

УДК 556.16.047, PACS 92.40.Gc

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СТОКА НАНОСОВ РЕК ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ДНЕСТРА

**С. В. Мельник**<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук, доц. каф. прикладной экологии и гидрогазодинамики  
**Н. С. Лобода**<sup>2</sup>, проф., д-р. геогр. наук, зав. каф. гидроэкологии и водных исследований

<sup>1</sup> *Одесский национальный политехнический университет,  
пр. Шевченко, 1, 65044, Одесса, Украина, melnik\_sv@ukr.net*

<sup>2</sup> *Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина*

Разработаны уравнения множественной регрессии для расчета среднего многолетнего модуля стока наносов верхней и средней части р. Днестр. Основными предикторами являются: средняя высота водосбора, доля подземного питания рек, водность реки, расстояние от ближайшего водоема, расположенного выше по течению, уклон. Полученные уравнения имеют региональный характер и описывают закономерности пространственного распределения стока наносов по районам, выделенным на основе кластерного анализа: Карпатский (правобережные притоки), Подольский левобережный и Приднестровский левобережный, разделяемые Толтрами. Установлено, что для рек Подолии (левобережные притоки) целесообразно проводить расчеты стока наносов по фазам водности. Точность расчетов при применении разработанных уравнений выше по сравнению с ранее предложенными методиками.

**Ключевые слова:** сток наносов, модель множественной линейной регрессии, выбор оптимальных предикторов

### 1. ВСТУПЛЕНИЕ

Изучение современного стока наносов имеет практическое значение для разработки мероприятий по регулированию и стабилизации флювиальных геоморфологических процессов при разных видах хозяйственной деятельности (строительство водохранилищ, мостов, объектов водоснабжения и другое), а также при разработке мероприятий по борьбе с наводнениями. Во всех этих случаях необходимо иметь достоверные сведения о режиме стока наносов, базирующиеся на данных многолетних наблюдений по твердому стоку рек [1, 2]. Имеющиеся ряды наблюдений, как правило, короткие и характеризуются значительными погрешностями измерений и наличием пропусков. Эти обстоятельства вызывают определенные трудности при разработке методов расчета и прогноза характеристик стока наносов.

Объем данных о стоке наносов значительно меньше, чем о стоке воды, как по количеству созданных створов наблюдений, так и по их продолжительности. В период с 1965 по 1975 гг. на украинской части бассейна р. Днестр наблюдения за наносами были организованы на 38 гидрологических постах. К 2010 г. их число сократилось до 25. Общее количество действующих гидрологических постов было на этот момент равно 64.

Недостаточно освещены наблюдениями по стоку наносов реки с площадью водосборов, превышающих 1000 км<sup>2</sup>. Значительная их часть находится на главной реке. Отсутствие или недостаток наблюдений за стоком наносов характерны для левобережных притоков Днестра от р. Верещицы до р. Золотой Липы и ниже р. Лядовой. На правобережных притоках, в горной части р. Днестр (от р. Ломницы до р. Быстрицы), расположены лишь два действующих поста, хотя эти притоки играют важную роль в формировании жидкого и твердого стока р. Днестр. Недостаточная изученность стока наносов ставит перед исследователями задачу по восполнению недостающей информации по стоку наносов.

Цель работы состоит в построении методики расчета стока наносов для притоков верхнего и среднего Днестра при отсутствии данных наблюдений.

Основным методом исследования является метод линейной множественной регрессии с пошаговым выбором оптимальных предикторов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: обоснован выбор расчетных периодов для расчета стока наносов на исследуемой территории, выявлены основные предикторы, определяющие формирование стока наносов, разработаны порайонные уравнения множественной линейной регрессии модуля;

дана оценка точности расчета характеристик стока наносов с использованием полученной методики.

Объектом исследования является сток наносов рек верхнего и среднего Днестра. Предмет исследования состоит в пространственно-временном обобщении результатов наблюдений за стоком наносов.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для расчета стока взвешенных наносов (данные по влекомым наносам отсутствуют) обычно используются методы картирования или построения региональных зависимостей, отражающих связи расчетных характеристик с количественными показателями факторов, влияющих на их формирование. Как правило, картированию подлежит мутность. (Мутность, согласно [3], “весовое содержание взвешенных наносов в единице объема смеси воды с наносами”). Метод построения карт мутности был предложен в 1939 г. Г. В. Лопатиным, впоследствии развит Г. И. Шамовым (1954), которым была построена для рек СССР карта изолиний средней мутности и разработаны поправочные коэффициенты к ней [4].

Вопросу формирования карт мутности рек Украины посвящены многолетние исследования Н. И. Дрозда и З. А. Горецкой. В 1966 году ими была опубликована первая карта мутности рек Украины [5], которая позднее была уточнена З. А. Горецкой [6]. Для отдельных рек и территорий карта средней многолетней мутности ( $г/м^3$ ) построена по данным для рек с площадью более  $200 км^2$  [7].

Сток речных наносов – это процесс, довольно заметно реагирующий на изменение уровня хозяйственной деятельности. Как показали исследования, выполненные С. А. Антоновой для большинства рассматриваемых рек, с 1965 г. намечился переход к новым условиям формирования наносов [8]. В связи с этим в работе было выполнено исследование характеристик твердого стока для двух периодов (до и после 1965 г.), в которых учитывались природные и хозяйственные изменения на водосборах рек. В 2004 г. в книге А. В. Яцыка [9] была опубликована карта мутности рек Украины, построенная по данным наблюдений на 170 постах для 100 рек.

Помимо построения карт изолиний разрабатывались региональные методики расчета для определения стока наносов в зависимости от факторов, определяющих этот процесс [10 - 16]. Влияние многих природных факторов можно

учитывать косвенно, посредством некоторого обобщенного коэффициента  $k_{эп}$ , называемого эрозионным. Обычно  $k_{эп}$  определяется обратным расчетом на основе имеющихся данных наблюдений. Распределение эрозионного коэффициента подчиняется закону географической зональности. Например, Б. В. Поляковым была составлена карта изолиний  $k_{эп}$  для европейской части СССР и Кавказа, а также установлена связь эрозионного коэффициента с характеристиками почвы. Эрозионные коэффициенты отдельно рассматриваемых территорий могут быть усреднены, например, И. А. Кузником [10] - в пределах Поволжья, Г. Н. Хмаладзе [11] - в пределах Армении, В. В. Сластихиным [12] - Молдавии, К. Н. Лисицыной [13] - для рек Северного Казахстана и Европейской территории союза.

Г. И. Швец предложил использовать эрозионный параметр, который должен отражать интенсивность смыва и размыва на водосборе, а также учитывать, по возможности, поступление продуктов этого процесса в речную сеть [14]. Для его получения используется метод прямой оценки условий, определяющих формирование склоновых наносов.

Особенности проявления эрозионных процессов можно учитывать посредством выделения особенностей формирования стока наносов на различных территориях с последующим районированием и построением региональных зависимостей. К такого рода обобщениям можно отнести схемы районирования европейской территории СССР, выполненные Н. Н. Бобровицкой [15], К. Н. Лисицыной и В. И. Александровой [16].

В работах Н. Н. Бобровицкой [15] в качестве факторов, от которых может зависеть сток наносов, рассматривались: модуль стока воды, средневзвешенный уклон, модуль стока воды 1 % обеспеченности, процент распаханности, лесистости, длина водотока, площадь водосбора, закарстованность, густота речной сети, процент зарегулированности стока и ширина водосбора.

Для территории Украины зависимости стока наносов от природных условий получены З. А. Горецкой [6]. В качестве основных факторов, определяющих формирование стока наносов, приняты: модуль стока воды, средневзвешенный уклон реки и глубина речной долины.

Общие закономерности стока наносов рек Украины и Днестра рассматривались в работах В. И. Вишневого, И. П. Ковальчука, В. В. Гребиня, О. В. Пыльпович, А. Б. Михнович, З. А. Розлач и др.

Пыльпович О. В. в результате хронологиче-

ского анализа изменений денудации бассейновых систем водосбора р. Днестр выделила два характерных периода [17]. Первый (с 1963 по 1980 гг.) характеризуется экстремально высокими показателями стока взвешенных наносов для Карпат, и связан, прежде всего, с интенсивной вырубкой леса в конце 60-х и до середины 70-х годов. Особенности второго (1980-2005 гг.) связаны с уменьшением интенсивности денудации водосборов карпатских притоков Днестра и некоторым увеличением интенсивности денудации в бассейновых системах Предкарпатья.

Ученые Киевского Национального университета занимаются исследованиями стока воды и наносов (Гребинь В. В.), изучением русловых процессов (Ободовский А. Г.), разработкой противопаводочных исследований и комплексным управлением водохозяйственными комплексами (Хильчевский В. К.). В работах В. В. Гребиня [18, 19] большое внимание уделено влиянию водности рек Украинских Карпат на сток наносов. Отмечено, что наличие и теснота связей модульных коэффициентов стока наносов и воды может изменяться в многоводные и маловодные фазы колебаний стока.

В работах зарубежных авторов проблемы расчета стока наносов рассматривались для Амазонки [20]; Таиланда - [21]; Турции - [22]; Кении - [23]; Новой Зеландии - [24]; Ирана - [25]. В этих работах к числу основных предикторов регрессионных моделей отнесены среднегодовой и максимальный расходы воды.

Факторы, влияющие на сток наносов в бассейне крупнейшей реки Колумбии (р. Магдалена), описаны в работе [26]. На основании применения методов многомерного статистического анализа данных авторы пришли к выводу, что среднегодовой и максимальный сток объясняют 58 % дисперсии данных по твердому стоку.

### 3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Традиционно Днестр делится на три части: верхнюю, среднюю и нижнюю. В работе [27] эти части предлагается выделять следующим образом: границы верхней части простираются до впадения в Днестр реки Золотая Липа, средней – от устья р. Золотая Липа до впадения р. Реут, и нижней - от устья р. Реут до Днестровского лимана. В данном исследовании рассмотрена часть бассейна реки Днестр от истока до впадения реки Каменка.

Согласно физико-географическому райони-

рованию правобережная (горная) часть бассейна р. Днестр [28] относится к географической стране Украинские Карпаты, левобережная (до впадения р. Серет) – к Западно-Украинской провинции лесостепной зоны, левобережная ниже впадения р. Серет и до реки Каменка включительно относится к Днестровско-Днепровской провинции лесостепной зоны. Элементами рельефа Западно-Украинской провинции является Ростоцко-Опольская возвышенность, а Днестровско-Днепровской - Подольская возвышенность.

Гидрологическое районирование [14] показывает, что притоки, берущие начало в Карпатах (правобережные), относятся к Днестровско-Прутской области повышенной водности. Левобережные притоки верхней части Днестра принадлежат Волынской подобласти повышенного стока. Левобережные притоки в среднем течении (Украина) отнесены к Правобережно-Днепровской области достаточной водности.

В соответствии с ландшафтно-гидрологическим районированием В. В. Гребиня [29] горная часть реки Днестр находится в Карпатской горной ландшафтно-гидрологической стране (Прут-Днестровская провинция). Левобережные притоки р. Днестр до р. Серет включительно рассматриваются как принадлежащие широколиственной лесной влажной ландшафтно-гидрологической зоне, Бужско-Днестровской провинции, Ростоцко-Опольскому возвышенному району. Левобережные притоки среднего течения р. Днестр расположены в лесостепной ландшафтно-гидрологической зоне, Днестровско-Днепровской провинции, Подольско-Приднепровском возвышенном районе.

Районирование годового стока р. Днестр, выполненное Н. С. Лободой при помощи факторного анализа и метода главных компонент [30] для периода с 1946 по 1986 гг., показало, что колебания годового стока рек на всей рассматриваемой территории носят синфазный характер. Ниже впадения р. Серет и до р. Каменка колебания стока являются синхронными. Более детальное районирование, выполненное авторами на базе кластерного анализа за период 1950-2006 гг. [31, 32], позволило выделить пять районов с синхронными колебаниями стока. Границы этих районов несколько менялись в зависимости периодов осреднения. Устойчивыми во времени оказались границы между физико-географической провинцией “Украинские Карпаты” и физико-географической областью “Ростоцье и Ополье”, а также между Западно-Подольской и Северо-Подольской областями (Рис. 1). Это позволило сформировать три

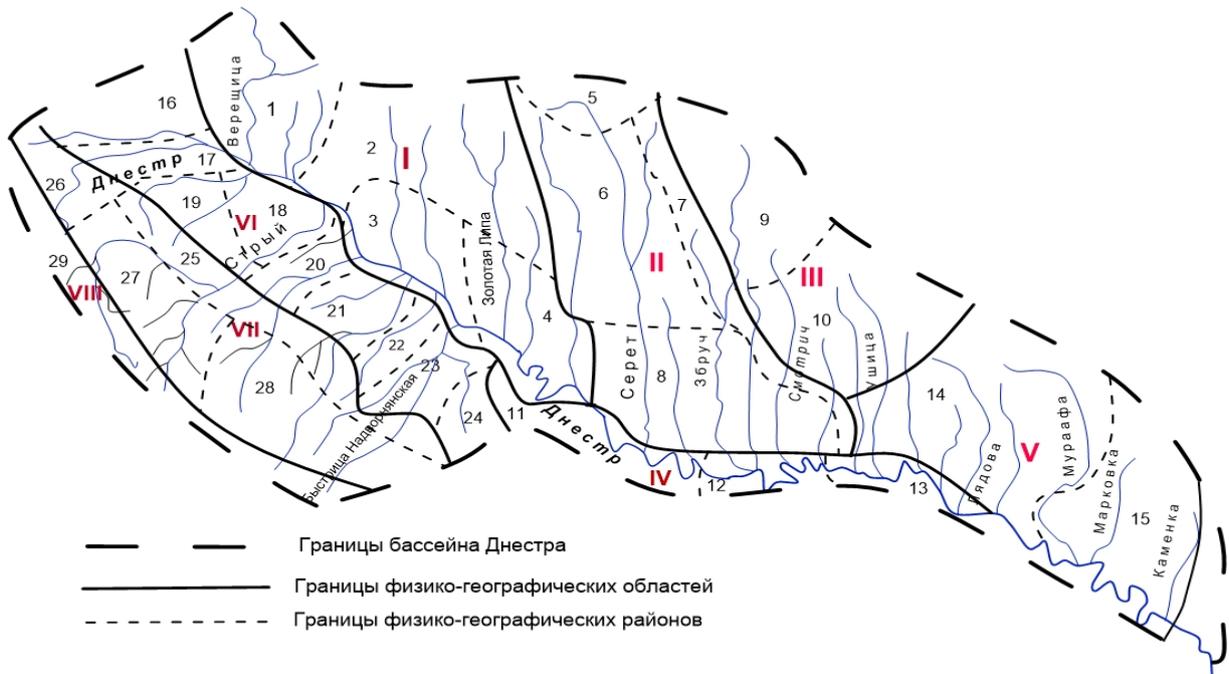


Рис. 1 – Физико-географическое районирование исследуемой территории по [33, 34] (названия областей и районов см. табл. 1)

Таблица 1 - Физико-географическое районирование исследуемой территории по [34].

Природная зона	Физико-географическая провинция	Физико-географическая область	Физико-географический район
Лесостепная зона (широколиственных лесов)	Западно-Украинская провинция	I. Расточье и Ополье	1. Щирецкий 2. Бибрско-Перемышлянский 3. Район Рогатинского Ополья 4. Район Приднестровского Ополья
		II. Западно-Подольская область	5. Вороняки 6. Тернопольский равнинный физико-географический район 7. Толтровый кряж 8. Западно-Подольское Приднестровье
		III. Северо-Подольская область	9. Авратинская возвышенность 10. Городокского-Хмельницкий
		IV. Прут-Днестровская область	11. Тлумач-Городенковский 12. Хотинской возвышенности 13. Кельменецкий
	Днестровско-Днепровская	V. Приднестровско-Подольская лесостепная	14. Могилевское Приднестровье 15. Ямпольское Приднестровье
Карпаты	Украинские Карпаты	VI. Область Предкарпатья	16. Санско-Днестровский 17. Верхнеднестровский 18. Стрыйско-Жидачевский 19. Дрогобычский 20. Присвичский 21. Ломницко-Болеховский 22. Прилуквинский 23. Быстрицкий 24. Быстричко-Прутский
		VII. Область Внешних Карпат	25. Краевоенизкогорье 26. Верхне-Днестровские Бескиды 27. Сколевские Бескиды 28. Скибовые (Внешние) Горганы
		VIII. Вододельно-Верховинная область	29. Стрыйско-Санская вершина

устойчивых района: Карпатский (вся провинция Украинские Карпаты и Прут-Днестровская область), Подольский (области Расточье и Ополе, также Западно-Подольская), Приднестровский (Приднестровско-Подольская лесостепная и Северо-Подольская области). Границы этих районов практически соответствуют границам ландшафтно-гидрологического районирования Украины, установленным В. В. Гребинем [29].

Районирование мутности, представленное в работе [14] указывает, что в среднем распределение мутности в пределах изучаемой территории изменяется в пределах от 200 до 500 г/м<sup>3</sup>, снижаясь в среднем течении до 100-200 г/м<sup>3</sup>. Эти данные считаются ориентировочными, фактические данные могут отличаться более, чем в 2 раза. В связи с большими погрешностями определения стока взвешенных наносов по картам разрабатывают региональные зависимости характеристик стока наносов от показателей условий их формирования. В качестве основных предикторов обычно используется расход воды и уклон.

Теснота связи в таких зависимостях может нарушаться за счет строительства плотин, что, как правило, уменьшает сток наносов; спрямление и обвалование русел, мелиорация поймы сопровождаются увеличением наносов. Вырубка лесов в Карпатах также приводит к возрастанию стока наносов. Особенностью полеводства в горах является то, что оно осуществляется на склонах значительной крутизны. Проведенные на горно-карпатской исследовательской станции наблюдения показали, что лишь за осенне-весенний период со вспаханного поля смывается до 200 куб. м грунта с 1 га [35]. По результатам исследований модуль смыва со склонов, занятых под полевыми севооборотами, составляет 4,2-12,8 т/га за год в равнинных бассейнах, 17-53 на возвышенностях и 67-97 т/га в год в горах.

Существенно влияют на экологическое состояние рек и развитие опасных экзогенных процессов и увеличение стока наносов гравийно-галечные карьеры, деятельность большинства из которых не санкционирована. Карьеры создают угрозу жилому хозяйству, магистральным и инженерным коммуникациям; активизируют карстовые процессы; остатки токсичных отходов, получаемые при разработке, попадают в подземные и поверхностные воды и загрязняют их.

Усиление стока наносов на равнинной части бассейна Днестра объясняется увеличением распаханности и усилением процессов карстообразования вследствие проводимых промышленных

разработок. Самый большой процент пахотных угодий приходится на Хмельницкую и Винницкую области, в которых под пашней занято 70-80 % от всей площади. В пределах равнинной части верхнего Днестра процент распаханых земель составляет 40-50 %.

Большое влияние на сток наносов оказывают водохранилища и небольшие водоемы, расположенные выше по течению (рис. 2), в которых оседает значительная часть естественных наносов. Изучая это явление Г. И. Швец [14] отметил, что водохранилища, построенные на больших реках, в 2-2,5 раза могут уменьшать сток наносов на расстояние до 20 км. Путь, на протяжении которого происходит восстановление естественного стока наносов, зависит от уклона реки. Чем больше уклон, тем больше требуемое для восстановления расстояние.



Рис. 2 – Расположение поста наблюдений у с. Великая Березовица на р. Серет и водоема перед ним.

По данным [36] в бассейнах таких рек Подолии как Гнилая Липа (длина 84 км) находится 103 водоема, Золотая Липа – 46 водоемов, Коропец – 28, Серет – 55. Изложенное указывает на необходимость учета такого антропогенного

фактора как искусственные водоемы в расчетах стока наносов. В качестве количественного показателя их влияния использовался предиктор –  $L$  (км) равный расстоянию от рассматриваемого створа до ближайшего (расположенного выше по течению) пруда или водохранилища.

Наличие водоемов выше створа наблюдений, расстояние до них и площадь водной поверхности водоема, а также глубина речной долины определялись по картам масштаба 1:100000, а затем уточнялись с помощью сервиса GoogleEarth. Во внимание принимались все водоемы, поскольку даже самые малые из них способны оказывать существенное влияние на количество наносов в реке ниже по течению. Для остальных показателей использовались данные из справочника [1].

С целью построения расчетного уравнения использовалась модель множественной линейной регрессии с пошаговым отбором предикторов [37] на основе программного комплекса Statistica. В условиях поиска оптимальных предикторов происходит расчет и анализ коэффициентов парной и множественной корреляции, оценка соотношений регрессионной и остаточной дисперсии исходной переменной, анализ частных коэффициентов корреляции.

К числу потенциальных предикторов отнесены: среднегодовой модуль стока –  $M_{cp}$  (л/с·км<sup>2</sup>); модуль максимального стока –  $M_{макс}$  (л/с·км<sup>2</sup>); показатель внутригодовой неравномерности стока –  $N_{год} = M_{макс} / M_{cp}$ ; расходный параметр –  $M_{cp} \cdot M_{макс}$ ; площадь бассейна реки –  $F_{бас}$  (км<sup>2</sup>); площадь водоема –  $S_{вод}$  (км<sup>2</sup>); средняя высота водосбора –  $H_{вс}$  (м); средний уклон реки –  $I_p$  (‰); глубина речной долины –  $h_{рд}$  (м); коэффициент извилистости реки –  $K_{изв}$ ; доля подземного стока  $K_{подз}$  (%), определяемая по методу

А. Н. Бефани [38]; проценты лесистости водосбора –  $K_{лес}$  (%), распаханности –  $K_{рп}$  (%), заболоченности –  $K_{заб}$  (%); логарифмы приведенных выше величин –  $\ln(K_{подз})$ ,  $\ln(K_{лес})$ ,  $\ln(K_{рп})$ ,  $\ln(K_{заб})$ ; порядок реки (по методике Р. Е. Хортон) в замыкающем створе –  $\Pi$ .

#### 4. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Последовательность набора предикторов для горных притоков Днестра представлена в табл. 2.

$F/F_{крит}$  – отношение текущего значения критерия Фишера к критическому.

Полученное уравнение линейной множественной регрессии для расчета модуля стока наносов рек Карпатского района за 1950-2010 гг. имеет вид

$$M_R = 388,2 - 0,149H_{вс} - 64,53\ln(K_{подз}) + + 0,0091M_{cp} \cdot M_{макс} - 3,401I_p + 0,159H_{рд}, \quad (1)$$

где  $H_{вс}$  -- средняя высота водосбора (м);  $K_{подз}$  – доля подземного стока;  $M_{cp}$  – средний многолетний модуль годового стока (л/с·км<sup>2</sup>);  $M_{макс}$  – средний многолетний модуль максимального стока (л/с·км<sup>2</sup>);  $I_p$  – средний уклон реки (‰);  $H_{рд}$  – глубина речной долины (м).

Поскольку модель линейна, то тесноту связи между результативным признаком и всеми факторами, включенными в модель, лучше всего характеризует совокупный коэффициент множественной детерминации, равный  $D = r^2$ , где  $r$  – коэффициент множественной корреляции ( $D$  показывает, какая часть вариации результативного признака обусловлена влиянием факторов, включенных в модель). Для уравнения (1)  $D = 0,71$ .

**Таблица 2** – Последовательность оптимального набора предикторов при построении уравнений множественной линейной регрессии.

Шаг	Предиктор	Рост величины коэффициента множественной детерминации $D$ при добавлении предикторов	$F / F_{крит}$
1	Средняя высота водосбора	0,21	1,84
2	Логарифм доли подземного стока	0,27	1,05
3	Произведение модуля среднего стока на модуль максимального	0,44	2,12
4	Средний уклон водосбора	0,58	2,02
5	Глубина речной долины	0,71	1,18

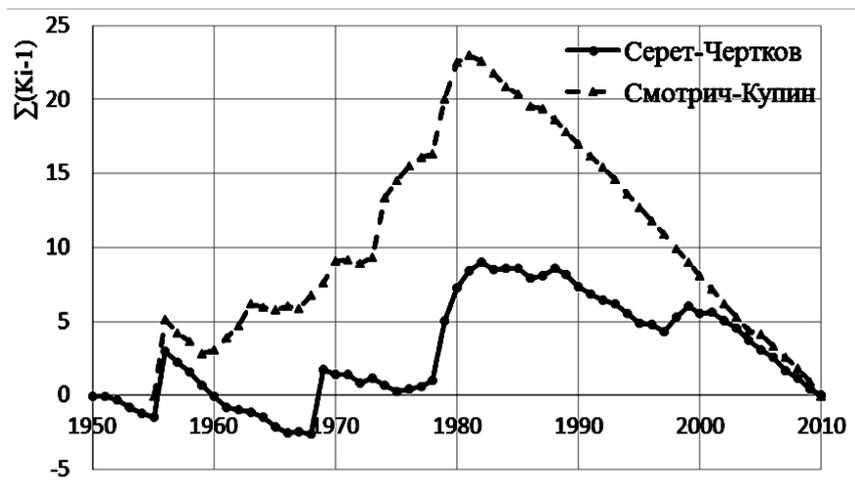


Рис. 3 - Разностные интегральные кривые стока наносов р. Серет - г. Чортков, р. Смотрич - с. Купин.

Основным предиктором является средняя высота водосбора (табл. 2), которая отражает, в первую очередь, распределение климатических факторов формирования стока воды и наносов по высоте местности. Второй по значимости предиктор учитывает роль подземного питания в формировании стока рек. Роль стока воды отражена в виде произведения  $M_{cp} \cdot M_{макс}$ . Уклон и глубина речной долины по своей статистической значимости занимают четвертое и пятое место. Глубина речной долины характеризует крутизну склонов и соответственно интенсивность склоновой эрозии.

При сравнении фактических и рассчитаны по уравнению (1) значений среднего многолетнего годового модуля стока наносов среднее относительное отклонение составляет  $\pm 17\%$ , что находится в пределах допустимой точности расчетов  $20\%$  [1, 2, 39].

Исследования, проведенные на базе использования модели множественной регрессии, для левобережных притоков р. Днестр позволили установить, что наилучшее соответствие расчетных и фактических данных может быть получено при расчете рек Приднестровского и Подольского районов, а также при раздельном рассмотрении положительной (1950-1981 гг.) и отрицательной (1982-2010 гг.) фаз колебаний стока наносов (рис. 3).

Для Приднестровского района полученные расчетные уравнения имеют следующий вид:

- период 1953-1982 гг. (положительная фаза стока наносов)

$$M_R^I = -23,9 + 14,22I_p + 0,0215F_{бас} + 0,08M_{cp} \cdot M_{макс}; \quad (2)$$

- период 1983-2010 гг. (отрицательная фаза стока наносов)

$$M_R^{omp} = 0,622 + 2,016I_p + 0,00101F_{бас} + 0,0028M_{cp} \cdot M_{макс}. \quad (3)$$

Коэффициент множественной детерминации  $D$  для уравнения (2) составляет  $0,98$ , для (3)  $D = 0,88$ .

Для Подольского района состав предикторов и их вклад в формирование стока наносов изменяется:

- период 1953-1982 гг.

$$M_R^n = 1393 - 425,5 \ln(K_{нодз}) + 0,207M_{макс} \cdot M_{cp} + 1,073H_{вс}; \quad (4)$$

- период 1983-2010 гг.

$$M_R^{omp} = 83,46 - 39,39 \ln(K_{нодз}) + 0,515L + 0,25H_{вс}, \quad (5)$$

где  $L$  (км) – расстояние от рассматриваемого створа до ближайшего (расположенного выше по течению) пруда или водохранилища. Для уравнения (4)  $D = 0,91$ , для (5)  $D = 0,93$ .

Влияние вышерасположенных искусственных водоемов проявляется только в отрицательную фазу колебаний стока наносов рек Подольского района. Чем дальше расположен водоем от рассмотренного створа, тем больше поток успевает восстановить свою транспортирующую способность.

На горных Карпатских притоках средняя высота водосборов исследуемых рек меняется от 520 м до 1000 м. В этих условиях решающую роль играет стойкость подстилающей поверхности к размыву, которая выше на верхних участках, состоящих в основном из кристаллических

пород. Ниже склоны Карпат на всем протяжении Днестровского бассейна характеризуются карпатскими песчаниками и только при выходе с гор реки образуют аллювиальные долины. Соответственно наносы уменьшаются с ростом высоты водосбора. Поэтому  $H_{вс}$  и  $I_p$  приведены со знаком минус в уравнении (1).

На реках Подольского района средняя высота бассейнов меняется от 320 м до 370 м, Приднестровского от 280 м до 320 м. Близко к поверхности расположены породы неогена и элювиально-делювиальные отложения. Решающую роль в этих условиях играет уже размывающая скорость потока, которая увеличивается с уклоном и высотой и благоприятствует смыву почв. Поэтому высотные показатели  $I_p$  в уравнениях (2, 3) и  $H_{вс}$  в (4, 5) меняют свой знак на противоположный по сравнению с (1).

Река - пост	Расчет по формулам Н.Н. Боброницкой [15]	Расчет по формулам С.А. Антониной [8]	Расчет по формулам С.Г. Кочубея [39]	Расчет по формуле (1)
Быстрица – с. Озимина	32	79	89	9
Стрый - с. Завадовка	18	8	19	2
Стрый - пгт. Верхнее Синевидное	12	14	30	11
Опор – г. Сколе	56	59	93	0
Головчанка – с. Тухля	176	9	56	13
Свича – с. Заречное	88	36	48	1
Лужанка – с. Гошев	38	174	118	3
Сукель – с. Тисов	68	89	56	6
Ломница – с. Перевозец	438	142	110	59
Быстрица Надворнянская – с. Песчаная	385	32	278	11
Среднее	132	65	90	11

**Таблица 3** - Средние относительные отклонения расчетных значений модуля стока наносов Карпатского района от фактических, полученных разными авторами, за весь период наблюдений, %.

Применение предложенного подхода позволяет значительно улучшить точность расчета модуля стока наносов (табл. 3).

## 5. ВЫВОДЫ

На территории Карпатских притоков Днестра русла рек подвержены незначительным водохозяйственным преобразованиям. В этом случае при расчетах количества наносов необходимо учитывать в основном физико-географические условия образования стока. На базе применения метода множественной регрессии установлены следующие предикторы: средняя высота водосбора, доля подземного стока, произведение модуля среднегодового стока на модуль максимального, средний уклон водосбора и глубина речной долины. Существенное влияние на сток наносов левобережных притоков оказывают выше расположенные водохранилища. Разработанные региональные расчетные методики позволяют существенно повысить точность расчета среднемноголетних величин модуля стока наносов: среднее относительное отклонение расчетных и фактических величин при применении предложенного подхода равно 11%, в то время как при использовании других методик эта величина изменяется в пределах от 65% до 132%. Рекомендуются использование разработанных региональных методик для расчета среднего многолетнего модуля стока наносов на реках верхней части водосбора Днестра при отсутствии данных наблюдений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия / под ред. М. С. Каганера. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 884 с.
2. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии природной среды. Обнинск: ВНИИГМИ, 1981 - 1991.
3. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1988. 38 с.
4. Шапов Г. И. Речные наносы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1954. 348 с.
5. Дрозд Н. И., Горещкая З. А. Карта средней мутности вод рек УССР // УкрНИГМИ: труды. Л., 1968. Вып. 60. С. 54–62.
6. Горещкая З. А. К определению характеристик стока взвешенных наносов рек Украины различной обеспеченности. // УкрНИГМИ: труды. Л., 1972. Вып. 119. С. 106–114.
7. Справочник по водным ресурсам. / под ред. Б. И. Стрельца. К.: Урожай, 1987. 304 с.
8. Антонова С. А. Условия формирования и расчет стока взвешенных наносов рек (на примере Украины): дис. канд. геогр. наук: 11.00.07. Одесса, 1984. 243 с.
9. Яцик А. В. Водогосподарська екологія: у 4 т., 7 кн. К.:

- Генеца, 2004. Т. 2, кн. 3-4. 384 с.
10. Кузник И. А. Материалы исследования твердого стока с малых водосборов в Поволжье // Труды Лаб. озерадения АН СССР, 1958. Т. 7. С. 47–56.
  11. Хмаладзе Г. Н. Взвешенные наносы рек Армянской ССР. Л.: Гидрометеоздат, 1964. 246 с.
  12. Сластухин В. В. Вопросы мелиорации склонов Молдавии. Кишинев.: Катря Молдовеняску, 1964. 212 с.
  13. Лисицина К. Н. Формирование стока наносов водотоков и заиление прудов на территории Северного Казахстана // Труды ГГИ, 1960. Вып. 86. С. 92–119.
  14. Швец Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 183 с.
  15. Бобровицкая Н. Н. Зависимость среднемноголетнего стока взвешенных наносов рек ЕТС от физико-географических факторов // Труды ГГИ, 1972. Вып. 191. С. 68–84.
  16. Лисицина К. Н., Александрова В. И. Сток наносов рек Европейской территории СССР // Труды ГГИ, 1972. Вып. 191. С. 23–51.
  17. Пилипович О. В. Эколого-геоморфологический мониторинг бассейновых систем верхнего Днестра: автореф. дис. к. географ. н.: спец. 11.00.04. Львов, 2007. 25 с.
  18. Ободовський О. Г., Онишук В. В., Гребінь В. В. та ін. Руслові процеси річки Лімниця. К.: Ніка-Центр, 2010. 256 с.
  19. Гребінь В. В., Василенко С. В., Чорноморець Ю. О. Внутрішньорічний розподіл стоку завислих наносів річок Українських Карпат // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2006. Том 11. С. 164-169.
  20. Guyot J., Filizola N., Quintanilla J., Cortez J. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 55–64.
  21. Lu X., Higgitt D. Recent changes of sediment yield in the upper Yangtze, China. *Environmental Management*, 1998, vol. 22, no. 5, pp. 697–709.
  22. Ozturk F. Suspended sediment yields of rivers in Turkey. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 65–72.
  23. Archer D. Suspended sediment yields in the Nairobi area of Kenya and environmental controls. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 37–48.
  24. Murray D., Hill J., Shankar U. Variation of suspended sediment yields around New Zealand: the relative importance of rainfall and geology Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 139–148.
  25. Ouri A. E., Ghorbani A. Factors controlling suspended sediment yield from catchments in central Ardabil Province, Iran. *African Journal of Agricultural Research*, October, 2011, vol. 6 (22), pp. 5112–5122.
  26. Restrepoa J. D., Kjerfveb B., Hermelina M., Restrepo Juan C. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River. *Journal of Hydrology*, 2006, no. 316, pp. 213–232.
  27. Дослідження Дністра: 10 років громадської екологічної експедиції «ДНІСТЕР» / редактор М. І. Жарких. Львів—Київ, 1998. 216 с.
  28. Коротун І. М., Коротун Л. К., Коротун С. І. Природні ресурси України: навч. посіб. Рівне: Принт Хауз, 2000. 184 с.
  29. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). К.: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
  30. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
  31. Мельник С. В., Лобода Н. С. Районирование бассейна верхнего Днестра по характеру колебаний годового стока на основе кластерного анализа // Український гідрометеорологічний журнал. 2010. № 6. С. 180-189.
  32. Мельник С. В., Лобода Н. С. Изменения в характере колебаний стока рек верхнего днестра в современных климатических условиях // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Геологія – географія – екологія. 2010. № 909. Вип. 32. С. 117-127.
  33. Національний атлас України / Ін-т географії НАН України; Держ. служба геодезії, картографії та кадастру; голов. ред. Л. Г. Руденко. К.: ДНВП "Картографія", 2007. 440 с.
  34. Хільчевський В. К., Гончар О. М., Забокрицька М. Р. та ін. Гідрохімічний режим та якість поверхневих вод басейну Дністра на території України / за ред. В. К. Хільчевського та В. А. Сташука. К.: Ніка-Центр, 2013. 256 с.
  35. Топольний Ф., Гелевера О., Моспан С. та ін. Екологічні проблеми сільського господарства Карпат // Праці НТШ. Т. XI. Екологічний зб.: Екологічні проблеми Карпатського регіону. Львів, 2003. С. 351–359.
  36. Паламарчук М. М., Закорчевна Н. Б. Водний фонд України: довідковий посібник / за редакцією В. М. Хорєва, К. А. Алієва. К.: Ніка-Центр, 2001. 392 с.
  37. Лобода Н. С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах: навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2010. 184 с.
  38. Бефани А. Н., Мельничук О. Н. Расчет нормы стока временных водотоков и горных рек украинских Карпат // УкрНИГМИ: труды. Л., 1967. Вып. 69. С. 105-137.
  39. Кочубей С. Г. Исследование формирования твердого стока рек украинских Карпат: дис. канд. геогр. К., 1971. 210 с.

## REFERENCES

1. Kaganer M. S. (Ed.) *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 6. Ukraina i Moldaviya. Vyp. 1. Zapadnaya Ukraina i Moldaviya* [Resources of a surface water of the USSR. T. 6. Ukraine and Moldova. Issue 1. Western Ukraine and Moldova]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 884 p.
2. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhyme i resursakh poverkhnostnykh vod sushy. Gosudarstvennyy komitet SSSR po gidrometeorologii prirodnoy sredi* [State water inventory. Annual data on the mode and resources of a surface water of sushy. State committee of the USSR on environment hydrometeorology]. Obninsk: USRHMI, 1981 - 1991.
3. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushy. Terminy i opredeleniya* [State standard specification 19179-73. Hydrology of land. Terms and definitions]. Moscow: Standards Publishing House, 1988. 38 p.
4. Shamov G. I. *Rechnye nanosy* [Fluvial sediments]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1954. 348 p.
5. Drozd N. I., Goretskaya Z. A. Map of average turbidity of waters of the rivers UkrSSR. *UkrNIGMI: Trudy – Proceedings UkrSRHMI*. Leningrad, 1968, issue 60, pp. 54–62. (In Russian)

6. Goretskaya Z. A. To definition of characteristics of drain of the weighed deposits of the rivers of Ukraine of different probability of exceeding. *UkrNIGMI: Trudy – Proceedings UkrSRHMI*. Leningrad, 1972, issue 119, pp. 106–114. (In Russian)
7. *Strelets B. I.* (Ed.). *Spravochnik po vodnym resursam* [Reference book on water resources]. Kiev: Urozhay, 1987. 304 p.
8. Antonova S. A. *Conditions of forming and calculation of drain of the weighed deposits of the rivers (on the example of Ukraine): cand. geogr. sci. diss. 11.00.07*. Odessa, 1984. 243 p. (In Russian)
9. Yatsyk A. V. *Vodohospodars'ka ekolohiya: v 4 t., 7 kn.* [Water management ecology: in 4 t., 7 books]. Kyiv: Heneza, 2004, vol. 2, bks 3-4. 384 p.
10. Kuznik I. A. Materials of research of sediment runoff from small reservoirs in the Volga region. *Trudy Lab. ozerovedeniya AN SSSR – Proc.s Lab. studying of lakes AS USSR*, 1958, vol. 7, pp. 47–56. (In Russian)
11. Khmaladze G. N. *Vzveshennyye nanosy rek Armyanskoy SSR* [The weighed deposits of the rivers of Armenian SSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1964. 246 p.
12. Slastikhin V. V. *Voprosy melioratsii sklonov Moldavii* [Questions of melioration of slopes of Moldova]. Kishinev.: Katrya Moldovenyasku, 1964. 212 p.
13. Lisitsina K. N. Forming of drain of deposits of water currents and silting of ponds in the territory of Northern Kazakhstan. *Trudy GGI – Proceedings SHI*, 1960, issue 86, pp. 92–119. (In Russian)
14. Shvebs G. I. *Formirovanie vodnoy erozii, stoka nanosov i ikh otsenka* [Forming of water erosion, drain of deposits and their assessment]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 183 p.
15. Bobrovitskaya N. N. Dependence of mean annual drain of the weighed deposits of the rivers ETU on physiographic factors. *Trudy GGI – Proceedings SHI*, 1972, issue 191, pp. 68–84. (In Russian)
16. Lisitsina K. N., Aleksandrova V. I. Drain of deposits of the rivers of the European territory of the USSR. *Trudy GGI – Proceedings SHI*, 1972, issue 191, pp. 23–51.
17. Pylypovych O. V. *Ecologic and geomorphologic monitoring of basin systems of upper Dniester: cand. geogr. sci. diss. 11.00.04*. L'viv, 2007. 25 p. (In Ukrainian)
18. Obodovskyy O. H., Onyshchuk V. V., Hrebin' V. V. *Russlovi protsesy richky Limnytsya* [River bed evolutions of the river of Lomnitsa]. Kyiv: Nika-Tsentr, 2010. 256 p.
19. Hrebin' V. V., Vasylenko Y. V., Chornomorets' Yu. O. Intra annual flow distribution in the lowered deposits of the rivers of the Ukrainian Carpathians. *Hidrolohiya, hidrokimiya i hidroekolohiya - Hydrology, hydrochemistry, hydroecology*. 2006, vol. 11, pp. 164–169. (In Ukrainian)
20. Guyot J., Filizola N., Quintanilla J., Cortez J. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 55–64.
21. Lu X., Higgitt D. Recent changes of sediment yield in the upper Yangtze, China. *Environmental Management*, 1998, vol. 22, no. 5, pp. 697–709.
22. Ozturk F. Suspended sediment yields of rivers in Turkey. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 65–72.
23. Archer D. Suspended sediment yields in the Nairobi area of Kenya and environmental controls. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 37–48.
24. Murray D., Hill J., Shankar U. Variation of suspended sediment yields around New Zealand: the relative importance of rainfall and geology Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996*. IAHS Publ., 1996, no. 236, pp. 139–148.
25. Ouri A. E., Ghorbani A. Factors controlling suspended sediment yield from catchments in central Ardabil Province, Iran. *African Journal of Agricultural Research*, October, 2011, vol. 6 (22), pp. 5112–5122.
26. Restrepo J. D., Kjerfve B., Hermelina M., Restrepo Juan C. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River. *Journal of Hydrology*, 2006, no. 316, pp. 213–232.
27. Zharkikh M. I. *Doslidzhennya Dnistra: 10 rokiv hromads'koyi ekolohichnoyi ekspeditsiyi «DNISTER»* [Researches of Dniester: 10 years of public ecological expedition DNIESTER]. L'viv—Kyiv, 1998. 216 p.
28. Korotun I. M., Korotun L. K., Korotun S. I. *Pryrodni resursy Ukrayiny* [Natural resources of Ukraine]. Rivne: Prynt Khauz, 2000. 184 p.
29. Hrebin' V. V. *Suchasnyy vodnyy rezhym richok Ukrayiny (landshaftno-hidrolozhichnyy analiz)* [Modern water relationships of the rivers of Ukraine (landscape and hydrological analysis)]. Kyiv: Nyka-Tsentr, 2010, 316 p.
30. Loboda N. S. *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya* [Calculations and syntheses of characteristics of annual flow of the rivers of Ukraine in the conditions of anthropogenous influence]. Odessa.: Ekologiya, 2005, 208 p.
31. Mel'nik S. V., Loboda N. S. Division into districts of the basin of upper Dniester on nature of fluctuations of annual flow on the basis of cluster analysis. *Ukr. gidrometeorol. ž. - Ukr. hydrometeor. j.*, 2010, no. 6, pp. 180–189. (In Russian)
32. Mel'nik S. V., Loboda N. S. Changes in nature of flow fluctuation of the rivers of upper Dniester in modern climatic conditions. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universitetu imeni V. N. Karazina, Heolohiya – heohrafiya – ekolohiya - The bulletin of Karazin Kharkiv National University, Geology - geography – ecology*, 2010, no. 909 (32), pp. 117–127. (In Russian)
33. Rudenko L. H. (Ed.). *Natsional'nyy atlas Ukrayiny* [National atlas of Ukraine]. In-t of geography NASU; State department of geodesy, cartography and cadastre. Kyiv: DNVP "Kartohrafiya", 2007, 440 p.
34. Khil'ches'kyy V. K., Honchar O. M., Zabokryts'ka M. R. etc. *Hidrokhimichnyy rezhym ta yakist' poverkhnevyykh vod baseynu Dnistra na terytoriyi Ukrayiny* [The hydrochemical mode and quality of surface water of the basin of Dniester in the territory of Ukraine]. Kyiv: Nika-Tsentr, 2013, 256 p. (Eds: V. K. Khil'chevskyy, V. A. Stashuk)
35. Topol'nyy F., Helevera O., Mospan S. Ecological problems of agriculture of the Carpathians. *Pratsi NTSh. T. XI. Ekolohichnyy zb.: Ekolohichni problemy Karpats'koho rehionu* [Works of STS. Vol. XI. Ecological collection: Ecological problems of the Carpathian region]. Lviv, 2003, pp. 351–359. (In Ukrainian)
36. Palamarchuk M. M., Zakorchevna N. B. *Vodnyy fond Ukrayiny* [Water fund of Ukraine]. Kyiv, Nika-Tsentr, 2001, 392 p. (Eds: V. M. Khoryev, K. A. Aliyev).
37. Loboda N. S. *Metody statystychnoho analizu u hidrolozhichnykh rozrakhunkakh i prohozakh* [Methods of statistical analysis in hydrological calculations and forecasts].

- Odessa: Ekolohiya, 2010, 184 p.
38. Befani A. N., Mel'nichuk O. N. Calculation of normal runoff of time water currents and mountain rivers of the Ukrainian Carpathians. *UkrNIGMI: Trudy – Proceedings UkrSRHI*. Leningrad, 1967, issue 69, pp. 105-137. (In Russian)
39. Kochubey S. G. *Research of forming of sediment runoff of the rivers of the Ukrainian Carpathians: cand. geogr. sci. diss.* Kiev, 1971, 210 p. (In Russian, unpublished)

## DEVELOPMENT OF A CALCULATION METHOD FOR THE SUSPENDED LOAD IN RIVERS OF UPPER AND CENTRAL DNIESTER

**S. V. Melnyk<sup>1</sup>**, Cand., Technic. Sci.,  
**N. S. Loboda<sup>2</sup>**, Prof., Dr Geogr. Sci.,

<sup>1</sup> *Odessa National Polytechnical University,  
1, Shevchenko Pr., 65044 Odessa, Ukraine, melnik\_sv@ukr.net*

<sup>2</sup> *Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine*

Studying of modern suspended load has practical value for the development of actions for regulation and stabilization of fluvial geomorphological processes. Work purpose: the creation of a regional method of calculation of suspended load in the absence of these observations. As a result of the use of the method of linear multiple regression with a step-by-step choice of optimum predictors the equations for calculation of average long-term modulus of suspended load of upper and middle part of the Dniester River are received. The main predictors are the average height of river basin, a share of groundwater inflow of the rivers, hydraulicity of a river, distance from the next reservoir located above on current, bias. The received equations have regional character and describe patterns of a spacing of suspended load on the areas allocated on the basis of cluster analysis: Carpathian (right-bank in-flows), Podolsk left-bank and Dniester left-bank, separated by Toltiri. It is established that for Podoliya's rivers (left-bank inflows) it is reasonable to carry out calculations of suspended load for water content phases. The accuracy of calculations at the application of the developed equations is higher in comparison with earlier offered techniques.

**Keywords:** a flow of suspended load, the model of multiple linear regression, choice of optimum predictors.

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СТОКУ НАНОСІВ РІЧОК ВЕРХНЬОГО ТА СЕРЕДНЬОГО ДНІСТРА

**С. В. Мельник<sup>1</sup>**, доц., к. техн. н., доц.,  
**Н. С. Лобода<sup>2</sup>**, проф., д. геогр. н.

<sup>1</sup> *Одеський національний політехнічний університет,  
пр. Шевченка, 1, 65044, Україна, melnik\_sv@ukr.net*

<sup>2</sup> *Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна*

Розроблені рівняння множинної регресії для розрахунку середнього багаторічного модуля стоку наносів верхньої і середньої частин р. Дністер. Основними предикторами є: середня висота водозбору, доля підземного живлення річок, водність річки, відстань до найближчої водойми розташованої вище за течією, нахил. Отримані рівняння мають регіональний характер і описують закономірності просторового розподілу стоку наносів по районах, що виділені на основі кластерного аналізу: Карпатський (правобережні притоки), Подільський лівобережний та Придністровський лівобережний, які розділені Товтрами. Встановлено, що для річок Подолії (лівобережні притоки) доцільно проводити розрахунки стоку наносів за фазами водності. Точність розрахунків при використанні розроблених рівнянь вище у порівнянні з раніш запропонованими методиками.

**Ключові слова:** стік наносів, модель множинної лінійної регресії, вибір оптимальних предикторів

Дата першого подання.: 31. 09. 2016

Дата надходження остаточної версії : 22. 11. 2016

Дата публікації статті : 24. 11. 2016