

Будник С.В.

## КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И МУТНОСТЬ ВОДЫ В СКЛОНОВЫХ ВОДОТОКАХ ПРИ СНЕГОТАЯНИИ

Отрыв и транспортировка наносов определяется энергетическим потенциалом водотока, это классическая аксиома, с которой согласны ученые всего мира. Способы описания самого отрыва и транспорта наносов основываются, в основном, на двух подходах: в первом считается, что основными являются силы давления, и схема расчета основана на применении критических скоростей потоков, во втором - ведущей считается сила трения, и расчет основан на учете критических касательных напряжений. Первый подход получил наибольшее распространение в странах СНГ [9, 19, 14, 16 и др.], второй в дальнем зарубежье [24 и др.]. В целом же подход к описанию отрыва частиц и транспорта наносов одинаков: определяется граничное значение скорости или касательного напряжения, при котором обеспечивается движение наносов. Задача исследователей состоит, в основном, в определении критических величин скоростей или касательных напряжений для различных агрофонов и почв [13, 15, 25 и др.]. Подобные исследования, как правило, проводятся эмпирическим путем, что тем самым компенсирует недостатки и упрощения обеих методов расчета, т.е. в принципе на таком уровне постановки задачи оба метода оказываются равноценными. Существуют также формулы, показывающие связь критических скоростей и касательных напряжений, например, формула В.П.Троицкого и Б.М.Николаева (по [18]).

Полное касательное напряжение  $\tau$ ,  $\text{H}/\text{M}^2$  для случая осредненного движения представляется суммой турбулентного  $\tau_t$ ,  $\text{H}/\text{M}^2$ , и вязкостного  $\tau_b$ ,  $\text{H}/\text{M}^2$ , трения:

$$\tau = \tau_t + \tau_b. \quad (1)$$

Как правило, расчет турбулентного трения производится по известной в гидравлике формуле [2, 12 и др.]:

$$\tau_t = \rho ghI, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{M}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h$  – глубина потока,  $\text{м}$ ;  $I$  – уклон водной поверхности.

Для расчета вязкостного трения в гидравлике применяют также широко распространенную формулу [2, 12 и др.]:

$$\tau_b = \mu v/h \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, определяемый по температуре воды согласно [2 и др.],  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $v$  – скорость потока,  $\text{м}$ .

Как правило, вязкостное трение при расчетах не учитывают, считая, что его величина мала, потому что влияние оно оказывает незначительное. Так, к примеру, по Н.Т.Джумагуловой [10] основываясь на принципе суперпозиции касательные напряжения в русловом потоке можно определить из соотношения:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau' + \tau'' + \tau''' + \tau''''', \quad (4)$$

где  $\tau'$  – касательное напряжение, учитывающее распределение взвешенных наносов по глубине;  $\tau''$  – касательное напряжение за счет турбулентности потока;  $\tau'''$  – касательное напряжение, учитывающее трение потока при начале движения наносов;  $\tau'''''$  – касательное напряжение на дне, возникающее за счет проницаемости русла, учитывающее взаимосвязь основного потока с подповерхностным.

По D.P.Finlayson и D.R.Montgomery [23] при расчете транспорта наносов следует учитывать не общие касательные напряжения ( $\tau_{\text{общ}}$ ), а эффективные касательные напряжения ( $\tau'$ ), откорректированные на влияние гидравлической шероховатости

$$\tau' = \tau_b - \tau'' - \tau''' - \dots - \tau''''''', \quad (6)$$

где  $\tau'' - \dots - \tau'''''''$  – потери движущей силы за счет гряд, гравия, древесных обломков, нагромождений валунов и т.д.

Учет вязкостного трения можно встретить в случае расчетов для турбулентных течений растворов полимеров и поверхностно-активных веществ, здесь полное касательное напряжение [1] может быть представлено в виде:

$$\tau = \tau_b - \tau_t + \tau_{\text{уп}}, \quad (5)$$

где  $\tau_b$ ,  $\tau_t$ ,  $\tau_{\text{уп}}$  – соответственно вязкие, турбулентные и упругие напряжения. При течении неньютоновской жидкости (воды)  $\tau_{\text{уп}} = 0$ . Считается, что снижение турбулентного трения в течениях с растворами МПАВ и полимеров связано с возникновением вязко упругости, приводящей к гашению турбулентных возмущений.

Исследования, проведенные ранее для склоновых водотоков [4, 5] показывают, что, несмотря на малые значения вязкостного трения его вклад в формирование смыва и размыва может быть существенным. Вероятно, здесь имеют значение особенности талой воды [19] – она более вязкая, по сравнению с водой, не подвергшейся замораживанию. В задачу настоящей работы входило проследить взаимосвязь составляющих касательного напряжения и мутности воды.



Проведены наблюдения за формированием склонового стока при снеготаянии в различные годы (1996-2006 гг.) в разных природных зонах (степная и лесостепная) на различных агрофонах и почвенных разностях (табл.1). Наблюдения проводились в опытном хозяйстве Института охраны почв УААН "Ударник" Лутугинского р-на Луганской обл. на черноземах обыкновенных на лессах, в Краснодонском р-не на черноземах на лессах, песках и мергелях, в Обуховском и Бориспольском р-не Киевской обл. на серых лесных почвах на лессе и Киево-Святошинском р-не на черноземах типичных на легком суглинке.

В качестве объектов наблюдения была принята сеть формирующихся непосредственно на склоне ручейков, заравниваемая при обработке почвы сельскохозяйственными машинами (т.е. первичная ручейковая сеть). По длине ручейка назначалось несколько створов измерения в зависимости от длины ручейка.

Измерения проводились в основном, в соответствии с рекомендациями гидрометслужбы [17 и др.], за некоторым исключением в соответствии с особенностями изучаемых водотоков. Скорость воды при невысокой мутности определялась жидкостями – индикаторами, при высокой – поплавками, для глубин потоков более 0,01 м применялась также микровертушка Х-6-М. Пробы воды на мутность отбирались батометром, принцип работы которого напоминает работу лабораторной груши. Измерение уклонов водной поверхности проводилось прибором нашей конструкции, основанном на принципе действия геодезических уровней [3]. Подробно методика исследований описана ранее [6].

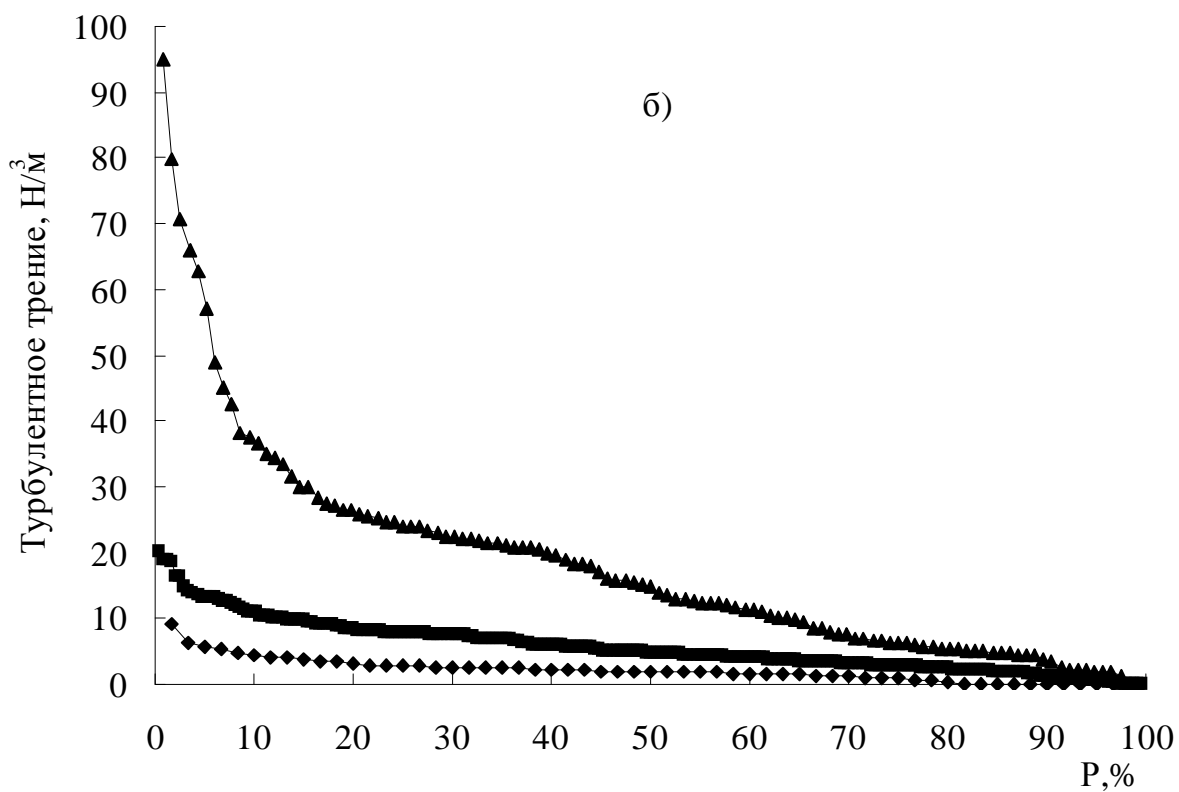
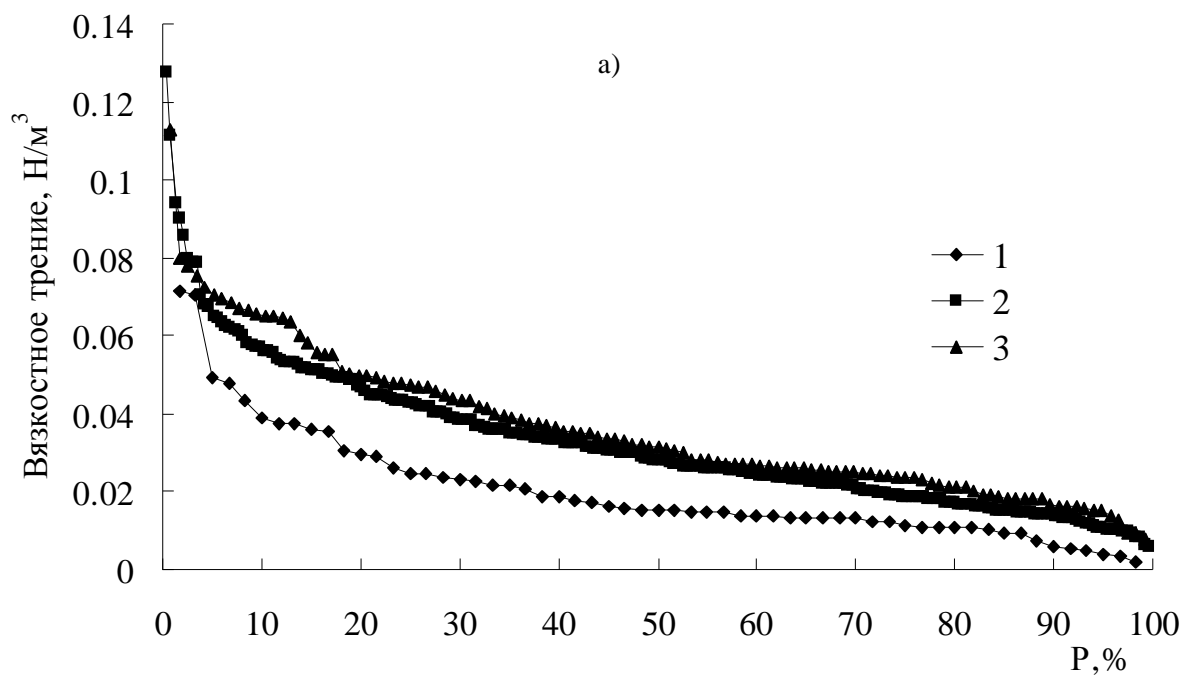
Диапазон изменения расходов воды составил  $4,3 \cdot 10^{-6} - 0,171 \text{ м}^3/\text{с}$ ; мутности воды –  $0 - 99,99 \text{ г}/\text{м}^3$ ; максимальной глубины воды –  $0,025 - 0,13 \text{ м}$ ; турбулентного трения  $6,1 \cdot 10^{-5} - 95,0 \text{ Н}/\text{м}^2$ ; вязкостного трения –  $0,0018 - 0,128 \text{ Н}/\text{м}^2$ . Наблюдается значительное варьирование характеристик по агрофонам, почвенным разностям, а также с изменением длины и уклона склона (табл.1). Также отмечается значительная изменчивость всех характеристик по годам наблюдений в связи с изменением условий формирования стока. Так, в отдельные годы коэффициент вариации ( $C_v$ ) вязкостного трения варьирует от 0,31 до 0,74 при средней величине за весь период наблюдений  $C_v = 0,59$ .  $C_v$  турбулентного трения изменяется в пределах  $0,45 - 1,8$  (среднее  $C_v = 1,28$ ). При изменчивости в эти годы количества осадков за сезон от 93,5 мм до 242 мм, глубины промерзания почвы от 15 см до 87 см, даты начала снеготаяния от 8 января до 30 марта и т.д.

В результате исследований выявлено, что при бурном состоянии потоков обеспеченность больших величин вязкостного и турбулентного трения выше. При ламинарном режиме потока и турбулентное и вязкостное трение минимально, только для турбулентного трения разница в величинах при ламинарном и переходном режимах меньше чем при турбулентном режиме. При турбулентном режиме турбулентное трение однозначно выше, чем при других режимах течения, в то время как значения вязкостного трения при турбулентном режиме практически не отличаются от таковых при переходном режиме. То есть, турбулентное трение при турбулентном режиме однозначно выше, чем при других режимах, а вязкостное трение однозначно ниже при ламинарном режиме (рис.1).

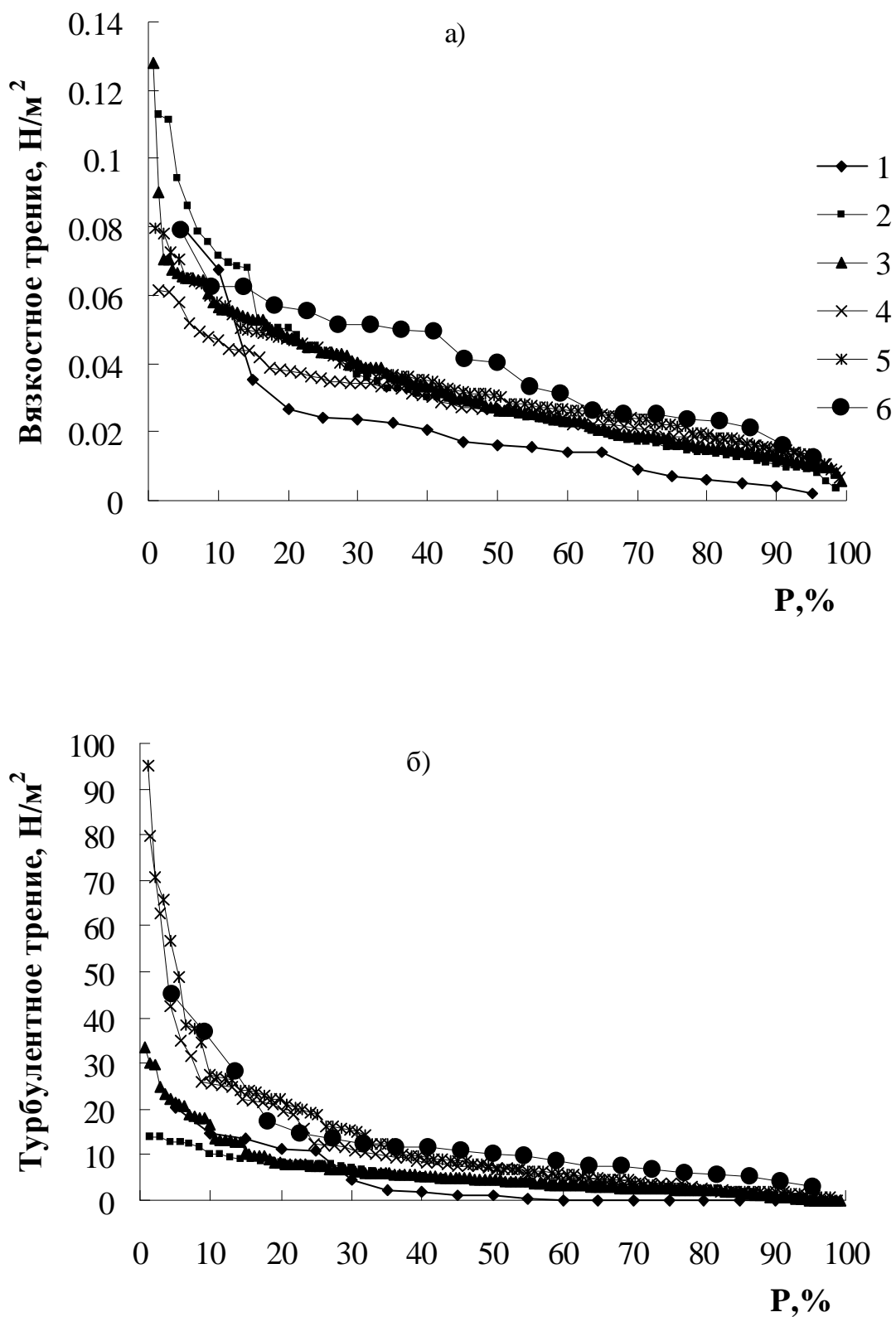
Дифференциация данных по величине мутности воды показывает, что турбулентное трение в 65% случаев, а вязкостное в 85% случаев выше при высокой мутности воды (мутность выше  $50 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) и минимально при отсутствии наносов в потоке. При минимальной мутности вязкостное трение однозначно минимально, в то время как турбулентное трение однозначно максимально при наибольшей мутности (рис.2).

Числа Фруда и Рейнольдса при минимальной мутности имеют более низкую обеспеченность, чем при высокой мутности, то же относится и к диссипации энергии. В то время как относительная ширина русла имеет меньшую обеспеченность при максимальной мутности воды и большую при низкой мутности воды, что говорит о том, что при турбулентном режиме и бурном состоянии потока вероятность размыва выше и, как следствие, распластанность потоков ниже. При снеготаянии, как и при ливнях [7] наличие турбулентного режима еще не означает интенсивный размыв, в то время как наличие бурного состояния потоков практически всегда определяет интенсивный размыв.

Наименьшая обеспеченность больших значений температуры воды наблюдается при отсутствии в воде наносов, вообще же дифференциация кривых по температуре незначительна.



**Рис.1.** Кривые обеспеченности вязкостного трения (а) и турбулентного трения (б) в склоновых водотоках при снеготаянии при диапазонах изменения чисел Рейнольдса (Re): 1 – Re < 700; 2 – 700 < Re < 5000; 3 – Re > 5000.



**Рис.2.** Кривые обеспеченности вязкостного трения (а) и турбулентного трения (б) в склоновых водотоках при снеготаянии при мутности воды: 1 - 0,00 кг/м³; 2 - 0,018-1,0 кг/м³; 3 - 1,0-5,0 кг/м³; 4 - 5,0-10,0 кг/м³; 5 - 10,0-50,0 кг/м³; 6 - >50 кг/м³.



Наибольшее расслоение кривых обеспеченности дифференцированных по мутности воды наблюдается для максимальных значений максимальной глубины воды, как правило, с увеличением мутности обеспеченность больших величин максимальной глубины растет, только кривая для нулевой мутности частично пересекается с кривой минимальной мутности.

Анализ всего выше сказанного позволяет сделать вывод, что при бурном состоянии потоков молекулярная вязкость вновь становится значимой в формировании сопротивлений и размыва в связи с наличием большого количества наносов.

Проведенная ранее [5] и дополненная последними наблюдениями проверка взаимосвязи транспортирующей способности потоков (по [22] и др.) с вязкостным и турбулентным трением, а также с факторами, определяющими склоновый сток показывает (табл.4), что большие величины корреляционных отношений наблюдаются, как с турбулентным трением, так и с вязкостным трением при дифференциации данных по агрофонам и характеру почвогрунтов. В то время как для всего ряда наблюдений корреляционное отношение выше с турбулентным трением.

Полученные материалы, скорее всего, говорят о том, что при снеготаянии максимальный смыв в большей степени зависит от турбулентных напряжений, а минимальный – от вязкостных. Сравнение распределения величин мутности по агрофонам и почвогрунтам подтверждают этот вывод.

Максимально возможную величину вязкостного трения в склоновых водотоках при снеготаянии можно определить по зависимости:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{bmax}} &= X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8; \\ X_1 &= 0,1489 - 0,02623z_0 + 0,003193z_0^2; \\ X_2 &= 9,072 - 0,1323W_n - 4155/W_n^2; \\ X_3 &= -5,244 + 2,667\rho_n + 3,56/\rho_n; \\ X_4 &= 0,9445 + 3,345 \cdot 10^{-7} l_p^3; \\ X_5 &= 0,6474 + 0,00339I_c + 454,4/I_c^2; \\ X_6 &= -3,64 + 4,277 \text{Dat}^{0,02}; \\ X_7 &= 0,6917 + 0,00341XS - 8,922 \cdot 10^{-6} XS^2; \\ X_8 &= 0,981 + 0,2452L_s^{-0,5}, \end{aligned}$$

где  $z_0$  – глубина оттаивания агрофона (сверху), средняя за период стокообразования, см;  $W_n$  – влажность верхнего 0-3 см слоя почвы, средняя за период стокообразования, %;  $\rho_n$  – плотность верхнего 0-3 см слоя почвы, средняя за период стокообразования, г/см<sup>3</sup>;  $l_p$  – средняя глубина промерзания агрофона за сезон, см;  $I_c$  – уклон склона, ‰;  $\text{Dat}$  – дата начала снеготаяния, дни от 1 января каждого года наблюдений;  $XS$  – сумма осадков за сезон (с ноября по март), мм;  $L_s$  – длина склона, м.

Относительная ошибка  $E = 6,12$  %, абсолютная ошибка  $E_1 = 0,002$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициент корреляции  $r = 0,96$ , критерий качества модели  $s/\sigma = 0,27$ .

Оценить возможную среднюю величину вязкостного трения можно по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{bcp}} &= X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8; \\ X_1 &= 0,07065 - 0,000617I_c; \\ X_2 &= 1/(2,232 - 0,01233XS + 2,939 \cdot 10^{-5} XS^2); \\ X_3 &= 0,933 + 4,901 \cdot 10^{-7} l_p^3; \\ X_4 &= -3,034 + 0,04843W_n + 81,69/W_n; \\ X_5 &= 1,262 - 0,1437z_0 + 0,01679z_0^2; \\ X_6 &= 0,4985 + 0,004608\text{Dat} + 11,86/\text{Dat}; \\ X_7 &= 1/(-0,3175 + 2,303\rho_n - 0,9797\rho_n^2); \\ X_8 &= 1/(1,003 - 0,3099\exp(-0,04583L_s)); \\ E &= 3,44 \%, E_1 = 0,001 \text{ Н/м}^2, r = 0,98, s/\sigma = 0,22. \end{aligned}$$

Зависимости построены методом Брандона (последовательного исключения факторов [11]).

Влияние даты наступления снеготаяния на величину вязкостного трения можно объяснить тем, что с течением времени изменяется высота стояния солнца над горизонтом и продолжительность его стояния и, соответственно, изменяется интенсивность инсоляции на поверхность земли. Средние влажность и плотность почвы, кроме характеристики особенностей года исследований косвенно характеризуют агрофон и почвогрунты.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: В связи с изменчивостью погодно-климатических условий формирования стока наблюдается значительное варьирование характеристик стока и касательных напряжений от года к году на различных агрофонах и почвенных разностях. В формировании размыва склона при снеготаянии важное значение имеет вязкостное трение, особенно при небольшой мутности воды. Поэтому при построении моделей хода мутности воды во времени необходимо учитывать и вязкостное трение.

#### Источники и литература

1. Асланов П.В., Фоменко С.А. Энергетический баланс потока жидкости с добавками, снижающими турбулентное трение. // Вісник Донецького ун-ту. Сер.А. Природничі науки. – 2004. – Вип.1. – Ч.1. – С.222–230.
2. Большаков В.А. и др. Справочник по гидравлике. – К.: Вища школа, 1984. – 343с.
3. Будник С.В. Измерение уклонов водной поверхности временных водотоков на склонах // Почвоведение. – 1999. – № 5. – С.585–586.
4. Будник С.В. Касательные напряжения в склоновых водотоках // Водные ресурсы. – 2002. – №5. – С.583–586.

5. Будник С.В. О критических касательных напряжениях в склоновых водотоках при снеготаянии. // Гідрологія, гідрохімія і гідро екологія. – Київ, 2002. – Том.3. – С.112–115.
6. Будник С.В. Методика проведения полевых наблюдений за стоком на склонах. // Гідрологія, гідрохімія і гідро екологія. – 2004. – Том.6. – С.31–39.
7. Будник С.В. Мутность воды в склоновых водотоках при ливнях. // Водные ресурсы. – 2004. – №4. – С.431–435.
8. Булыгин С.Ю., Неаринг М.А., Ачасов А.Б. Параметры эродированности почв в модели эрозии WEPP. // Почвоведение. – 2002. – №11. – С.1397–1403.
9. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. –Л.: Гидрометиздат, 1962. –373 с.
10. Джумагулова Н.Т. Касательные напряжения в потоке, транспортирующем наносы. // Гидротехническое строительство. – 1990. – №12. – С.34–36.
11. Журавель Н.М. Построение эмпирико-статистических моделей объема производства методом последовательного исключения факторов. /В сб.: Статистические методы в экономическом анализе производства. – Новосибирск: Наука, 1968. – С.173–191.
12. Константинов Ю.М. Гидравлика. – К.: Выща школа, 1988. – 398 с.
13. Кузнецов М.С., Гендугов В.М. Критические для почв скорости и касательные напряжения водных потоков // Вестник МГУ. сер.17. Почвоведение. – 1996. – №1. – С.43–49.
14. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1996. – 335 с.
15. Кузнецов М.С., Гендугов В.М. Критические скорости и касательные напряжения потоков талых вод для основных типов почв сельскохозяйственных территорий России // Почвоведение – 1997. – №5. – С.625–628.
16. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П. и др. Эродирующая и транспортирующая способность мелководных потоков. // В.сб.: Эрозия почв и русловые процессы. – Вып.12. – 2000. – С.8–27.
17. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почв при изучении водной эрозии. – Л. Гидрометиздат. 1975. – 88 с.
18. Москаль А.В., Николаев Б.М. Еще раз о формуле расхода наносов. // XVI пленарное меж вузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – СПб., 2001. – С.251–254.
19. Никитин И.К. и др. Влияние замораживания и оттаивания воды на её вязкостные свойства. // В сб.: Гидравлика больших скоростей. – Вып.5. – 1968. – С.148–151.
20. Шапов Г.И. Формулы для определения предельной скорости и расходов донных наносов. // Тр. ГГИ. – 1952. – Вып.36(90). – С.3–17.
21. Matoušek V. Erosion of plane bed by sand slurry current in pipe. // Journal of hydrology and hydromechanics. V.52. 2004. – №3. – P.156–161.
22. Morrison J.E. et al. Rill erosion of a vertisol with extended time since tillage. // Soil and Water Div. of ASAE. 1994. Vol.37(4). P.1187–1196.
23. Finlanson D.P., Montgomery D.R. Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems. // Geomorphology. – 53–2003. – P.147–164.
24. Foster G.R. Modeling the erosion process. // In: C.T. Haan (ed) Hydrologic Modeling of Small Watershed. – ASAE Monography. – 1982. – №5. – St. Joseph. M.J. P.297–380.
25. Nearing M.A. et al. Hydraulics and erosion in eroding rills. // Water Resources research. – Vol.33. – №4. – 1997. – P.865–876.

**Холощев А.В., Ананьева Ю.В.**

## **МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДИНАМИКИ УРОВНЯ ЧЁРНОГО МОРЯ У ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА**

### **Введение**

Уровень моря является одной из важнейших характеристик экологического состояния его побережий, которая постоянно изменяется под воздействием ветрового волнения, приливов, нагревания и охлаждения его поверхностного слоя, колебаний атмосферного давления, атмосферных осадков и процессов испарения [1]. Его динамика оказывает значимое влияние также на процессы абразии клифов, размывания пляжей, переноса и аккумуляции морских и речных осадков, во многом определяющие изменения рекреационного потенциала побережий [2]. Поэтому выявление закономерностей этого процесса на различных участках морских побережий является актуальной проблемой физической географии, экологии и береговедения.

Согласно современным представлениям о динамике уровней различных акваторий Мирового океана [1, 2], рассматриваемый процесс является многофакторным, а его особенности на различных участках их побережий существенно различаются, существенно влияя на закономерности их социально-экономического развития [3]. Наиболее значимо его влияние на участках, являющихся зонами рекреации.

Южный Берег Крыма (ЮБК) уже более сотни лет является одной из наиболее эффективных рекреационных зон мира. Поэтому выявление закономерностей изменения его береговой полосы, состояния пляжей, абразии клифов и других процессов, связанных с динамикой уровня Чёрного моря, является не только актуальной научной, но и важной экономической проблемой этого региона. Тем не менее, в настоящее время непрерывный мониторинг изменений уровня Чёрного моря у ЮБК ведётся в 6 точках, расположенных преимущественно в портах.