

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.012 : 551.4.042

© 1993 г. Е. Ф. ЗОРИНА, И. И. НИКОЛЬСКАЯ, С. Н. КОВАЛЕВ

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РОСТА ОВРАГОВ

Интенсивность развития овражной эрозии определяет уровень внимания к этому негативному процессу, региональные мероприятия по его предупреждению, затраты на исследовательские и инженерные проработки, связанные с использованием пораженных оврагами территорий. Данные об интенсивности овражной эрозии необходимы для выявления общих закономерностей образования и распространения линейных эрозионных форм верхних порядков, определения их возраста и прогнозирования возможного дальнейшего развития.

Рост оврагов может оцениваться различными показателями или всей их совокупностью (изменением во времени длины, объема, площади, глубины и т. п.). Основным источником сведений о росте оврагов на территории являются данные о линейном росте вершинных частей оврага. Приводимые в литературе материалы получены разными методами. В одних случаях это полевые наблюдения исследователей, в других — данные опроса местных жителей, в третьих — результаты обработки картографических материалов и аэрофотоснимков, что позволяет наиболее надежно определить средние скорости роста за определенный период времени. Несмотря на значительное внимание, уделяемое вопросу исследований процесса оврагообразования, данных о скоростях роста оврагов оказывается явно недостаточно для получения общего представления о современных стадиях развития оврагов в конкретных регионах страны, общем времени их активного роста, прогнозирования процесса на перспективу. Начиная с конца прошлого века, когда началось активное оврагообразование в зонах сельскохозяйственного освоения, появилось большое количество исследований, фиксирующих появление овражных форм, скорости их роста, природные и антропогенные аспекты оврагообразования. Выполненный к настоящему времени большой объем экспериментальных натурных и лабораторных исследований, а также анализ развития оврагов в конкретных природных условиях позволяет утверждать, что развитие линейной эрозии продолжается в настоящее время со значительной активностью. Возникают новые овражные врезы в регионах усиленной антропогенной нагрузки, продолжается рост уже сформировавшихся овражных форм, активизируются донные овраги в балках под влиянием использования балочных земель под выпас скота, а также при изменении режима стока верхних звеньев речной сети.

Можно отметить следующие основные тенденции современного процесса развития оврагов.

Наибольшие скорости роста, вне зависимости от природных условий, отмечаются в начальный период развития оврага. Скорости линейного роста при этом могут достигать нескольких десятков метров в год. В дальнейшем значительные скорости обычно имеют место при исключительных ливневых осадках или снеготаянии редкой интенсивности, а также экстремальных случаях антропогенного вмешательства.

Средние скорости роста уже сформировавшихся оврагов со временем, как правило, снижаются. Во всяком случае сопоставление средних скоростей развития

оврагов в центральной части России за период с 60-х до 80-х годов XX в. показало их некоторое снижение, и в настоящее время они составляют здесь 0,5—2,0 м/год.

Отмечается активизация оврагообразования, связанная с возрастающим объемом промышленного и городского строительства, проведением дорог, прокладкой разного рода коммуникаций. Продолжает появляться значительное количество оврагов в районах многолетнемерзлых пород на осваиваемых территориях, где взаимодействуют эрозионные, оползневые, солифлюкционные процессы, что затрудняет применение известных систем противоэрозионных мероприятий.

Определение активности роста оврагов на разных этапах развития — одна из проблем, решение которых связано с анализом натуральных и экспериментальных данных, позволяющих составить общую расчетную схему или модель процесса. Формирование оврага в природных условиях продолжается, как правило, 50—250 лет, что, естественно, затрудняет получение данных о скоростях роста одного и того же оврага на разных этапах развития. Приведенные в литературе результаты наблюдений за активностью оврагов, как правило, ограничиваются периодом, насчитывающим не более десятка лет. В известных нам работах не содержится данных натуральных наблюдений, позволяющих определить скорость роста оврага как функцию времени его развития с учетом особенностей природных факторов и антропогенного воздействия. Вместе с тем именно эти данные могут служить для разработки научных основ противоэрозионной защиты земель от разрушения овражной эрозией.

Выявление общих закономерностей развития оврагов во времени было основной задачей одного из наиболее детальных экспериментальных исследований, выполненных в Гидрофизической лаборатории МГУ. Развитие оврагов изучалось в широком диапазоне морфометрических условий (различные глубины базисов эрозии, форма склонов, конфигурация и площадь водосборных бассейнов). Полученные данные позволили выявить ряд общих закономерностей развития [1, 2], на основании которых с привлечением данных исследований гидротранспорта высоконасыщенных смесей [3, 4] предлагается методическая схема определения возраста оврагов и интенсивности их роста на разных стадиях развития.

За показатель интенсивности развития оврага принято приращение объема оврага или вынос грунта за пределы овражной формы в единицу времени. Для натуральных условий за единицу времени наиболее целесообразно принять год. Размерность показателя интенсивности развития оврага — м<sup>3</sup>/год. Максимальное значение этого параметра, как в натуральных условиях по данным наблюдений, так и при лабораторных экспериментах, соответствует моменту прорыва бровки склона, когда уклоны продольного профиля близки к максимальным, а жидкий сток с водосборной площади сконцентрировался уже в единую линейную эрозионную форму с выработанным руслом и обрывистыми склонами. Опытные данные показывают, что этот момент близок по времени к 1% общего времени развития овражной формы. На рис. 1 представлено изменение во времени относительной интенсивности объемного роста оврага начиная от максимальных значений до практического завершения роста. Логарифмическая анаморфоза позволила представить закономерность изменения во времени объемного роста оврага в виде двух закономерностей, соответствующих разным периодам развития. Первая, соответствующая периоду от 1 до 40% общего времени оврагообразования, имеет вид

$$V_{i_w} = \frac{V_{\max_w}}{t_i^{0,56}} \quad (1)$$

Вторая, соответствующая периоду от 40 до 100% времени, может быть представлена как

$$V_{i_w} = V_{\max_w} \left[ \frac{3,16 \cdot 10^3}{t_i^{2,75}} - 0,01 \right], \quad (2)$$

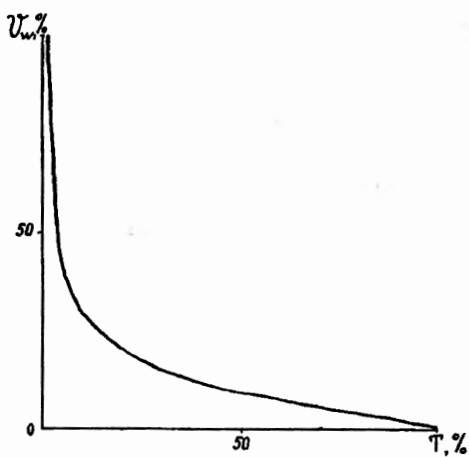


Рис. 1

Рис. 1. Изменение интенсивности объемного роста оврагов в процессе его развития

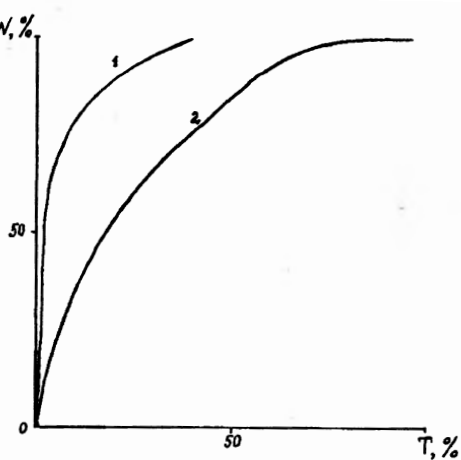


Рис. 2

Рис. 2. Изменение длины и объема оврагов во времени  
1 — относительная длина оврага, 2 — относительный объем оврага

где  $V_{i_w}$  — интенсивность объемного роста за период времени  $t_i$ , м<sup>3</sup>/год,  $V_{max_w}$  — максимальная интенсивность объемного роста, м<sup>3</sup>/год,  $t_i$  — время, %.

На рис. 2 представлены усредненные по ряду опытов кривые роста оврага во времени по двум основным параметрам — длине (кривая 1) и объему (кривая 2). Сопоставление этих кривых показывает, что, по-видимому, разделению развития оврага на два периода по интенсивности можно найти логическое объяснение. Первый этап — до 40% времени соответствует периоду, когда овраг практически полностью вырабатывает длину, т. е. его развитие проходит при постоянно уменьшающемся среднем уклоне. При этом форма продольного профиля остается, как правило, выпуклой. Второй этап соответствует, при близком к постоянному среднему уклоне, выработке профиля «равновесия», чередованию по длине оврага участков эрозии и аккумуляции, постепенному углублению верхнего и среднего участков, образованию и перемещению в верхнюю часть продольного профиля стрелы максимального прогиба. Постепенно на все большем протяжении продольный профиль оврага становится зоной транзита и аккумуляции наносов. На первом этапе происходит более длительное, медленное и сравнительно спокойное развитие.

Зависимости (1) и (2) дают представление об интенсивности роста оврага за весь период его развития от момента прорыва бровки склона, когда промоина на склоне превращается в овражную форму, до практической стабилизации продольного и поперечного профилей оврага, когда продольный профиль приобретает форму, близкую к «выработанному», а уклоны бортов соответствуют углам естественного откоса. Интегрируя по времени зависимости (1) и (2), получаем объем оврага на завершающей стадии развития в функции от максимальной интенсивности объемного роста и общего времени оврагообразования.

$$W_{\Sigma} = V_{max_w} \int_1^{40} t_i^{-0,56} dt + V_{max_w} \times$$

$$\times \int_{40}^{100} (3,16 t_i^{-2,75} \cdot 10^3 - 0,01) dt = 0,14 V_{max_w} T, \quad (3)$$

где  $W_{\Sigma}$  — максимальный по природным условиям объем оврага на завершающей стадии развития,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\max_w}$  — максимальная интенсивность объемного роста оврага,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $T$  — время оврагообразования, год.

Анализ процесса оврагообразования по экспериментальным и натурным наблюдениям позволил предложить формулу [5] для определения максимального объема оврага на завершающей стадии развития в функции от комплекса природных характеристик территории:

$$W_{\Sigma} = K \frac{h^2 H Q_0^{0,67}}{V_p^{2,67} n^2}, \quad (4)$$

где  $h$  — средняя глубина оврага на завершающем этапе развития, м,  $H$  — глубина местного базиса эрозии, м;  $Q_0$  — расходы половодья или паводочного стока расчетного процента обеспеченности,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V_p$  — размывающая скорость грунтов, слагающих склон, м/с;  $n$  — коэффициент шероховатости русла оврага;  $K$  — обобщенный эмпирический коэффициент, функция формы склона, конфигурации водосбора, формы русла.

Параметры, входящие в эту расчетную зависимость, могут быть получены либо расчетным путем с использованием картографических и справочных материалов, либо определены в натуральных условиях, если расчет выполняется для конкретной овражной формы.

Определив для конкретных природных условий объем оврага на завершающей стадии развития ( $W_{\Sigma}$ ), время оврагообразования с использованием зависимости (3) можно представить как

$$T = \frac{W_{\Sigma}}{0,14 V_{\max_w}}. \quad (5)$$

Зависимость развития оврага во времени, представленная на рис. 2, позволяет определить период современного развития по данным о соотношении современного и расчетного объема оврага. Объем современного оврага ( $W_p$ ,  $\text{м}^3$ ) определяется по топокартам, аэрофотоснимкам или по результатам инструментальных измерений в натуральных условиях. Для основного времени оврагообразования (до 70% максимального объема) она достаточно надежно аппроксимируется следующими отношениями:

$$\text{до } 40\% \text{ максимального объема} — t_i = 0,35 \left( \frac{W_i}{W_{\Sigma}} \right)^{1,15} T, \quad (6)$$

$$\text{от } 40 \text{ до } 70\% — t_i = 0,7 \left( \frac{W_i}{W_{\Sigma}} \right)^{2,1} T. \quad (7)$$

Определив период современного развития, используя зависимости (1) или (2), можно получить интенсивность объемного роста оврага как функцию ее максимального значения, соответствующего моменту прорыва бровки склона, образованию глубокой рытвины и дренированию всей водосборной площади бассейна.

Таким образом, основным вопросом при определении активности роста оврага на разных стадиях развития и общего времени оврагообразования является расчет максимального расхода наносов или вынос эродированного материала за пределы эрозионной формы в начальный период развития. Ниже рассматривается решение этой задачи для оврагов, развивающихся на склонах, сложенных сыпучими грунтами, что наиболее характерно для заовраженных районов Центра России.

В том случае, когда склоны долинно-балочной сети сложены песчано-гравийными смесями, супесями, легкими лёссовидными суглинками, а углы наклона склонов близки к  $20\text{—}30^\circ$  (что характерно для балок и подмываемых

склонов рек), процесс перемещения грунта на момент прорыва бровки склона растущим оврагом близок процессам транспортировки грунта безнапорными потоками по лоткам, а также напорному гидротранспорту высоконасыщенных смесей по трубопроводам. Интенсивность выноса грунта за пределы овражного вреза (его объем в единицу времени) обусловлен величиной расхода воды с овражного водосбора и транспортирующей способности овражных водных потоков, от которой зависит величина мутности. Предельная транспортирующая способность в свою очередь является функцией числа Фруда

$$Fr = \frac{v^2}{gR_0}, \quad (8)$$

где  $V$  — скорость потока, м/с;  $R_0$  — гидравлический радиус, или глубина потока, м. Параметр Фруда может рассматриваться как энергетическая характеристика потока, его энергетический градиент, величина которого прямо пропорциональна уклону. В дальнейшем изложении для обозначения энергетического градиента используется тот же символ  $I$ , что и для уклонов. Уклон склонового потока близок уклону склона, который, как правило, и используется в расчетных зависимостях для определения гидроморфометрических характеристик склоновых потоков.

Учитывая изложенное, логично предположить, что в условиях формирования высоконасыщенного потока на склоне на момент прорыва бровки именно величина уклона продольного профиля определяет транспортирующую способность, а, следовательно, и предельную мутность потоков. В дальнейшем, по мере развития оврага (увеличения его длины, глубины и ширины), на процесс его формирования все большее влияние оказывают природные процессы на склонах, такие, как оползни, обрушения, осыпание, суффозия, неравномерность промерзания и оттаивания. При большей длине склонов, неоднородности их грунтовых условий по глубине и разной степени зарастания, совокупность этих сопутствующих оврагообразованию природных процессов становится определяющей в ходе развития овражных форм. Учет всего комплекса факторов возможен лишь в обобщенной форме, в виде типичной кривой изменения интенсивности развития, что было получено на основе экспериментальных исследований и заложено в рассмотренные выше расчетные зависимости.

На начальном этапе развития как одно из условий формирования расхода наносов в этот период может быть принято полное использование транспортирующей способности потоков. Энергетический градиент склонового потока, который соответствует в природных условиях уклону склона  $I_{\text{скл}}$ , можно представить в виде суммы уклонов

$$I_{\text{скл}} = I_0 + I', \quad (9)$$

где  $I_0$  — энергетический градиент потока на перемещение по склону со скоростями, близкими к размывающей,  $I'$  — энергетический градиент на отрыв и перемещение грунта.

Для потоков с размываемым ложем, т. е. для подавляющего количества случаев оврагообразования в природных условиях, представляется логичным рассчитывать  $I_0$  по зависимостям, соответствующим перемещению водного потока со скоростями, равными размывающим для грунтовых условий склона. При сопоставлении этой величины с фактической величиной природного склона  $I_{\text{скл}}$  могут быть варианты, когда  $I_0 > I_{\text{скл}}$  и  $I_0 < I_{\text{скл}}$ . В первом случае склоновые потоки имеют скорости ниже размывающих и эрозия практически отсутствует. Во втором, когда уклон склона превосходит необходимый для начала размыва, начинается отрыв и перемещение грунта. Содержание грунта в потоке при этом будет тем большим, чем значительнее уклоны склона, а следовательно, чем больше доля энергии, затрачиваемая на эрозионную работу. В конечном счете разность величин  $I_{\text{скл}}$  и  $I_0$  определяет величину мутности склоновых потоков и объемы выноса грунта, т. е. интенсивность объемного роста оврагов.

Величина уклона  $I_0$ , или энергетический градиент, соответствующий условиям размываемости, подсчитывается как функция модуля стока, площади водосборного бассейна и размывающих скоростей, характеризующих грунтовые условия. Расход склонового потока с овражного водосбора равен

$$Q_0 = qS, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (10)$$

где  $q$  — модуль стока воды,  $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ ;  $S$  — площадь водосборного бассейна,  $\text{км}^2$ .

Модули стока разного процента обеспеченности рассчитываются в соответствии с «Инструкцией по расчету гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий», составленной Государственным гидрологическим институтом [6]. С другой стороны, величина расхода может быть представлена как

$$Q_0 = Vw, \quad (11)$$

где  $V$  — скорость потока, принимаемая при расчетах  $I_0$ , равной размывающей —  $V_p$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $w$  — площадь поперечного сечения потока,  $\text{м}^2$ .

В начальный период образования площадь поперечного сечения потока при слабо выработанном русле может быть принята треугольной формы, а уклоны склона поперечного сечения промоины в прирочной части склона — несколько превышающими углы естественного откоса. Тогда отношение ширины к средней глубине потока, «коэффициент формы потока»  $\beta$ , оказывается близким к 4,0, а площадь поперечного сечения потока  $w = \beta h_0^2$ , где  $h_0$  — средняя глубина потока,  $\text{м}$ .

Используя зависимость Шези — Маннинга, представим скорость потока как

$$V_p = C \sqrt{I_0 h_0}. \quad (12)$$

Коэффициент  $C$  достаточно надежно аппроксимируется как

$$C = \frac{h_0^{0,167}}{n},$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости русла потока.

Выражаем через величину размывающей скорости глубину потока

$$h_0 = \left( \frac{V_p n}{I_0^{0,5}} \right)^{1,5}.$$

Тогда расход  $Q_0$  (по зависимости (11)) можно представить как

$$Q_0 = V_p \beta \left[ \left( \frac{V_p n}{I_0^{0,5}} \right)^{1,5} \right]^2 = \frac{\beta V_p^4 n^3}{I_0^{1,5}},$$

откуда

$$I_0 = \beta^{0,67} V_p^{2,7} n^2 Q_0^{-0,67}. \quad (13)$$

Рассчитанный по зависимости (13) уклон создает условия неразмываемости при заданных гидроморфометрических характеристиках русла овражного потока и представляет собой удельную энергию (энергетический градиент) на перемещение потока со скоростями, равными размывающей при расходах  $Q_0$  с площадью водосбора  $S$ .

Второе слагаемое  $I'$  представляет собой удельную энергию, или энергетический градиент потока на отрыв, взвешивание и перемещение грунта. Чем больше эта величина, тем большую взвесенесущую способность имеет поток.  $I'$  можно представить как

$$I' = K_r P, \quad (14)$$

где  $P$  — содержание грунта в потоке,  $K_r$  — эмпирический коэффициент, функция воднофизических свойств грунта и режима транспортирования. В режимах тран-

спортирования с предельной консистенцией для сыпучих грунтов предполагается постоянство  $K_r$ , независимо от абсолютных значений. Величина коэффициента  $K_r$  может быть определена из условий предельно устойчивого состояния водонасыщенного грунта на откосе, т. е. когда уклон склона равен углу внутреннего трения  $\varphi$  при естественном сложении и полной влагоемкости. Если перемещение водонасыщенного грунта рассматривать как поток определенной консистенции, его мутность, выраженная в виде отношения объема грунта к объему воды, составит  $P = 0,65/0,35 = 1,86$ , где 0,35 — порозность грунта в естественном сложении; 0,65 — доля объема, занимаемая частицами грунта. Принимая угол внутреннего трения, определяющий перемещение водонасыщенного грунта, близким к  $28-32^\circ$ , зависимость (14) записывается, как  $I' = \operatorname{tg} \varphi = 0,55 = K_r P = K_r \cdot 1,86$ , откуда  $K_r = \frac{0,55}{1,86} = 0,296$ .

Возможное содержание грунта во взвесенесущем потоке (его предельная консистенция) записывается в следующем виде:

$$P = \frac{I'}{0,296} = \frac{I - I_0}{0,296}. \quad (15)$$

Для удобства расчета расхода наносов содержание грунта в потоке (мутность) удобно выразить в виде отношения объема грунта в естественном сложении к объему единицы взвесенесущего потока (объемная консистенция  $P'$ ). Пересчет  $P$  в объемную консистенцию выполняется по зависимости

$$P' = \frac{P}{0,65 + 0,65P}. \quad (16)$$

Для грунта в естественном сложении  $P' = \frac{1,86}{0,65 + 0,65 \cdot 1,86} = 1,0$ .

Расход наносов  $Q$  через расход жидкого стока  $Q_0$  и мутность определяется как

$$Q = Q_0 P' = \frac{Q_0 P}{0,65 + 0,65P}. \quad (17)$$

Объем наносов  $w$ , транспортируемый потоком через определенный створ за интервал времени  $\Delta t$ , можно представить как

$$Q \Delta t = \frac{Q_0 \Delta t P}{0,65 + 0,65P} = W = \frac{W_0 \cdot P}{0,65 + 0,65P}, \quad (18)$$

где  $W_0$  — сток воды,  $\text{м}^3$  за расчетный период.

Вынос грунта из оврага за наиболее активный период его развития  $\Delta t$  при полном использовании транспортирующей способности потока можно определить по зависимости (18), приняв за  $W_0$  сток воды в период, соответствующий наибольшим скоростям склонового потока. При этом объем вынесенного грунта ( $W$ ) за интервал  $\Delta t$  может рассматриваться как максимальная интенсивность объемного роста оврага  $V_{\max_w}$ . Из формул (15) и (18) максимальную интенсивность объемного роста можно представить как

$$V_{\max_w} = W_0 P' = W_0 \frac{I - I_0}{0,2 + 0,65(I - I_0)}. \quad (19)$$

Предложенная зависимость между содержанием грунта  $P$  в потоке и энергетический градиент на транспортирование  $I$  (15) были проверены на независимом материале — результатах исследований гидротранспортирования высоконасыщенной смеси по трубопроводам. В опытах использовались пески разной крупности: мелкий, средним диаметром 0,25 мм; средний — 0,5 мм; крупно- и разно-

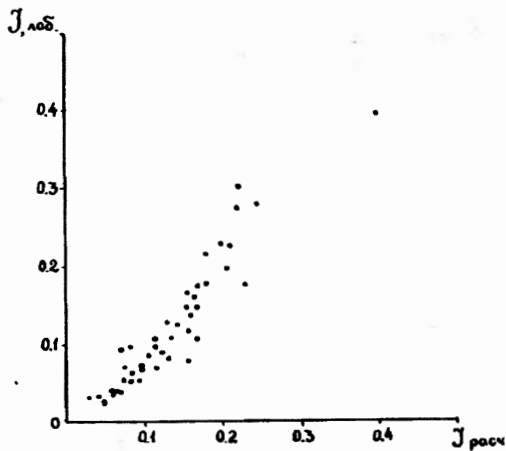


Рис. 3. Соотношение удельных энергетических характеристик (уклонов) по расчетным и экспериментальным данным

зернистые, средним диаметром 1—2 мм. Насыщение (мутность) водогрунтовых смесей изменялось в широких пределах и достигало 0,6—0,7 по объему. Результаты экспериментов позволили получить энергетические градиенты, соответствующие транспортированию водогрунтовой смеси в режиме критической скорости с разным содержанием взвеси. Критическую скорость (момент начала отложения или волочения тонкого слоя грунта в трубе) можно рассматривать как размывающую для потока, перемещающего грунт определенной консистенции. Расчетным путем определены энергетические градиенты (уклоны  $I$ ), соответствующие условиям неразмываемости для потоков определенной консистенции. В соответствии с зависимостью (9) уклон  $I$  был представлен как сумма потерь напора на воде —  $I_0$  при критической скорости и потерь  $I'$ . При этом  $I_0$  определялось по зависимости для расчета потерь напора в трубопроводах при скоростях, равных критическим:

$$I_0 = \frac{V_{кр}}{2gD} \lambda, \quad (20)$$

где  $V_{кр}$  — критическая скорость, м/с;  $D$  — диаметр трубопровода, м;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\lambda$  — коэффициент шероховатости труб, рассчитываемый по зависимости, рекомендуемой А. П. Зегждей для потоков развитой турбулентности и учитывающей шероховатость, создаваемую в гладкой трубе отложившимся тонким слоем грунта.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{R_0}{e} + 2,125, \quad (21)$$

где  $R_0$  — гидравлический радиус, м;  $e$  — высота выступов шероховатости, определяемая по среднему диаметру песчаных зерен, м.

Потери энергии на транспортирование потоком грунта  $I'$  определялись по формуле (14) для различного содержания грунта в напорном потоке, как  $I' = 0,296 P$ .

На рис. 3 представлен график связи между расчетными и полученными при опытах величинами энергетических градиентов (уклонами  $I$ ). Коэффициент корреляции между этими величинами составляет 0,7, что позволяет рекомендовать полученную зависимость между удельными потерями напора (уклонами) и предельными величинами мутности потоков « $P$ » в следующем виде:

$$I = I_0 + I' = \beta^{0,67} V_p^{2,7} n^2 Q_0^{-0,67} + 0,296 P. \quad (22)$$

Максимальную интенсивность объемного роста рекомендуется рассчитывать в соответствии с зависимостью (19). Предложенные выше зависимости позволяют определить скорости объемного роста оврагов в функции максимальной интенсивности процесса и общее время оврагообразования.

Экспериментальные исследования [1] позволили выявить соотношение между интенсивностью объемного и линейного роста оврагов. Эту зависимость в количественном выражении можно представить следующим образом:

$$V_i = 10^{-2} \left[ \left( \frac{V_{i_w}}{0,41 V_{\max_w}} \right)^5 - 2,8 \cdot 10^{-3} \right] V_{\max_t}, \quad (23)$$

где  $V_i$  — скорость линейного роста оврагов на период времени  $t$ , м/год;  $V_{i_w}$  — относительная скорость объемного роста на время  $t$ ;  $V_{\max_t}$  — максимальная скорость линейного роста, м/год.

Скорость линейного роста оврага на период  $t_i$  составляет долю от максимальной  $V_{\max_t}$ , тем большую, чем на более ранних стадиях развития находится овраг. На период максимальной интенсивности объемного роста скорость линейного роста уже снижается и достигает 0,86 максимальной. Скорость линейного роста приближается к нулю на момент времени, составляющий около 40% общего времени развития, когда интенсивность объемного роста составляет еще 0,126 максимальной.

Оценить величину максимальной скорости линейного роста можно привлекая полученные предыдущим расчетом данные о развитии оврага и результаты экспериментальных работ. На рис. 2 представлена кривая 1, характеризующая рост длины оврага во времени. Как видно, к 1% общего времени оврагообразования, когда достигается максимум интенсивности объемного роста, овраг проходит до 60% своей предельной длины. Предельная длина оврага определяется в соответствии с зависимостью, предложенной в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов [5]

$$l = K \frac{HQ_0^{0,67}}{V_p^{2,67} n^2}, \quad (24)$$

где  $K$  — эмпирический коэффициент, функция морфометрии водосбора и формы русла овражного потока;  $Q_0$  — расходы воды расчетной обеспеченности, м<sup>3</sup>/с;  $H$  — глубина местного базиса эрозии, м;  $V_p$  — размывающие скорости, м/с;  $n$  — коэффициент шероховатости русла.

По зависимостям (3) и (4) подсчитывается общее время оврагообразования и определяется период, соответствующий 1% общего времени развития. Максимальная скорость линейного роста рассчитывается как частное от деления величины, соответствующей 60% максимальной длины на период, соответствующий 1% времени развития.

Предлагаемая методика определения интенсивности развития овражной эрозии может в значительной степени конкретизировать прогнозные параметры процесса оврагообразования, что послужит основой для выбора рациональной системы противоэрозионных мероприятий, их очередности и размещения в пределах овражно-балочных водосборов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косов Б. Ф., Никольская И. И., Зорина Е. Ф. Экспериментальные исследования оврагообразования // Экспериментальная геоморфология. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 113—135.
2. Овражная эрозия. М.: Изд-во МГУ, 1989. 167 с.
3. Стариков А. С. Технология работы речных земснарядов. М.: Транспорт, 1969. 183 с.
4. Стариков А. С. Технологические процессы земснарядов. М.: Транспорт, 1989. 210 с.
5. Зорина Е. Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 81—90.

## METHOD OF CALCULATION OF GULLY GROWTH RATE

E. F. ZORINA, I. I. NIKOLSKAYA, S. N. KOVALEV

### Summary

A method of calculation of gully growth rate (in terms of volume) is introduced, which is based on knowing regularities of changes in sediment yield from the catchment in the course of erosional rills development. Formulae have been developed to calculate total time of gully formation and rates of its growth (both in length and volume) at different stages of the gully development.

УДК 551.4.012:528.71

© 1993 г. Б. А. НОВАКОВСКИЙ, В. Н. САПУНОВ, П. С. ВОЛКОВ

## ЦИФРОВОЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕ- ДЕЛЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

(на примере горы Айкуайвенчорр, Хибин)

Интенсивное хозяйственное освоение Хибинских гор, прежде всего расширение масштабов добычи и производства апатитонепелинового сырья, требует вовлечения в производственную деятельность новых территорий. Одна из главных проблем, возникающих при этом, — обеспечение безопасности работы горно-промышленного комплекса. Значительная территория Хибинских гор подвергается систематическому воздействию разрушительных явлений — снежных лавин, водоснежных потоков, обвалов, осыпей и других, как природных, так и антропогенных. Здесь отмечено более 170 очагов водоснежных потоков, многие из которых находятся непосредственно в пределах районов, планируемых для дальнейшего освоения.

Положение водоснежных потоков среди подобных катастрофических явлений, а также их сходство и различие с лавинами, паводками и селями освещено в работах [1, 2]. При разработке методов изучения, прогноза водоснежных потоков и защиты от них важно иметь достоверные сведения о пространственном распределении снежного покрова в очагах водоснежных потоков. Традиционные способы определения высоты снега не всегда удовлетворяют современным требованиям из-за высокой вероятности случайных показаний, ограниченной длины снегомерной рейки, большого объема полевых работ и повышенной опасности проведения снегомерных работ в очагах водоснежных потоков.

Для повышения эффективности определения высоты снега в работах В. С. Фрейдлина и др. предлагается способ расчета снегозапаса в лавиноборах, основанный на зависимости максимальной высоты снега от кривизны поверхности малого горного бассейна [3—6]. Сущность этого способа заключается в следующем.

Как известно, главными факторами формирования снежного покрова являются атмосферные осадки в твердом виде и метелевый перенос снега. В пределах одного малого горного бассейна (очага водоснежных потоков) пространственное изменение количества твердых осадков весьма незначительно, поэтому велика роль ветрового перераспределения снега. В то же время распределение снежного покрова зависит от абсолютной высоты, экспозиции склонов, углов наклона и кривизны поверхности горных участков. Однако в Хибинах из-за сравнительно