

Д. В. МАРДОСЕНЕ, Р. С. ПУТРИМАС, В. В. ВАЙНАУСКАС

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ БЕРЕГОВ РЕК ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Комплексное исследование долины р. Нярис потребовало точной метрической информации о динамических процессах берегов и в особенности характера преобразования обнажений. Эту работу выполнила лаборатория инженерной фотограмметрии Вильнюсского университета.

Объектами исследования были выбраны пять типичных обнажений, представляющих разные стадии развития. Вследствие рыхлости выходящих на поверхность пород и крутизны склонов в 40° — 50° пришлось отказаться от классических геодезических методов. Так как главной задачей являлось изучение интенсивности эрозии обнажений, то был применен метод повторных циклических наблюдений, которые выполнялись весной и летом в течение двух лет.

Программа работ представлена на схеме 1.

Согласно требованиям повторных наблюдений [3] съёмочные (базисные) и маркированные точки геодезической опоры были установлены стабильно. Первые — на противоположном берегу

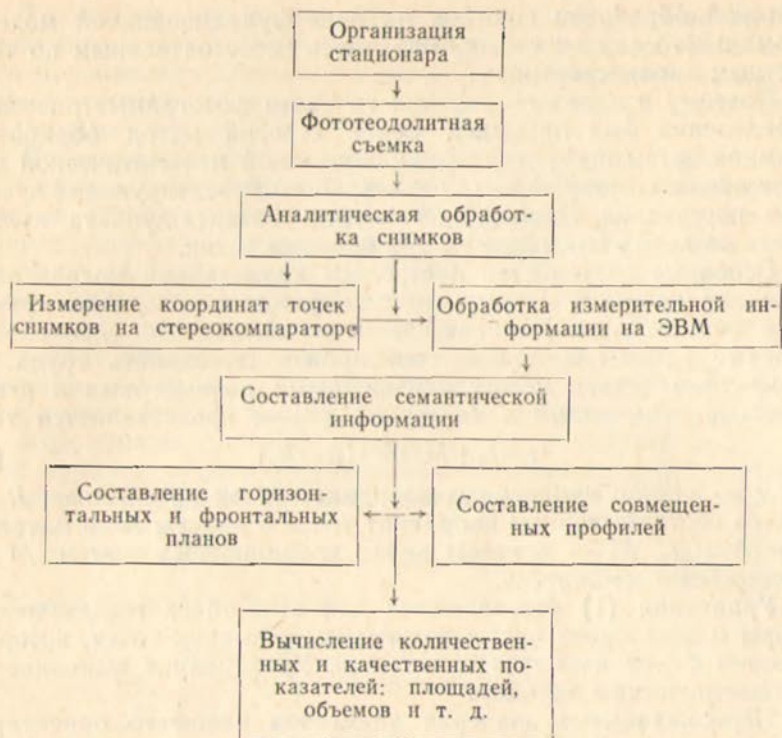


Схема 1.

реки, а вторые — за пределами разрушаемого участка исследуемого объекта, причем размерность маркировки составила 60×40 см.

Пространственные координаты опорных точек определялись прямыми геодезическими засечками. При этом угловые измерения выполнялись теодолитом ТБ-3, а линейные — компарированной рулеткой. В зависимости от условий в разных объектах точность определения координат геодезических точек колебалась, а именно $b(x) = b(y) = b(z) = 2-5$ см.

Фототеодолитные станции выбирались с учетом условий местности, покрытой растительностью, и геометрических условий, определяющих точность окончательных результатов. Отношение базисов фотографирования к отстоянию В/У составило $1/4-1/8$ для фототеодолита Photho 19/1318 и $1/4-1/6$ для фототеодолита TAL. Фотосъемка выполнялась приблизительно в масштабах $1:500$, $1:1000$, $1:2000$. Для фотосъемки использовались контрастные фотопластинки Московского завода технических фотопластинок.

Вследствие того что исследовались динамические процессы малой интенсивности, т. е. малые изменения в сравнительно коротком промежутке времени, то применение методики клас-

сической обработки снимков на базе функциональной модели нормального случая съемки оказалось несостоятельным по точностным характеристикам.

Поэтому в целях повышения точности фотограмметрических определений был применен более строгий метод обработки снимков путем построения функциональной математической модели объекта при условии коллинеарности проектирующих лучей. Для построения коллинеарной модели объекта-дуплета нужно иметь на краях его минимум три опорные точки.

Основные достоинства построения коллинеарной модели объекта заключаются в том, что для фотосъемки можно применить общий случай, вследствие чего значительно упрощаются полевые работы и повышается производительность труда. В этом случае связь между неизвестными параметрами и измеренными величинами в векторной форме представляется так:

$$r = r_0 + M^{-1}A^{-1}(R - R_0), \quad (1)$$

где r — вектор измеренных координат точек на снимках; R — вектор соответственных координат точек в натуре; A — матрица поворота; r_0 , R_0 — векторы начал координатных систем; M — масштабный множитель.

Уравнения (1) составляются для всех точек геодезической опоры и некоторого числа фотограмметрических точек, которые условно будем называть *основными*. Уравнивание выполняется параметрическим методом.

Первоначальные значения элементов внешнего ориентирования снимков X_s , Y_s , Z_s , φ , ω , κ находим из простых графических построений. Приближенные значения X , Y , Z вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} X &= X_{sl} + \frac{Bx_1}{x_1 - x_2}; \quad Y = Y_{sl} - \frac{Bf}{x_1 - x_2}; \\ Z &= Z_{sl} + \frac{Bz_1}{x_1 - x_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь B — базис фотографирования; X_{sl} , Y_{sl} , Z_{sl} — начальные координаты левого центра фотографирования; X_1 , X_2 — абсциссы левого и правого снимков.

Уравнения поправок имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{vmatrix} \delta X_s + \begin{vmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{vmatrix} \delta Y_s + \begin{vmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{vmatrix} \delta Z_s + \begin{vmatrix} a_{14} \\ a_{24} \end{vmatrix} \delta \varphi + \begin{vmatrix} a_{15} \\ a_{25} \end{vmatrix} \delta \omega + \begin{vmatrix} a_{16} \\ a_{26} \end{vmatrix} \delta \kappa + \\ + \begin{vmatrix} a_{17} \\ a_{27} \end{vmatrix} \delta X + \begin{vmatrix} a_{18} \\ a_{28} \end{vmatrix} \delta Y + \begin{vmatrix} a_{19} \\ a_{29} \end{vmatrix} \delta Z + \begin{vmatrix} l_x \\ l_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_x \\ v_z \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где a_{1i} , a_{2i} — коэффициенты уравнений поправок, которые находятся как частные производные уравнений (1) по соответствующим переменным;

l_x , l_z — свободные члены.

уравнения (3) разбиваются на две независимые группы: уравнения поправок элементов внешнего ориентирования снимков и уравнения поправок координат определяемых точек, которые решаются по методу наименьших квадратов путем последовательных итераций.

Последовательность итерационного решения: вычисляются поправки для элементов внешнего ориентирования снимков, затем по исправленным элементам снимков формируется вторая группа уравнений поправок для основных точек модели, после решения которых получают исправленные координаты. В дальнейшем процесс повторяется, причем в каждой итерации коэффициенты и свободные члены вычисляются заново. При составлении уравнений для геодезических точек используются их истинные значения и поправки не вводятся. Итерационный процесс продолжается до необходимой сходимости результатов.

Координаты для всех остальных фотограмметрических точек сгущения, условно называемых *дополнительными*, вычисляются по формулам прямой пространственной фотограмметрической засечки:

$$X = X_{s1} + M\bar{x}_1; \quad Y = Y_{s1} - Mf; \quad Z = Z_{s1} + M\bar{z}_1, \quad (4)$$

где масштабный множитель

$$M = \frac{(X_{s2} - X_{s1})\bar{y}_{s2} - (Y_{s2} - Y_{s1})\bar{x}_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} = \\ = \frac{B_x \bar{y}_2 - B_y \bar{x}_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} = \frac{B_x - B_y \frac{x_2}{f}}{x_1 - x_2}. \quad (5)$$

Здесь X_{s1} , Y_{s1} , Z_{s2} , X_{s2} , Y_{s2} , Z_{s2} — линейные элементы внешнего ориентирования левого и правого снимков, $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{z}_1$, $\bar{z}_2$ — трансформированные координаты левого и правого снимков. Алгоритм реализован на ЭВМ ЕМ-1022 на языке Фортран.

На печать выдается вся вводная измерительная информация и первоначальные значения элементов внешнего ориентирования снимков, а затем значения вычисленных элементов внешнего ориентирования снимков и координаты всех измеренных точек. Выдаются также остаточные невязки на опорных точках, которые позволяют произвести оценку точности фотограмметрических построений, а отсутствие невязок на основных фотограмметрических точках свидетельствует о правильном выполнении условия коллинеарности в пределах построенной модели объекта.

Цифровые модели исследуемых склонов создавались в виде неупорядоченных систем точек, набираемых в характерных точках рельефа и определенного числа поперечников — профилей.

На основании полученной цифровой метрической информации составлялись горизонтальные и фронтальные планы в масштабе 1:100 участков, подвергающихся эрозии. Они дали общую характеристику обнажений, по которым можно было получить

целый ряд количественных и качественных показателей. Построенные совмещенные профили повторных наблюдений дают более полную картину о геометрическом изменении исследуемых обнажений. По профилям вычислялись средние высоты изменений, а затем объемы разрушаемого грунта, позволяющие судить об интенсивности эрозионного процесса как в локальном месте, так и по всему обнажению (объекту).

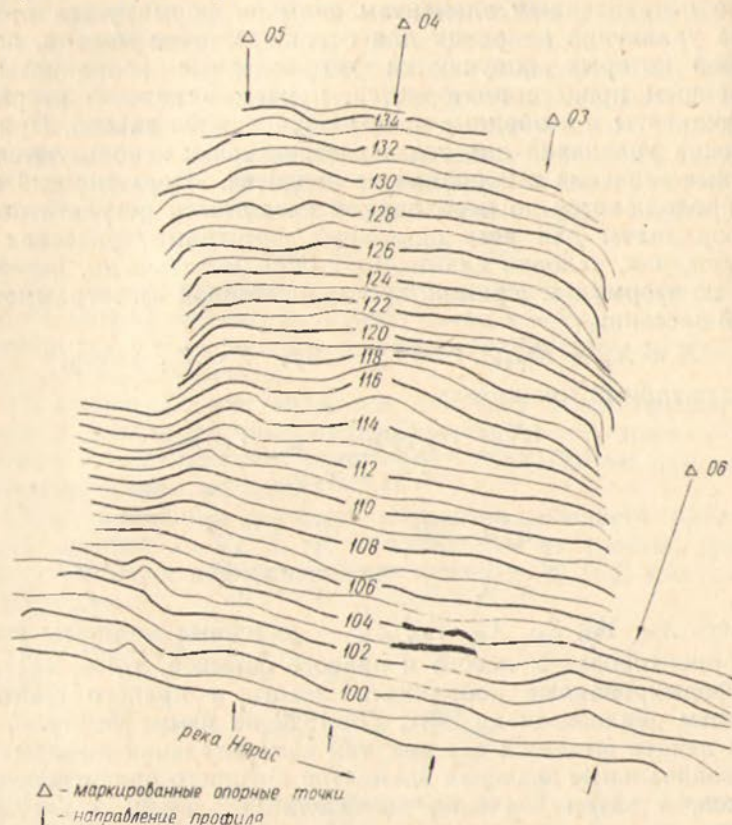
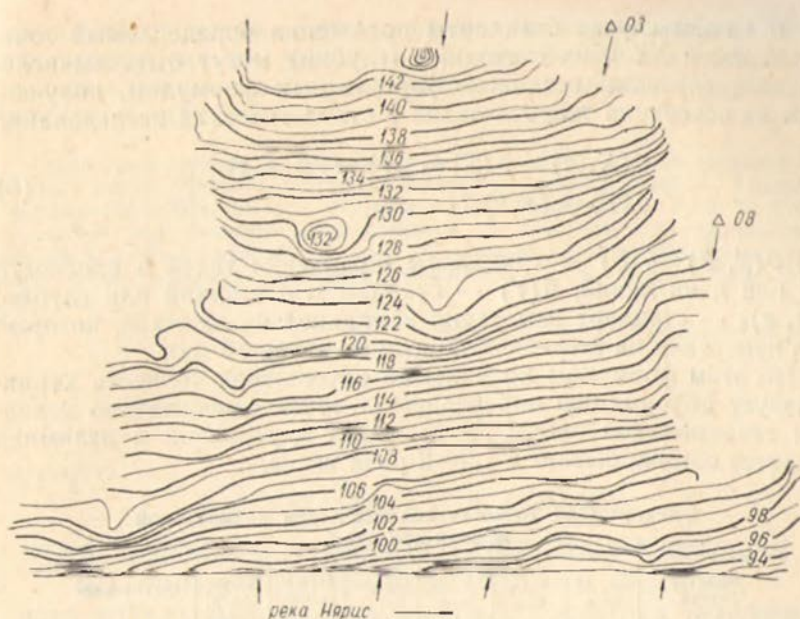


Рис. 1. Фрагмент горизонтального плана обнажений.

В целях наглядности приводятся фрагменты горизонтального и фронтального планов (рис. 1 и 2) и совмещенные профили-сечения (рис. 3) из одного обнажения соответственно.

Очень важным фактором является надежность используемого метода, т. е. с какой точностью получают определяемые параметры. Стохастическая модель дает точностную информацию определяемых параметров. Точность построения фотограмметрической модели — дуплета была подробно исследована путем математического моделирования [1]. Оптимальный вариант решения задачи получен при наличии четырех опорных точек, расположенных в угловых зонах объекта.



Δ - маркированные опорные точки

$\downarrow$ - направление профиля

Рис. 2. Фрагмент фронтального плана обнажений.

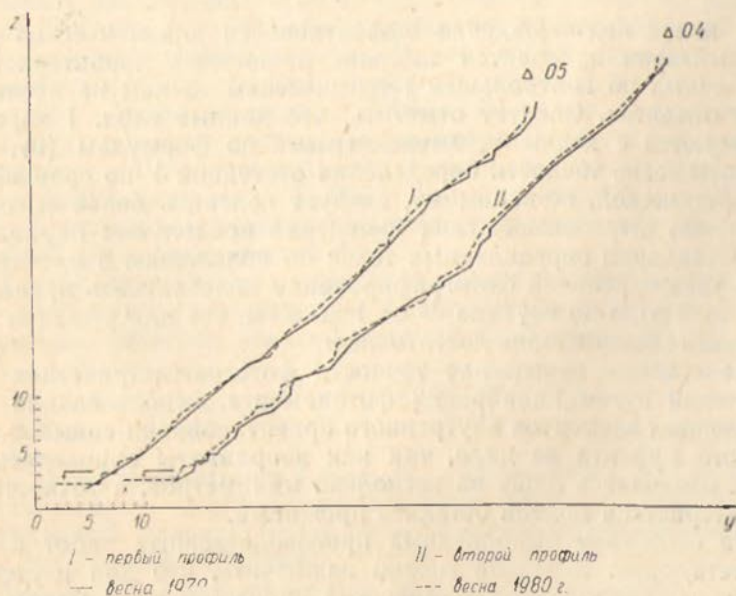


Рис. 3. Совмещенные профили обнажений.

В нашем случае стандарты положения определяемых точек в плоскости XZ и их отстояний (глубин) могут быть вычислены по следующим несколько упрощенным формулам, полученным на основании теоретических и статистических исследований

$$\left. \begin{aligned} b(X, Z) = b(S) &= 2(Y/f) b(x, z)_0; \\ b(Y) &= (Y/b) b(x, z)_0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $b(X, Z) = b(S)$ — стандарты положения точек в плоскости XZ или длин линий; $b(Y)$ — стандарты отстояний или глубин; $b(x, z)_0$ — стандарт измерения координат на снимках, который при измерении на стереокомпараторах равен 10 мкм.

По этим формулам получаемая абсолютная точность характеризует деформацию определяемых точек относительно исходной геодезической опоры. В то время внутренняя и взаимная точность обычно бывает в 1,5—2 раза выше.

Эмпирическая точность аналитической коллинеарной модели-дуплета *

Масштаб съемки 1/М	$b(x, z)$, мкм	$b(y)$, мкм	$b(x, z)_{\text{от}}$, мкм	Отно- шение $b(y)/$ $b(x, z)$	Отно- шение U/B	Число контр. точек	Фототеодо- лит
1:2000	22	37	11	1,7	4	9	TAL
1:650	16	28	8	1,8	4	8	Photoe

* Ошибки представлены в масштабе снимков.

В целях подтверждения эффективности аналитической фотограмметрии приводится таблица точностных характеристик, полученных по контрольным геодезическим точкам на исследуемых объектах. Следует отметить, что данные табл. 1 хорошо согласуются с данными, вычисляемыми по формулам (6).

Повышение точности определения отстояний Y по сравнению с теоретической, по-видимому, следует пояснить более высокой точностью стереоскопических измерений продольных параллаксов. Стандарты определяемых точек по положению в плоскости XZ с учетом условий фотографирования колебались в пределах от 1 до 5 см, а по глубине — от 1 до 8 см, что для решения наших задач было вполне достаточным.

Дальнейшее повышение точности фотограмметрических определений путем калибровки фотокамер и использования исправленных элементов внутреннего ориентирования снимков желаемого эффекта не дало, так как координаты определяемых точек изменялись лишь на несколько миллиметров, а точностные характеристики модели остались прежними.

На основании выполненных производственных работ и соответствующих анализов можно заключить, что для изучения различных природных динамических процессов даже малой интенсивности по размерам целесообразно применить аналитиче-

скую фотограмметрию при строгой обработке измерительной информации, так как в этом случае достигается максимальная точность окончательных результатов и максимальная производительность труда.

Список литературы: 1. Вайнаускас В. В. Система моделей оптимизации и оценки геодезических и фотограмметрических опорных сетей. — Геодезия и картография, 1979, № 8. 2. Жальнерукас А. П., Путримас Р. С. Построение модели под условием коллинеарности. — Геодезия и аэрофотосъемка, 1980, № 4. 3. Книжников Ю. Ф. и др. Склоновые процессы (фотограмметрический метод изучения склоновых процессов). — М.: Изд-во Моск. у-та, 1977, вып. 2.

Статья поступила в редколлегию 29. 12. 80
