П.Ковальчук [4]. Этому автору удалось собрать уникальный материал о структуре речной сети Подольских рек за почти 200-летний период. Так, И.П.Ковальчук сделал аналогичные вычисления или, как он их назвал - «срезы», относящиеся к 1772, 1855, 1925 и 1955 годам. Эти расчеты касались только двух показателей: количества притоков S_i и длин водотоков $\bar{l}_i$. Исходя из данных И.П.Ковальчука [4], выполнены вычисления величин бифуркационного коэффициента δ_0 и длин λ_0 по четырём временным срезам. К этой информации добавлены данные, полученные автором на 2001 год. Это позволило выполнить изучение динамики величин коэффициентов δ_0 и λ_0 во времени (табл. 3). К сожалению, в работе И.П.Ковальчука [4] отсутствуют данные о величинах площадей водосборов, рассчитанных по всем порядкам водотоков, что не позволило нам выполнить оценку динамики во времени показателя φ_0 .

Таблица 3

Основные топологические характеристики р. Серет за многолетний период

Годы Показатель	1772	1855	1925	1955	2001
δ_0	4,92	4,88	4,61	4,57	4,02
λ_0	3,35	3,29	3,14	3,10	3,07

Как хорошо видно из табл. 3, величины обоих показателей имеют явно выраженную тенденцию редукции во времени. Она незначительна в период с 1772 по 1855 год, однако становится достаточно явной к 1925 году. После этого года наблюдается тенденция значительной деградации сети во времени. Весьма примечательным является тот факт, что темпы этого процесса резко увеличились за последние 46 лет. Так, деградация сети за период с 1955 по 2001 год оказалась больше, чем за предыдущие 183 года, т.е. с 1772 г. по 1955 г. (табл. 3). Это свидетельствует об интенсификации достаточно неблагоприятного процесса отмирания речной сети под влиянием хозяйственной деятельности. Аналогичная тенденция прослеживается и с коэффициентом длин водотоков, который также уменьшается с $\lambda_0 = 3,35$ в 1772 г. до $\lambda_0 = 3,07$ в 2001 г.

Следующим этапом исследования стало применение методов информационного анализа к количественной оценке гидрографической сети р. Серет.

Распределение водотоков по территории можно рассматривать, как систему равновозможных событий, при неопределённости наших знаний о наступлении (проявлении) каждого конкретного события из них. Полной системой событий $X_1, X_2, \dots, X_n$ называется группа взаимно несовместимых событий, сумма вероятностей которых равна единице. Полная система событий X будет статистически задана, если для каждого события X_k задана вероятность его наступления P_k (где k изменяется от 1 до n). Эту полную систему символически можно записать в таком виде:

$$X = \begin{pmatrix} X_1 X_2 \dots X_n \\ P_1 P_2 \dots P_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Теория информации, в качестве меры неопределённости наших знаний о полной системе, использует понятие энтропии, которая рассчитывается по формуле:

$$H(X) = H(P_1, P_2, \dots, P_n) = - \sum_{k=1}^n P_k \lg P_k, \quad (2)$$

где $H(X)$ – значение энтропии.

Логарифм в выражении (2) может быть взят при любом основании, а вероятности P_k подчинены условию:

$$\sum_{k=1}^n P_k = 1, \quad (3)$$

где n – число членов ряда.

Выражение (2) получило название статистической энтропии полной системы. Исторически оно заимствовано из классической физики, где аналогичное выражение по предложению Больцмана, употребляется для характеристики термодинамических систем [8].

Эта теоретическая база может быть использована при описании распределения гидрографических характеристик на территории речного водосбора. По теории Р.Е.Хортонa [9] система водотоков представляет собой множество соподчиненных элементов, которые находятся между собой в определённых количественных соотношениях. Для введения системы топологии пространства, заполненного различными водотоками, необходимо выделить в нём простейшие элементы. Говоря иным языком, нужна топологическая характеристика, которая будет своеобразным метрическим шагом или мерой системы. При этом она должна удовлетворять двум свойствам. Первое свойство – это поддаваться дальнейшему делению (разрезанию, уменьшению), т.к. иначе будет потеряна её качественная определённость. Из теории информационных систем [8] известно, что такие элементы формируют открытые множества. Второе свойство состоит в возможности составить из элементов открытых множеств, по определённым правилам, произвольную систему водотоков. Исходя из этого, можно ввести понятие идеализированной системы речных водотоков. Это означает две вещи: первое – система не включает в себя никаких других объектов, кроме водотоков (условно считается, что отсутствуют озёра, болота, старицы). Второе – в системе нет точек, в которых сливается больше двух водотоков, т.е. любые две точки соединяются единственным образом. Тем самым из рассмотрения исключаются сложные дельтовые образования и те редкие случаи, когда в одной точке сходятся более трёх потоков. Если смотреть на систему против течения, то внешние элементы заканчиваются истоком, а внутренние – разветвлением. Тогда по схемам Р.Е.Хортонa, Р.Е.Шайдеггера, Н.А.Ржаницина [5], к внешним элементам относятся только притоки первого порядка Π_1 , а к внутренним – элементы более высоких порядков ($\Pi_i > 1$).

В соответствии с изложенным, в пространстве сети потоков можно выделить два открытых множества, представляющих его внешний (D) и внутренний (T) отделы. Первый из них включает в себя только элементы Π_1 , а отдел T – только $\Pi_i > 1$. Элементы из T могут быть образованы

тремя различными способами: первый из них – путём слияния двух внешних элементов Π_i , тогда новый элемент приобретёт порядок $I = 2$. Второй вариант возникает в случае слияния элемента внутреннего отдела с элементами внешнего, тогда новый элемент из множества T примет порядок $I > 2$. Третий случай может быть, если сливаются два элемента внутреннего отдела, тогда вновь образованный поток имеет порядок $I \geq 3$. Таким образом, внутренний отдел является упорядоченной структурой и состоит из множества подразделов, каждый из которых включает элементы определённого порядка. Речные системы отличаются большим разнообразием, поэтому для оценки их количественной структуры можно рассматривать имеющуюся в них степень разнообразия или упорядоченности. Такую количественную характеристику структуры водотоков можно получить, если использовать введённую Шенноном [1, 8] для марковских цепей меру количества разнообразия, называемую энтропией. Применение к описанию речных систем этого понятия является вполне допустимым, т.к. структуры речных систем эквивалентны марковским цепям. Для практических расчетов наиболее удобно в качестве меры мощности звеньев речной сети использовать количество притоков первого порядка Π_i . Гидрографическая сеть может рассматриваться как система графов, образующих определённое дерево элементов.

Пусть в точке X_I сливаются два элемента S_1 и S_2 , тогда их вероятностная мера P_I представляет собой:

$$P_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2}, \quad (4)$$

аналогично вероятностная мера P_2 определяется по формуле:

$$P_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2}. \quad (5)$$

Тогда, по определению Шеннона, энтропия такой системы рассчитывается по формуле:

$$H_I = -P_1 \log P_1 - P_2 \log P_2 = -(P_1 \log P_1 + P_2 \log P_2). \quad (6)$$

В случае, если речная сеть состоит из более сложной дизъюнкции различных графов, то её общая энтропия определяется суммированием по

всем точкам слияния. Например, энтропия в точке X_2 после добавления звена S_3 рассчитывается по формуле:

$$H_2 = -\frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \log \frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2 + S_3} - \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \log \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3}, \quad (7)$$

где H_2 – суммарная энтропия в точке X_2 .

В качестве практического примера выполнены расчеты значений энтропии для бассейна р. Серет до замыкающего створа с. Городок. Для реализации этой задачи на первом этапе исследования выполнено построение граф-дерева этого водотока (рис. 1). Далее, используя формулы (4–7), сделаны расчеты величин H_i по каждому из 7 основных притоков р. Серет. Численные значения этой характеристики изменяются от 2,31 у р. Вятна до 137,2 у р. Серет (см. табл. 1).

Располагая величинами энтропии по 12 водотокам, несложно построить графики связей между значениями H_i и такими морфометрическими характеристиками, как площадь водосбора, длина реки и её уклон.

С целью оценки точности этих зависимостей по каждой из них рассчитывался коэффициент корреляции R ; его численные значения для функций $H_i = f(F_i)$ и $H_i = f(L_i)$ оказались больше 0,9, что касается величин уклонов, то зависимость между ними и энтропией практически отсутствует.

Полученные значения коэффициентов корреляции достаточно высоки и позволяют утверждать наличие тесной связи величин H_i с морфометрическими показателями. Практически это означает, что структурные оценки этих речных систем могут служить дополнительным индикатором их состояния.

Выводы

1. Исследовано происхождение современной гидрографической сети реки Серет, показана роль поднятий Подольской плиты в её формировании.

2. Используя схему Р.Е.Хортон–И.Н.Гарцмана, выполнена бонитировка этого водотока и рассчитаны уровни иерархии речной системы Серета.

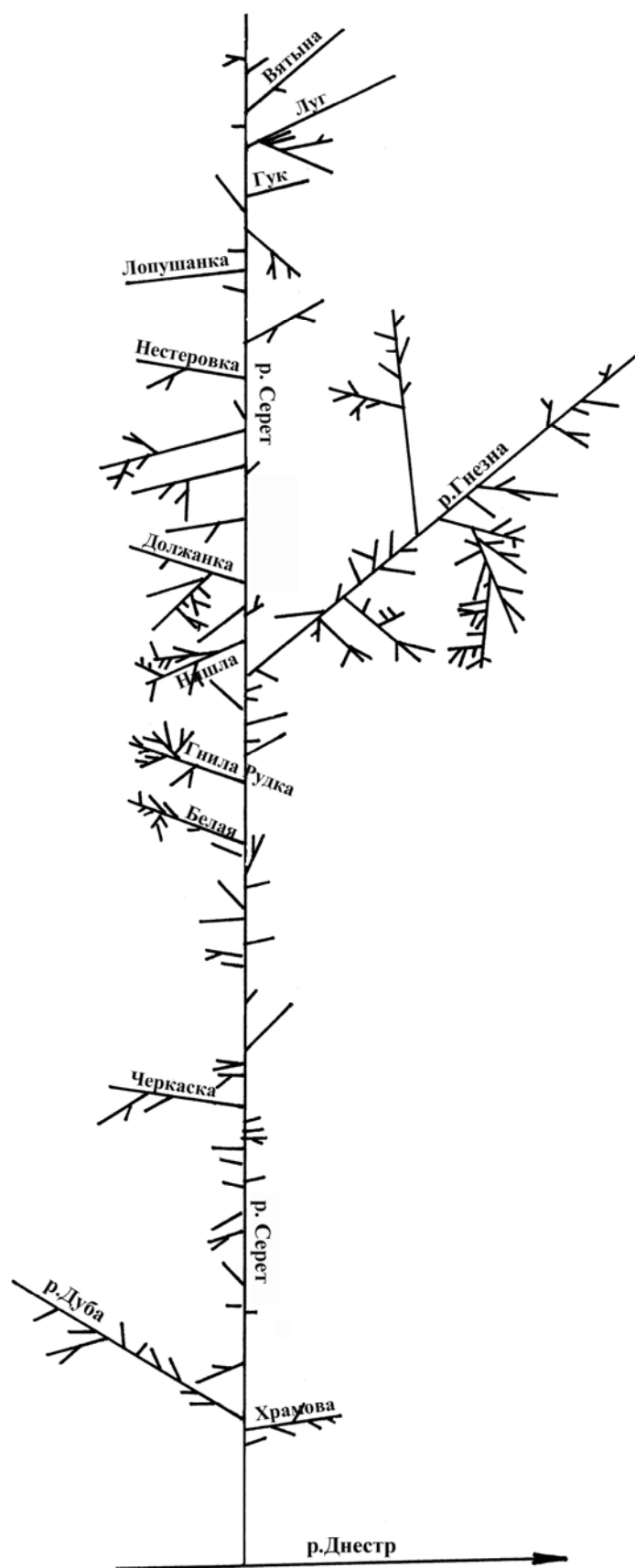


Рис. 1. Схема гидрографической сети (граф-дерево) р. Серет

3. Исходя из данных И.П.Ковальчука и расчетов авторов, исследована динамика двух топологических показателей (коэффициента бифуркации и длин) во времени.

4. Показано наличие тенденции деградации речной сети, резко усилившейся за последние 46 лет.

5. Выполнены расчеты величин энтропии для основных притоков реки Серет и показана их связь с морфометрическими характеристиками речных бассейнов.

Задачей дальнейших исследований является дальнейшее изучение структурно-информационных мер этой речной системы и выявление их возможных связей с характеристиками максимального стока.

* *

Розглянуто питання будови гідрографічної мережі ріки Серет, розраховано її топологічні характеристики та досліджено їх динаміку у часі.

* *

1. Гарцман И.Д. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования. Водные ресурсы. – № 3. – 1973. – С. 109-123.
2. Геренчук К.И. Тектонические закономерности в орфографии и речной сети Русской равнины. – Изд-во Львов. ун-та, 1960. – 241 с.
3. Гофштейн И.Д. Неотектоника западной Вольно-Подольи. – К.: Наук. думка, 1979. – 157 с.
4. Ковальчук И.П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. – Л.: Ін-т українознавства, 1997. – 440 с.
5. Киндюк Б.В. Гидрографическая сеть и ливневой сток рек Украинских Карпат. – О.: ТЭС, 2003. – 221 с.
6. Ресурсы поверхности вод СССР. – Т. 6. – Вып. 1. – Западная Украина и Молдавия. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 492 с.
7. Материалы по типизации рек Украинской ССР. – Т. 2 / Под ред. Н.И. Дрозда. – К.: Изд-во АН УССР, 1953. – 348 с.
8. Хаггерт П. Сетевые модели в географии // Модели в географии. – М.: Прогресс, 1971. – С. 287-343.
9. Хортон Р.Е. Эрозийное развитие рек и водосборных бассейнов. – М.: Из-во иностранной лит-ры, 1948. – 156 с.
10. Цысь П.М. Геоморфологія УРСР. – Вид-во Львів. ун-ту, 1962. – 233 с.

Одесский политехнический университет,

Одесский государственный экологический университет