

АЭРОФОТОСЪЕМКА

УДК 528.74.001.6

А. Л. ИВЛЕВ

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО АЭРОСНИМКАМ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ СКЛОНОВ И ЗАЛЕГАНИЯ ПЛАСТОВ ЗЕМЛИ

Под элементами расположения склона земной поверхности (залега-
ния пласта осадочных пород) подразумеваются крутизна и направ-
ление наклона (угол и направление падения) плоскости склона (на-
пластования), а также ее уклоны по произвольно заданным направ-
лениям.

Сведения о таких элементах склонов бывают необходимы при про-
ектировании сооружений, планировке населенных пунктов, разработке
противоэрозионных и мелиоративных мероприятий и т. д., а об эле-
ментах залегания пластов — в геологических исследованиях.

В случае, когда нет возможности измерять указанные элементы
в натуре и нет подходящей топографической карты, их можно опреде-
лять по аэроснимкам. Очень удобно и с высокой точностью это осуще-
ствляется на геологическом стереометре ГС-4 [3] с применением уточ-
ненной формулы для определения частных уклонов стереофотограммет-
рическим путем [2].

Однако стереометр ГС-4 мало распространен, а стереоскопическое
измерение частных уклонов не всегда возможно и не самое простое,
когда надо определить уклоны по многим направлениям, уже зная
положение линии ската и ее крутизну (линию и угол падения пласта).

Ниже дается вариант решения, позволяющий определять при до-
статочно небольших затратах труда весь комплекс интересующих эле-
ментов скатов и пластов на любом стереометре. Кроме того, для изме-
рений по гиростабилизированным аэроснимкам можно применить сте-
реокомпаратор, любой параллаксометр или даже параллактические
пластины, если требования к точности результатов в той или иной сте-
пени понижены.

Предлагаемый способ заключается в следующем. Сначала опреде-
ляют уклоны сторон опорного угла, образованного тремя точками на
плоскости склона или обнажения поверхности пласта,

$$i = \frac{f \Delta p}{pl - t \Delta p}, \quad (1)$$

где f — главное расстояние аэроснимка; $\Delta p = p - p_a$ — разность про-
дольных параллаксов конца стороны угла и вершины; l — длина сто-
роны на аэроснимке (a_1 или a_2); t — расстояние от основания перпен-
дикуляра, опущенного из главной точки o аэроснимка на эту сторону,
до ее конца (значение t принимается положительным при расположе-
нии от перпендикуляра по направлению вершина угла—конец стороны
и отрицательным — обратно ему).

По полученным частным уклонам $i_1 = \operatorname{tg} v_1$ и $i_2 = \operatorname{tg} v_2$ затем нахо-
дят направление и полный уклон $I = \operatorname{tg} v$ плоскости опорного угла

$$I = i_{1(2)} \sec \gamma_{01(2)} \approx i_{1(2)} \sec \gamma_{1(2)}, \quad (2)$$

где γ_0, γ_0 — горизонтальные углы, образованные направлением полного угла наклона плоскости склона или пласта с частными v_1, v_2 , а γ_1, γ_2 — соответствующие углы на аэроснимке.

Для этого на аэроснимке фиксируют точку пересечения b перпендикуляров, восстановленных к направлениям сторон $a1$ и $a2$ опорного угла β или $k-a1$ и обратному продолжению $a2$ (при разных знаках i_1 и i_2) соответственно на расстоянии ki_1 и ki_2 от вершины a (рис. 1, 2). При этом k — множитель, обеспечивающий достаточно крупное построение, то есть он равен 1000 мм, 2000 мм или другой величине.

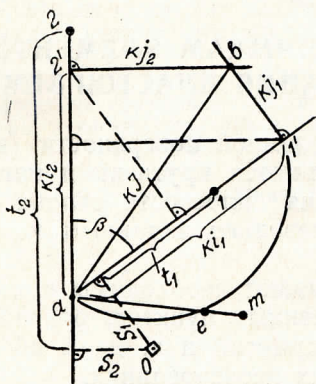


Рис. 1. Построение при одинаковых знаках уклонов i_1 и i_2 .

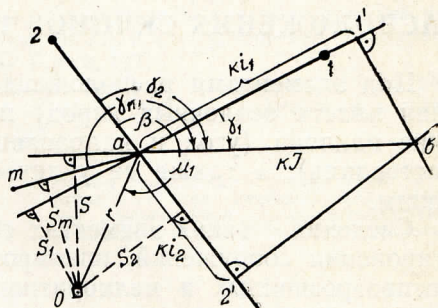


Рис. 2. Построение при разных знаках уклонов i_1 и i_2 .

Направление полученного отрезка ab практически и будет направлением полного наклона (наибольшей крутизны) плоскости опорного угла, а его длина — значением kl , так что

$$\operatorname{tg} \nu = l = \frac{ab}{k}. \quad (3)$$

Знак результата аналогичен знаку уклона i_1 .

Для определения уклона i_m плоскости по произвольно выбранному направлению am следует нанести окружность, используя ab диаметром (см. рис. 1). Длина хорды ae практически и будет значением ki_m и поэтому

$$i_m = \operatorname{tg} \nu_m = \frac{ae}{k}. \quad (4)$$

Высокоточное определение элементов расположения скатов и залегания пластов включает выбор и наколку на аэроснимках точек опорных углов, определение элементов взаимного ориентирования, измерение параметров опорных углов и вычисление искомых элементов. При этом, согласно опыту работ по определению элементов залегания на стереометре ГС-4 [3] и дополнительным исследованиям, необходимо обеспечить следующее:

1. Аэроснимки должны быть отпечатаны на фотобумаге, предварительно наклеенной на стекло, или на позитивной аэроплёнке АП-1 с белой подложкой.

2. Опорный угол должен быть возможно прямее, стороны — длинее, а накол точек — точнее (менее 0,1 мм). Причем пластовый опорный угол следует располагать в месте выхода на дневную поверхность плоского участка пласта, на четкой границе кровли или подошвы.

3. Короткие стороны ($l < 1,5-2$ см) следует измерять возможно точнее. Для этого при работе на стереометре СМ-4, как и на ГС-4,

можно пользоваться параллактическим винтом, предварительно ориентируя сторону вдоль направления перемещения этого винта путем поворота кассеты. При работе же на стереометре СТД-2 малые отрезки можно измерять с применением лупы (измерительной при $l < 1-1,5$ см).

4. Элементы взаимного ориентирования достаточно определять по формулам первого порядка малости ([4], табл. 2).

5. Разности продольных параллаксов следует измерять, включив корректоры по элементам взаимного ориентирования с учетом места нуля шкал и высотам опорных точек, определенным по имеющейся топографической карте наиболее крупного масштаба.

Измерение расстояний $l > 1,5$ см и t , определение уклонов I и i_m по i_1, i_2 удобно осуществлять с помощью специальной палетки на прозрачной жесткой основе формата 18×12 см.

На палетке имеется ряд прямых штрихов с интервалом через 5 мм, перпендикулярных к одной из продольных сторон (желательно со ско- сом) основы. От нее вдоль центрального штриха нанесена шкала, яв- ляющаяся в средней части на протяжении 5 см полумиллиметровой (для измерения l), а по краям — миллиметровой. В зависимости от величины уклонов, 1 мм шкалы может быть приравнен значению укло- на в одну, половину, две или пять тысячных.

Для измерения расстояния t палетку следует ориентировать так, чтобы ее начальная сторона (с началом шкалы) проходила через точ- ку o , а шкала совмещалась со стороной опорного угла β . При опреде- лении же уклона I шкалу началом направляют вдоль стороны $a1'$ этого угла до отсчета в точке a ранее полученного значения i_1 и прочерчи- вают вдоль начальной стороны вспомогательную прямую $1'B$ (см. рис. 1, 2). Затем шкалу началом направляют по $a2$ до отсчета в точке a значения i_2 и прочерчивают вдоль начальной стороны вторую вспомо- гательную прямую $2'B$. Если теперь совместить начало шкалы с точкой пересечения B вспомогательных прямых и направить ее через вершину угла, то в точке a можно отсчитать величину I . А если палетку распо- ложим так, чтобы начальная сторона проходила через точку B , а шкала совмещалась с направлением ae , то в точке a отсчитываем и величину уклона i_m (в тысячных).

В случае работы на обычном стереометре (СТД-2, СМ-4) с приме- нением рассмотренной палетки точность результатов будет примерно такая же, как при работе на ГС-4 с использованием приданной ему насадки с кругом, если будут соблюдены пять изложенных требований. Тогда, согласно [3], угол наклона плоскости опорного угла до 5° будет определен примерно со средней квадратической ошибкой $\pm 15'$ для $l > 6$ мм и $f = 100$ мм, а направление наклона — $\pm 3-8^\circ$. С увеличе- нием же крутизны плоскости и уменьшением l первая ошибка может достигнуть $\pm 2^\circ$ (при $f = 200$ мм), а вторая несколько уменьшится.

Последнее происходит потому, что наше решение, как и в [3], лишь учитывает искажение сторон l опорного угла β от наклона его плос- кости. Что же касается влияния указанного фактора на положение и размер самого угла β , то оно, как и влияние наклона аэроснимка на β и l , не учитывается. Последнее и вызывает значительное увеличение m_v с возрастанием v .

Отсюда, если надо избежать этого при $v > 5^\circ$, то следует исправить положение сторон опорного угла β , повернув $a1$ и $a2$ на углы

$$\varepsilon_1 = \rho \frac{S_1}{f} i_1 \quad \text{и} \quad \varepsilon_2 = \rho \frac{S_2}{f} i_2 \quad (5)$$

по ходу часовой стрелки при положительном значении и против хода — при отрицательном. Кроме того, необходимо уточнить полученное по- сле данного направление линии ската (падения), повернув на угол

$$\varepsilon = -\rho \frac{s}{f} I. \quad (6)$$

При этом s_1 , s_2 и s — длина перпендикуляра из точки o соответственно на направления $a1$, $a2$ и aB — берется с плюсом при расположении точки o справа от направления и с минусом — слева [1]; $\rho = 3438'$.

В случае работы с гиростабилизированными аэроснимками и невысоких требований к точности результатов методика работы может быть упрощена. Тогда аэроснимки можно печатать и на обычной фотобумаге. Необходимо лишь, чтобы ориентирование ее волокон на отпечатках стереопары было одинаковым и чтобы на кассетах последние хорошо выравнивались покровными стеклами под действием зажимов. Далее на шкалах корректоров можно устанавливать только место нуля. Важно сохранять перпендикулярность нитей СТД-2 к направлению передвижения общей каретки и возможно точнее ориентировать аэроснимки по главным точкам с помощью узелков нитей.

Рассмотрим ожидаемую точность результатов при таких упрощениях.

По рис. 1 нетрудно установить, что результаты ранее описанных построений с совместным использованием величин i_1 , i_2 аналогичны вычисленным по формулам:

$$I'^2 = i_1^2 + j_1^2 = i_2^2 + j_2^2,$$

или, поскольку

$$j_1 = (i_2 - i_1 \cos \beta) \frac{1}{\sin \beta}, \quad j_2 = (i_1 - i_2 \cos \beta) \frac{1}{\sin \beta},$$

$$I'^2 = (i_1^2 - 2i_1 i_2 \cos \beta + i_2^2) \frac{1}{\sin^2 \beta}; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \gamma'_1 = -\frac{j_1}{i_1} = \frac{i_1 \cos \beta - i_2}{i_1 \sin \beta}, \quad \operatorname{tg} \gamma'_2 = \frac{j_2}{i_2} = \frac{i_1 - i_2 \cos \beta}{i_2 \sin \beta}; \quad (8)$$

$$i'_m = I' \cos \gamma'_m. \quad (9)$$

Теоретически же для вычисления истинных значений I , γ_1 , γ_2 , i_m требуются формулы, содержащие углы $\beta_0 = \gamma_{02} - \gamma_{01}$ и γ_{0m} вместо $\beta = \gamma_2 - \gamma_1 = \gamma'_2 - \gamma'_1$ и γ'_m . И, поскольку тогда формулы (8) непосредственно дадут значения γ_{01} и γ_{02} , надо предусмотреть переход к γ_1 и γ_2 . При этом, пользуясь формулой искажения направления из [1], можно написать

$$\left. \begin{aligned} \Delta \gamma_1 &= \gamma_1 - \gamma_{01} = \frac{1}{f} [s_1 (i_1 - \alpha'_1) - s (I - \alpha')]; \\ \Delta \gamma_2 &= \gamma_2 - \gamma_{02} = \frac{1}{f} [s_2 (i_2 - \alpha'_2) - s (I - \alpha')]; \\ \Delta \beta &= \beta - \beta_0 = \Delta \gamma_2 - \Delta \gamma_1 = \frac{1}{f} [s_2 (i_2 - \alpha'_2) - s_1 (i_1 - \alpha'_1)]; \\ \Delta \gamma_m &= \gamma_m - \gamma_{0m} = \frac{1}{f} [s_m (i_m - \alpha'_m) - s (I - \alpha')], \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где α'_1 , α'_2 , α'_m и α' — углы (в радианах) наклона аэроснимка, образованные в плоскостях углов v_1 , v_2 , v_m и v , а согласно рис. 2 $s_1 = r \sin \mu_1$,

$$s_2 = r \sin(\beta + \mu_1), \quad \left(s = \frac{1}{\sin \beta} (s_1 \sin \gamma_2 - s_2 \sin \gamma_1), \quad s_m = r \sin(\gamma_m + \mu_1 - \gamma_1) \right).$$

Из формул (7) — (10) видно, что точность результатов существенно зависит не только от точности и размера уклонов сторон опорного угла, но и от величины неучтенного искажения его фотоизображения β вследствие влияния этих уклонов и наклона аэроснимка.

Дифференцируя формулы истинных значений I, γ_1, γ_2 по i_1, i_2, β_0 и принимая $d\beta_0 = \Delta\beta$, практически найдем выражения суммарной погрешности dI полного уклона ската (пласта) и частных ошибок $d\gamma_1 = \gamma_1' - \gamma_{01}$ и $d\gamma_2 = \gamma_2' - \gamma_{02}$ его направления на аэроснимке. Формулу полной ошибки $d\gamma$ этого направления получим как

$$(d\gamma_1 - \Delta\gamma_1) = \gamma_1' - \gamma_1 \quad \text{или} \quad (d\gamma_2 - \Delta\gamma_2) = \gamma_2' - \gamma_2.$$

Погрешность частного уклона di_m определим, дифференцируя выражение $i_m = I \cos \gamma_{0m}$ и принимая $d\gamma_m = \Delta\gamma_m + d\gamma$. Сохраняя члены первого порядка малости и перейдя к средним квадратическим ошибкам, в результате имеем

$$\left. \begin{aligned} m_I &\approx \sqrt{(k_1 m_i)^2 + \left(\frac{r}{f} I^2 m_{k'}\right)^2}; \\ m_{\gamma} &\approx \sqrt{\left(k_2 \frac{m_i}{I}\right)^2 + \left(\frac{r}{f} I m_{k''}\right)^2}; \\ m_{i_m} &\approx \sqrt{(k_3 m_i)^2 + \left(\frac{r}{f} I^2 m_{k'''}\right)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $m_I, m_{\gamma}, m_{i_m}, m_i$ — средняя квадратическая ошибка соответственно полного уклона, его направления на аэроснимке, частных уклонов, уклонов сторон опорного угла; $m_{k'}, m_{k''}, m_{k'''}$ — средние квадратические значения величин:

$$k' = \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \cos(\gamma_2 + \mu_1), \quad k'' = |\cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \sin(\gamma_2 + \mu_1) + \sin(\gamma_1 - \mu_1)|,$$

$$k''' = \frac{1}{2 \sin \beta} [\sin 2\gamma_2 \sin(\gamma_1 - \gamma_m) \sin(\beta + \mu_1) - \sin 2\gamma_1 \sin(\gamma_2 - \gamma_m) \sin \mu_1] + \\ + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_m \sin(\gamma_m + \mu_1 - \gamma_1);$$

$$k_1 = \frac{1}{\sin \beta} \sqrt{\sin^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_2}, \quad k_2 = \frac{1}{\sin \beta} \sqrt{\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_2},$$

$$k_3 = \frac{1}{\sin \beta} \sqrt{\sin^2(\gamma_2 - \gamma_m) + \sin^2(\gamma_1 - \gamma_m)}.$$

Приближенно $m_{k'} = m_{k'''} = 0,3$, $m_{k''} = 0,6$, что установлено при изменении $\gamma_1, \gamma_2, \mu_1, \gamma_m$ от 0 до 360° с интервалом через 30° (для простоты), а β как в пределах $60-120^\circ$, так и $30-150^\circ$. Коэффициенты же k_1, k_2, k_3 в среднем равны 1,1 и 1,4 соответственно при β , равном $60-120^\circ$ и $30-150^\circ$, а при β , равном 90° , k_1, k_2, k_3 равны 1, поэтому этот угол лучше выбирать прямым.

Выявим условие неучета вторых слагаемых первой и третьей формул (11). Для этого потребуем, чтобы вторые слагаемые не превышали одной десятой от первых, то есть пусть

$$\frac{r}{f} I^2 m_{k'} \leq \frac{k_1 m_i}{\sqrt{10}}; \quad \frac{r}{f} I^2 m_{k'''} \leq \frac{k_3 m_i}{\sqrt{10}}. \quad (12)$$

Отсюда получаем

$$\frac{r}{f} \leq \frac{k_1}{\sqrt{10 m_k}} \cdot \frac{m_i}{I^2}; \quad \frac{r}{f} \leq \frac{k_3}{\sqrt{10 m_k'''}} \cdot \frac{m_i}{I^2}. \quad (13)$$

Рассчитывая на $\beta = 60-120^\circ$, оба равенства окончательно приведены к одному

$$\frac{r}{f} \leq 1,2 \frac{m_i}{I^2}. \quad (14)$$

Итак, при расположении вершины угла β в радиусе, удовлетворяющем этому условию, практически можно ожидать

$$\left. \begin{aligned} m_I = m_{im} = 1,1 m_i, \\ m_I \leq 1,3 \frac{m_i}{I}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Согласно [2] и дополнительным исследованиям $m_i \approx 0,005$, если аэроснимки получены аэрофотоаппаратом на гиросtabilизирующей установке типа ГСУ, измерения по ним выполнены с допущением только изложенных упрощений, а

$$\frac{\Delta p}{p} \leq \frac{l}{5f}. \quad (16)$$

Используя это значение m_i , найдем по формуле (14) допустимое $\frac{r}{f} = 2,4; 1,2; 0,6$ и $0,2$ соответственно при $I = 0,05; 0,07; 0,10$ и $0,18$, то есть γ равно $3, 4, 6$ и 10° .

Следовательно, при f , равном $70-200$ мм, формате аэроснимка 18×18 см² углы γ до 5° можно определять, не исправляя положение сторон опорного угла β . А в других случаях это надо делать, если нет возможности обеспечить реальное $\frac{r}{f}$ меньше допустимого, а требование к точности результатов не снижается. Для чего необходимо повернуть стороны a_1 и a_2 на углы ϵ_1 и ϵ_2 , а искомую линию aB — на ϵ , как отмечалось раньше.

Придерживаясь изложенных рекомендаций и ограничений для $\frac{\Delta p}{p}$ и $\frac{r}{f}$, можно ожидать $m_I = m_{im} \pm 0,006$, то есть $m_v = \pm 20'$, $am_v = \pm 7; 4; 2,5$ и 2° соответственно при $I = 0,05; 0,10; 0,15$ и $0,20$, то есть $\gamma = 3, 6, 8$ и 10° .

Таким образом, предлагаемое для гиросtabilизированных аэроснимков упрощенное решение позволяет определять углы наклона ска- тов местности и пластов горных пород с несколько большей или такой же точностью, какую можно получить при использовании эклиметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев А. Л. Определение углов наклона аэроснимка вдоль произвольных направлений. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1970, в. 5.
2. Ивлев А. А. О точности уклонов местности, полученных по гиросtabilизированным аэроснимкам без полевой подготовки. — В сб.: «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1971, в. 13.
3. Кожевников Н. П. [и др.]. Геологический стереометр. — «Геодезия и картография», 1968, № 5.
4. Наставление по топографическим съемкам в масштабах $1:10000$ и $1:25000$, ч. II. Камеральные работы. М., «Недра», 1965.

Работа поступила в редколлегию 16 марта 1971 года. Рекомендована отделом инженерной фотограмметрии Новосибирского научно-исследовательского института прикладной геодезии.