

Б. И. ВОЛОСЕЦКИЙ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РУСЛОВЫХ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЙ

Согласно нормативным требованиям при проектировании мостовых переходов, гидротехнических, регуляционных и других сооружений на водотоках для прогноза русловых переформирований необходимо определять плановые смещения линий берегов, изменение живых сечений водотоков, смещение и изменение различных форм русловых образований.

Морфометрические зависимости, определяющие характеристики руслового процесса, выявляют по данным русловых съемок и промерных работ. Кроме планов с изображением глубин в горизонталях и положения различных русловых образований, непосредственно из наблюдений необходимо получить профили поперечных сечений (живое сечение водотока) в интересующих нас створах. Деформации речных долин и русловых образований находят из повторных геодезических измерений в фиксированной системе наблюдений. При этом точность измерений и их детальность зависят от назначения инженерного сооружения, технологических особенностей эксплуатации и конструкции строящегося объекта.

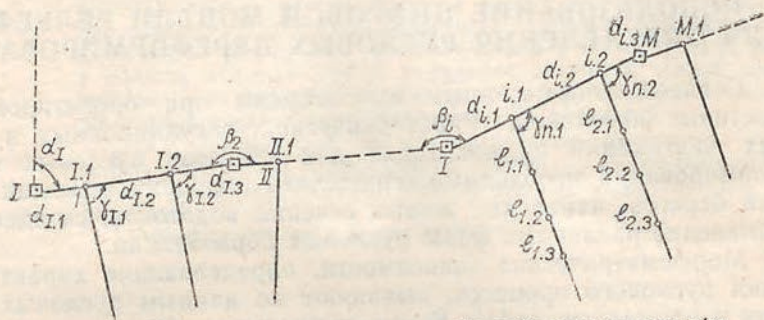
В общем случае деформацию в какой-либо точке промерного профиля можно вычислить из соотношения

$$\Delta Z_N^{j,j+1} = Z_N^{j+1}(X, Y) - Z_N^j(X, Y), \quad (1)$$

где  $\Delta Z_N^{j,j+1}$  — деформация в точке  $N$ , определяемая по результатам измерений в  $j$  и  $j+1$ -м циклах наблюдений;  $Z_N^j(X, Y)$  и  $Z_N^{j+1}(X, Y)$  — отметки точки  $(X, Y)$  соответственно в  $j$  и  $j+1$ -м циклах наблюдений.

При изучении деформации русла водотока и русловых образований (побочней, осередков, меандров и др.) необходимо определить изменение положения соответствующих точек этих элементов как в плане, так и по высоте. Для представления и обработки массивов данных применяется цифровая модель рельефа полурегулярного типа [3], в которой фиксируется положение поперечных сечений, а положение промерных точек на каждый из профилей при измерении глубины в общем случае произвольно.

Так как вычисление деформаций производится в фиксированных точках поперечного профиля, то определению этих величин предшествует аппроксимация функции поперечного сечения  $\omega = \omega(X, Y)$ , записанной в табличном виде аналитической зависимостью [1]. После аппроксимации значения отметок  $Z_i(X, Y)$  для каждого из поперечных профилей задаются в фиксированных точках с одинаковыми координатами  $X, Y$  для каждого из циклов наблюдений.



Система наблюдения для создания цифровой модели рельефа.

Планово-высотное обоснование русловых съемок создавалось в виде магистрального хода, проложенного по одному из берегов и закрепленного грунтовыми реперами. Промеры глубин производились в фиксированных створах, нормальных к оси потока, закрепленных створными знаками, в общем случае не совпадающими с реперами магистрального хода. Плановая и высотная привязка промерных точек, расположенных на поперечных сечениях, производилась относительно реперов магистрального хода известными методами [3, 4] с точностью 10 см в плане и 2 см по высоте.

Результаты измерений представлены в виде, удобном для введения в ЭВМ с учетом составления цифровой модели рельефа для системы наблюдений, показанной на рисунке. Массив исходных данных состоит из координат исходной точки  $X_1, Y_1, Z_1$ , исходного дирекционного угла  $\alpha_1$  расстояний между опорными пунктами магистрального хода  $D_i$ , углов поворота магистрального хода  $\beta_i$  и превышений  $\Delta Z_i$ . Кроме того, для каждого из промерных створов задаются углы между магистралю и промерным створом  $\gamma_i$ , расстояния от начала створа до промерной точки  $l_{jk}$  и соответствующие превышения  $\Delta Z_{jk}$ , а также расстояния от опорных точек до начала створа  $d_{ij}$ .

Для расчетов координат соответствующих точек и деформаций составлена программа, реализующая на ЭВМ ЕС 1033 разработанный согласно (1) алгоритм. Координаты точек определены из решения прямой геодезической задачи по дирекционным углам и соответствующим длинам сторон, отметки найдены с учетом изменения уровней воды на водомерных постах. В результате расчетов на печать выдаются массивы коор-

динат  $X, Y, Z$  в каждом из циклов наблюдений и значения деформаций  $\Delta Z_i^{j,j+1}(X, Y)$  для соответствующих точек с фиксированными во всех циклах координатами  $X, Y$ .

В табл. 1 приведены результаты вычислений деформаций русла р. Стырь по одному из поперечных сечений из двух циклов наблюдений. Для соответствующих точек с фиксированными координатами  $X_i, Y_i$  даны значения отметок в двух циклах наблюдений  $Z_i^I$  и  $Z_i^{II}$ , а также значения деформаций для этих же точек  $\Delta Z_i^{I,II}(X, Y)$ .

Таблица 1

Вычисление деформации из двух циклов наблюдений по створу I

Координаты, м		Отметки $Z_i$ , м		$\Delta Z = Z^{II} - Z^I$
$X$	$Y$	цикл I	цикл II	
948,603	1025,066	106,119	0,000	0,000
950,742	1029,585	104,276	104,246	-0,030
952,881	1034,104	103,543	103,202	-0,341
955,020	1038,623	102,764	102,588	-0,176
957,159	1043,142	102,356	102,266	-0,090
959,298	1047,661	102,423	102,265	-0,158
961,437	1052,180	103,990	102,430	-0,560
963,576	1056,699	103,364	102,914	-0,950
965,715	1061,218	104,080	103,516	-0,464
967,854	1065,737	104,191	104,032	-0,159
969,993	1070,256	104,227	104,259	+0,032
972,132	1074,775	104,214	104,027	-0,187
974,271	1079,294	104,179	104,143	-0,046
976,410	1083,813	104,149	104,177	+0,028
978,549	1088,332	104,152	104,183	+0,031
980,688	1092,851	104,215	104,219	+0,004
982,827	1097,370	104,340	104,340	-0,025
984,966	1101,889	104,630	104,602	-0,028
987,105	1106,408	105,035	105,061	+0,026
989,244	1110,927	105,161	105,161	0,000
991,383	1115,446	106,003	106,003	0,000

Глубина при промерных работах найдена двумя способами: при помощи эхолота с записью на эхограмму и дискретно (с определенным шагом) наметкой или ручным лотом. Задание массива глубин для расчетов на ЭВМ производится дискретно, так как глубины с эхограммы также имеют определенный шаг. Поэтому массив значений  $Z_i$  получаем аппроксимацией поперечного сечения аналитическими функциями. Для расчетов цифровой модели рельефа использована сплайн-функция.

При проектировании инженерных сооружений возникает необходимость предрасчета величины и характера изменения русловой обстановки, вызванного как естественными процессами руслообразования, так и воздействием строящегося объекта. Одна из методик, применяемая при предрасчете деформаций, основана на использовании известных соотношений динамики русловых потоков, куда входит и уравнение деформации русловых образований. Для рек горно-предгорной зоны среднюю

деформацию в расчетном створе за период руслообразования можно описать уравнением [2]

$$\Delta Z = \frac{m}{\gamma_n (1 - \varepsilon)} \frac{\partial H}{\partial X} \int_{t_n}^{t_k} \Phi_z dt, \quad (2)$$

где  $\Phi_z = R_{вл}/\omega$ ;  $R_{вл}$  — массовый расход влекомых наносов;  $\omega$  — площадь живого сечения потока;  $\gamma_n$  — удельный вес наносов;  $m$  — постоянный для данного створа коэффициент;  $\varepsilon$  — коэффициент пористости донных отложений;  $H$  — средняя глубина потока при заданном расходе воды;  $X$  — продольная координата;  $t_n, t_k$  — время начала и конца периода руслообразования.

Для вычисления значения средней деформации по формуле (2) необходимо определить функции  $\omega(Y, Z)$  — живого сечения потока,  $B(Y, Z)$  — ширины водной поверхности при заданном расходе воды и  $I(X, Z)$  — гидравлического уклона водной поверхности. При расчете первых двух функций используются аппроксимированные значения отметок рельефа поперечного сечения потока, которые рассчитываются с постоянным шагом  $\Delta Y$ . Площадь живого сечения потока можно получить из выражения

$$\omega = \iint dY dZ.$$

При заданном количестве расхода воды по этим же данным определяется средняя глубина потока и значение ширины водной поверхности.

При таких расчетах важное значение имеет оценка точности приближения выбранным полиномом рельефа речной долины. Сделана попытка анализа точности аппроксимации поперечного профиля водотока из сравнения результатов с применением полинома Чебышева и сплайн-функции.

Как показано в [1], для удовлетворительного приближения рельефа кубическим полиномом Чебышева необходимо на интервале поперечного профиля, представляющего отдельный элемент рельефа, иметь не менее пяти исходных точек. В этом случае можно получить удовлетворительный результат при заданной точности приближения. В случае аппроксимации кубическими сплайн-функциями для суждения о точности приближения необходимо иметь дополнительные данные.

В табл. 2 приведены результаты расчетов и сравнение отметок одних и тех же точек, полученных из расчетов двумя указанными способами. Как видно из табл. 2, отклонения аппроксимированных значений отметок от «истинных», полученных на эталонном профиле, при приближении сплайн-функциями несколько больше, чем при приближении полиномами Чебышева, и в нескольких точках достигают  $\pm 0,5$  м. Значения отклонений во втором случае не превышают в среднем 0,20 м и только в одном месте достигают 0,5 м. Нужно отметить, что эта точка соответствует сложной конфигурации рельефа, и отклонения в

первом и втором случаях почти совпадают по значению и по знаку.

Более высокая точность приближения заложена в самом алгоритме по способу полиномов Чебышева, но расчеты этим способом более громоздки и требуют больше машинного времени.

Для повышения точности аппроксимации необходимо увеличивать количество исходных точек. Наши исследования показывают, что для удовлетворительного приближения необходимо,

Таблица 2

Сравнение точности аппроксимации рельефа сплайн-функциями  
и полиномами Чебышева

L, м	Отметки, м			$H_0 - H_1$	$H_0 - H_2$	$H_1 - H_2$
	$H_0$	$H_1$	$H_2$			
15,0	224,80	224,64	224,85	+0,16	-0,05	-0,21
20,0	223,88	223,97	223,89	-0,09	-0,01	+0,08
25,0	223,10	222,82	223,10	+0,28	-0,09	-0,37
30,0	222,00	221,62	221,99	+0,38	+0,01	-0,37
35,0	220,30	219,90	220,33	+0,40	-0,03	-0,43
40,0	219,35	219,68	219,50	-0,33	-0,17	+0,18
45,0	220,03	219,99	220,11	+0,04	-0,08	-0,12
50,0	219,97	219,95	220,06	+0,02	-0,09	-0,11
55,0	219,86	219,86	219,79	0,0	+0,07	+0,07
60,0	219,88	219,90	219,73	-0,02	+0,15	+0,17
65,0	220,02	220,08	220,15	-0,06	-0,13	-0,07
70,0	220,10	220,02	219,97	+0,08	+0,13	+0,05
75,0	219,68	219,59	219,63	+0,09	+0,05	-0,04
80,0	219,53	219,67	219,61	-0,06	-0,08	+0,06
85,0	220,50	220,73	220,38	-0,23	+0,12	+0,35
90,0	221,52	221,60	221,57	-0,08	-0,05	+0,03
95,0	221,80	221,98	221,82	-0,18	-0,02	+0,16
100,0	221,75	221,91	221,91	-0,16	-0,16	0,0
105,0	221,75	221,80	221,94	-0,05	-0,19	-0,14
110,0	221,90	221,96	221,97	-0,04	-0,07	-0,01
115,0	222,15	222,13	222,08	+0,02	+0,07	+0,05
120,0	222,26	222,18	222,35	+0,08	-0,09	-0,17
125,0	223,90	224,13	223,64	-0,23	+0,26	+0,51
130,0	224,99	225,04	224,94	-0,05	+0,05	+0,10

чтобы на каждый элемент рельефа было не менее четырех-пяти исходных точек. Применение того или другого способа аппроксимации при составлении цифровой модели рельефа зависит от точности проектных расчетов и наличия соответствующих ЭВМ.

1. *Волосецкий Б. И.* Аппроксимация рельефа поперечного сечения речной долины // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. № 48. С. 8—13.
2. *Волосецкий Б. И., Каганов Я. И.* Использование морфометрических зависимостей, определяемых из геодезических наблюдений, для прогноза русловых деформаций // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1986. № 43. С. 10—15.
3. *Левчук Г. П., Новак Б. Е., Лебедев Н. Н.* Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений. М., 1983.
4. *Наставление по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки.* М., 1972.

Статья поступила в редколлегию 23.02.90