

Ф. В. НИКУЛИН, Н. В. ХМЕЛЕВА, Б. Ф. ШЕВЧЕНКО

## ОБ ИЗУЧЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ОСЫПИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Высокие измерительные и информационные свойства фототеодолитных снимков постоянно находят новые сферы применения в научных исследованиях. В изучении динамики рельефа фотограмметрический метод не имеет себе равных. Он позволяет зафиксировать пространственное состояние поверхности изучаемого объекта в данный момент времени в виде фотограмметрической модели. Серия моделей, полученных при стационарных исследованиях различных рельефообразующих процессов, фиксирующих на разных этапах состояние созданных ими объектов, обеспечивает выявление динамики и кинематики этих процессов.

## Объект стационарных наблюдений

Начиная с 1963 г., по инициативе Н. И. Маккавеева, в приморской зоне Абхазии авторы проводят регулярное изучение фотограмметрическим методом процессов деформации склонов, речных русел и оврагов. Возможности и преимущества метода особенно наглядно выявляются на примере изучения склоновой осыпи в долине р. Жоэква. Осыпь образовалась на крутом коренном левом берегу долины, в средней его ча-



Рис. 1. Общий вид осыпи.

1 — границы зон обрушения; 2 — положение замаркированных створов; 3 — положение замаркированных обломков

сти. Уступ осыпи (рис. 1, а) сложен толсто- и среднеплитчатыми, местами мелланитизированными известняками. Высота уступа на северном фланге равна 10 м, на южном увеличивается до 50 м. В том же направлении возрастает от 50 до 150 м относительная высота бровки уступа над поверхностью поймы, на которую опирается осыпь. Непосредственно под уступом в виде шлейфа подножья располагается тело осыпи.

(рис. 1, б), на поверхности которого наряду с сетью микро- и макроэрозионных форм (а) заметны каменные потоки (г) и конусы выноса (д).

Основное внимание при исследовании было обращено на изучение активности осыпи, точнее на механизм движения поверхностного слоя. Активность осыпей и состояние их поверхности определяется способом, скоростью и массовостью смещения обломочного материала. В частности, угол естественного откоса, фиксирующий переход поверхности осыпи к относительно равновесному состоянию, создается в результате смещения и перегруппировки обломков.

### Методы стационарных наблюдений

Для выявления и регистрации происходящих на осыпи процессов использовалась серийная аппаратура для наземной стереофотограмметрической съемки Народного предприятия К. Цейсс (ГДР). Съемка фототеодолитом 19/1318 производилась с вертикального и горизонтального базисов с интервалами, найденными опытным путем в зависимости от параметров съемки и целей эксперимента. Интервалы колеблются от 5 дней до 1 года. При больших интервалах между съемками некоторые особенности движения материала осыпи могут быть не выявлены. Применение короткопериодических съемок позволяет детализировать наблюдения, выполнять их как бы крупным планом. Дублирование съемок эталонных участков с более близкого расстояния помогает выявить механизм движения мелкообломочной фракции. Наличие в пределах снимков неподвижных объектов позволяет иметь достаточное количество точек для фотограмметрической связи последовательных съемок и облегчает задачу сохранения постоянства ориентирования съемочной оси без трудоемких работ. При повторных съемках сохранялось постоянство условий освещения (путем расчета времени прежней высоты Солнца), использовался один и тот же сорт эмульсии и способ фотолабораторной обработки пластинок. Этим достигается относительное постоянство плотности изображения и одинаковое положение теней.

Обработку и дешифрирование повторных съемок производили комбинированием двух способов: а) способа сравнения стереоскопических моделей, полученных в разные моменты времени с одних и тех же базисов; б) способа сравнения разновременных одиночных снимков, полученных с одной и разных точек базиса.

Первый способ позволяет получать различные характеристики фиксированного состояния поверхности объекта на момент съемки (Ивернова, 1954). Этот способ обработки применяли для снимков, полученных с интервалом более 3 лет, или в случае полного изменения поверхности осыпи и ее структуры в результате обвала. Только этим способом можно было получить изменение высоты поверхности, объемы и другие пространственные характеристики. Точность способа зависит главным образом от расстояния, с которого производится съемка, и длины съемочного базиса. В нашем случае средние ошибки определения смещений составляют  $\pm 0,2—0,3$  м, изменений высот поверхности —  $\pm 0,15$  м. По снимкам вполне достоверно определяются средние размеры гранулометрического состава всех фракций, начиная со щебенки.

Способ сравнения разновременных одиночных снимков и использование смещений в качестве продольных параллаксов дают совершенно новые возможности при изучении динамики и кинематики природных явлений и значительно расширяют рамки применения фототеодолитного метода. Применительно к осыпным, эрозионным и русловым процессам возможности и граничные условия способа выявлены впервые при наших стационарных исследованиях. Сущность способа заключается в следующем. Если два разновременных снимка с одной и той же точки наблюдать стереоскопическим способом, то при отсутствии изменений

на осыпи за время между съемками она воспринимается плоской. Переместившиеся обломки и их группы наблюдаются как нарушение «комфортных» условий рассматривания. Способом мигания можно установить причину этого нарушения. Если снимки развернуть в их плоскости так, чтобы направления смещений были параллельны главному базису, то сместившиеся частицы наблюдатель воспринимает стереоскопически вне плоскости, создаваемой неподвижными объектами. При поступательном характере смещений поверхность осыпи воспринимается в виде рельефной модели, глубина расчленения которой отражает скоростное поле. Наблюдаемая таким образом поверхность смещения представляет собой модель кинематики, так как позволяет выявить движущиеся части и определить их кинематические характеристики. Модели смещения позволяют одновременно изучать динамику процессов, так как и при этом способе обеспечивается фиксация изменений отдельных факторов.

При совместном наблюдении разновременных снимков, полученных с разных точек базиса, отдельные сместившиеся обломки воспринимаются вне поверхности обычной стереоскопической модели, а смещения морфологических форм непосредственно не воспринимаются, но приводят к деформации моделей, что таит в себе также новые измерительные возможности. Способ сравнения разновременных снимков, полученных с одной точки стояния, особенно при наличии на снимках неподвижных объектов, превосходит по точности описанный выше способ сравнения моделей. Достаточно сказать, что при отстояниях в 200 м выявляются и уверенно измеряются смещения более 2—3 см (Иверонова, 1954; Ostaficzuk, 1964).

На первом этапе обследования осыпи при обработке снимков использовался способ сравнения разновременных стереоскопических моделей, когда результаты дешифрирования и измерения снимков обобщались в серии специальных карт масштаба 1 : 500. Этот масштаб обусловлен прежде всего тем, что графические построения в нем не являются новым источником погрешностей при определении изменений.

### Полученные материалы

В результате обработки повторных снимков на основе пространственных базисов составлена серия карт двух типов: а) карты факторов образования осыпи и б) карты крупности поверхностного слоя обломков и скоростей их движения.

К первому типу относятся карты распределения участков осыпи с различной крутизной поверхности и степени задернованности, а также топографическая карта. Особое место заняла геоморфологическая карта, на которой были зафиксированы все формы рельефа, созданные на поверхности осыпи к моменту первой съемки. Карты факторов послужили материалом для морфометрического анализа, результатом которого явились некоторые статистические закономерности, характеризующие рельеф осыпи.

Выделение участков осыпи, занятых разными фракциями механического состава, осуществляется по снимкам проще, чем в натуре, в связи с лучшей обзорностью, свойственной снимкам. На картах, относящихся к разным срокам, показаны участки распределения обломочного материала по фракциям. Определение размера частиц достигалось сравнением обломков преобладающего размера на данном участке с измерительными марками прибора. Действительный размер вычислялся по угловой величине соответствующей марки и удалению обломка от фотостанции. По условиям съемки, крупность отдельных частиц можно определять с ошибкой  $\pm 0,03$  м, хотя ошибка осреднения фракции часто превышает эту величину, так как оценка преобладающего размера производится на глаз. Следует отметить, что наблюдатель способен разли-

чать по снимкам более тонкие вариации скоплений обломков путем сравнения их между собой.

Карта скоростей движения обломков составлялась на основе наблюдений за движением специально замаркированных из состава поверхностного слоя осыпи отдельных частиц-индикаторов или целых групп

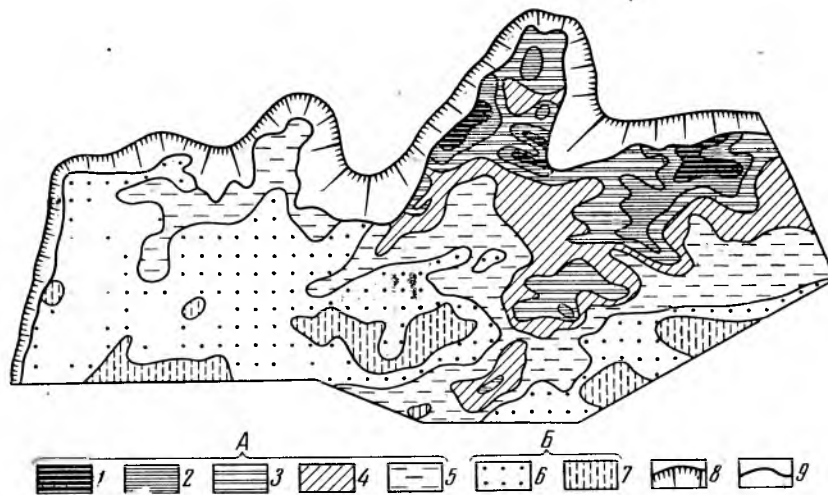


Рис. 2. Изменение высоты поверхности осыпи за период с 1963 по 1968 г.  
 А. Участки повышения поверхности осыпи: 1 — свыше 2 м; 2 — на 1,5—2 м; 3 — на 1,0—1,5 м; 4 — на 0,5—1,0 м; 5 — на 0—0,5 м  
 Б. Участки понижения поверхности: 6 — на 0—0,5 м; 7 — на 0,5—1,0 м; 8 — бровка уступа; 9 — подошва уступа

обломков. Первые в количестве 25—30 штук располагались спорадически, вторые — в виде створов среди частиц поверхностного слоя осыпи. Их местоположение показано на рис. 1. Каждый раз перед съемкой совершались подъемы на осыпь наблюдателей для отыскания ранее замаркированных частиц и обозначения их листами бумаги с целью обеспечения опознавания на снимках. Изменение положения замаркированных обломков определялось путем сравнения очередной стереомодели с планом, составленным по материалам первой съемки. Пути движения обломков и полученные на их основе величины скоростей фиксировались на соответствующей карте.

Установлены два вида движения обломков: 1) групповое движение, когда смещается совокупность обломков на сравнительно небольшие расстояния. При этом скорости отдельных обломков нередко могут существенно отличаться от средней скорости основной массы обломков; 2) смещение отдельных обломков.

В процессе движения обломков по поверхности осыпи один вид смещения может сменяться другим. Средние скорости смещения обломков зависят, помимо других факторов, от погодных условий. В периоды, когда осадков выпадало меньше нормы и поверхностные слои осыпи высыхали, возрастала сыпучесть слагающего ее рыхлого материала. Обильное промачивание тела осыпи также способствует усилению деформаций. Так, в 1967 г., когда количество выпавших осадков сильно превысило норму, наблюдались большие, чем обычно, скорости движения обломков.

На рис. 2 представлена карта изменения высоты поверхности осыпи, полученная как разность топографических поверхностей по состоянию на 1963 и 1968 гг. Линия нулевого изменения мощностей, являющаяся границей отложившегося и унесенного материала, разделяет осыпь на две части. Максимальный по мощности слой обломков накопился в юж-

ной половине осыпи, куда поступали продукты обрушения, происшедшего в 1968 г. Мощность слоя здесь убывает вниз по склону от 2 до 0,5 м. Верхний участок осыпи в северной половине оставался стабильным, а ниже по склону отмечено понижение поверхности осыпи на 0,5 м.

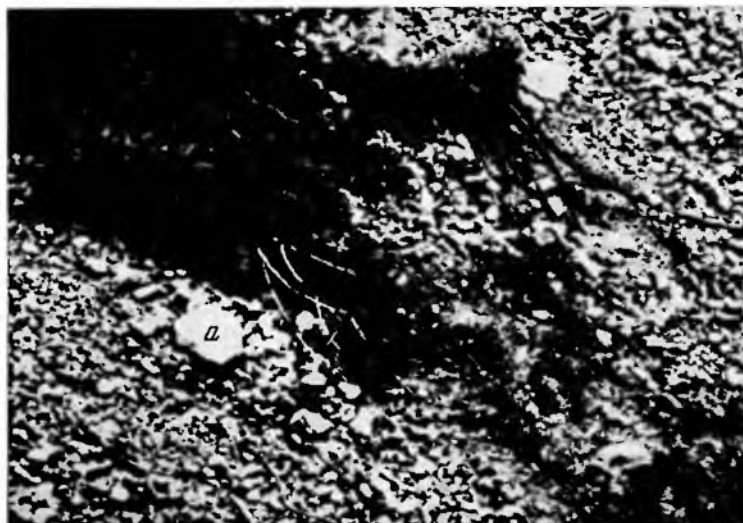


Рис. 3. Смещение обломка из точки *a* (1964 г.) в точку *б* (1966 г.).

Кроме основного источника питания осыпи — пород, слагающих вертикальный уступ, — верхняя часть осыпи получает мелкообломочный материал, поступающий по эрозионным врезам, водосборы которых захватывают выровненные поверхности верхней части склона долины. Потоки образовали цепь мелких конусов выноса у подножья уступа. Поверхность конусов выноса за 6 лет повысилась на 1—2 дм. Несмотря на водную эрозию, вершины конусов обнаруживают тенденцию к поднятию по профилю эрозионных врез.

Мощность деятельного слоя получили путем сравнения продольных и поперечных профилей осыпи, которые составлялись на стереоавтогра-

фе вдоль одних и тех же направлений на разные моменты съемки, а также по карте изменения высоты поверхности. Оказалось, что мощность активного слоя в разных частях осыпи сильно колеблется. В среднем она составляет 0,5 м, но местами достигает 2 м.

Способ определения скоростей движения по наблюдениям разновременных снимков, полученных с одной и той же точки, выгодно отличается от способов, где применяется маркировка обломков.

Эти преимущества следующие: 1) способ позволяет выявлять практически все имеющиеся на обоих снимках сместившиеся обломки и измерять скорости тех из них, которые сместились скольжением, чем обуславливается получение устойчивых статистических характеристик; 2) получаемые результаты объективны и не зависят от метода, как это имеет место в способе покрашенных створов (Иверонова, 1954; Gardner, 1969); 3) наблюдение происходит за ненарушенным состоянием осыпи, так как при маркировке обломков движение наблюдателей по ее поверхности приводит к искусственному нарушению равновесия обломков; 4) отпадает необходимость в трудоемкой работе по отысканию и опознанию маркированных обломков при повторных посещениях осыпи.

Описываемый способ применялся в двух вариантах. Первоначально мы пользовались способом мигания, когда поочередным рассматриванием снимков на стереоприборе идентифицировались отдельные сместившиеся обломки, а затем винтом поперечных параллаксов измерялась величина вертикальной составляющей смещения. В основном это были заметные, крупные обломки. С возрастанием интервала между съемками или при большой интенсивности движения опознавание обломков затрудняется в результате изменения окружающей их среды. На рис. 3 показано положение крупного обломка, сместившегося из точки *a* в точку *b* за 22 месяца. В этом варианте реализуются не все преимущества способа. Разновременные снимки с одной точки мы разворачиваем теперь в их плоскости на 90° и используем вертикальную составляющую смещения в качестве продольного параллакса. Стереоскопическое наблюдение таких снимков позволяет выявить происшедшие изменения и измерить горизонтальную и вертикальную составляющие смещения параллактическими винтами стереокомпаратора. При оценке качественных показателей изменений снимки ориентируются по направлению движения.

### Некоторые особенности формирования осыпей

Установлено, что помимо движения единичных обломков и небольших их совокупностей происходит движение аккумулятивных форм разных порядков. Таковы движения отдельных «гнезд» обломков и каменных потоков нескольких видов. В балансе перемещаемого вещества смещение аккумулятивных форм по линиям гравитации составляет основную статью, так как этим видом движения охвачена наибольшая масса обломков, несмотря на то, что скорости отдельных частиц превосходят скорости потоков.

Дешифрирование долгр- и короткопериодичных съемок позволило установить в качестве основного способа группового движения обломков сползание или скольжение с небольшими угловыми скоростями. Способ качения характерен в основном для моментов обрушений, когда падающие глыбы и обломки обладают большой кинетической энергией. В периоды относительно стабильного состояния осыпи качением смещаются лишь одиночные обломки, чаще изометричной формы, или более мелкие, падающие в связи с микроэлементами поверхности. Интенсивность такого вида движения зависит от шероховатости поверхности. Выявлено, что нарушения равновесия зарождаются спорадически в разных участках поверхности осыпи, а затем затухают или развиваются в тот или иной вид движения. Статистическая обработка измерений

скоростей еще не закончена. Мы ожидаем получения очень полной картины движения материала осыпи. Однако уже сейчас можно сказать, что существует различие в скоростях мелко-и крупнообломочных форм, мелких и крупных одиночных обломков, что скорости последних колеблются в больших пределах, а скорости форм на порядок меньше и очень стабильны.

Сравнение моделей смещения с короткими и длинными интервалами показывает, что результирующая картина не отражает всего многообразия частных изменений. Отсюда вытекает необходимость в более или менее длинном ряде повторных съемок. При больших интервалах между съемками и интенсивно протекающих гравитационных процессах наблюдение за движением фотограмметрическим способом сильно затрудняется. Тогда происшедшие изменения в состоянии поверхности осыпи фиксируются путем сравнения обычных моделей в виде изучения слоя материала различной мощности. Момент перехода отдельных смещающихся обломков в слой при работе с одновременными снимками, полученными с большим интервалом, определяется исчезновением стереоскопического восприятия из-за полного изменения внешнего вида дневной поверхности, т. е. появлением неконгруэнтности изображений. Таким образом, свойство неконгруэнтности снимков является временным показателем активности проявления процессов. Период наступления неконгруэнтности для наиболее активных участков осыпи составлял от 2 до 3 лет.

Неконгруэнтность может наступить как вследствие полной смены обломков, так и в результате изменения ориентировки большинства из них. Это свойство снимков использовалось нами для установления границ распространения стабильных и активных участков осыпи. Относительно стабильные участки на осыпи Жозквара приурочены к скоплениям крупных глыб. Последние при движении обломков играют роль центров аккумуляции более мелкого материала. Отчетливо прослеживается обратная связь между степенью задернованности поверхности и активностью движения материала.

Короткопериодические съемки, выполненные в 1969 г., дают наглядное представление о непосредственной связи активности движения обломков со степенью увлажнения осыпи. Этими съемками зафиксировано состояние осыпи в течение трех периодов с 28 августа по 1 октября. Первый период составляет часть очень сухого лета, второй характеризуется обильными дождями, в течение третьего периода дожди перепали, но были необильными.

В дождливый период сильно изменились внешний вид и строение поверхности в верхней части осыпи, сложенной мелкообломочной фракцией. Здесь вода не успевала фильтроваться и концентрировалась в потоки, формирующие эрозионные борозды и небольшие конусы выноса. Деятельность потоков прекращалась в местах усиленной фильтрации воды в разных частях осыпи на разных отметках. В результате переувлажнения осыпи в этот период наблюдалось очень заметное повышение активности движения в средней части осыпи как по числу смещающихся обломков, так и по их скоростям.

В третий период активность осыпи резко понизилась. В периоды выпадения дождей формировались значительно более маломощные потоки, произошло смещение двух-трех крупных обломков на выровненных участках и небольших совокупностей обломков способом скольжения. В нескольких местах отмечались изолированные пятна «пошевелившихся» обломков. Это доказывает, что активность сырой, но не переувлажненной осыпи сильно затухает из-за увеличения сил сцепления между частицами.

По снимкам можно устанавливать участки обрушения, датировать обвалы и получать их количественные характеристики. За шестилетний

период наблюдений крупный обвал уступа произошел летом 1968 г. и был связан, по-видимому, с усилением сейсмической активности в этом районе. На рис. 1 показаны зоны обрушения уступа во время этого обвала. Изучение отложившегося на осыпи после обрушения материала позволяет восстановить общую картину обвала. Самые крупные глыбы объемом 2—5 м<sup>3</sup> (рис. 1, е) откатились на 40 м от подошвы уступа. Несколько более мелких глыб округлой формы, диаметром до 1 м, прошли примерно половину длины осыпи и остановились на перегибе поверхности. Обломки меньшего размера группами задержались на разных уровнях. Погребенная часть осыпи до обвала была сложена значительно более мелкими обломками. Ранее здесь наблюдались лишь отдельные обломки диаметром до 0,5 м. Этот факт свидетельствует о том, что подобные крупные обвалы уступа происходят через значительные промежутки времени, в течение которых крупные обломки от предшествующего обвала успели сместиться вниз или оказались покрытыми более мелкими.

Следует отметить, что на участке аккумуляции глыб обвала 1968 г. сильно возросли скорости смещения обломков. Наблюдения за движением обломков в интервал, непосредственно следовавший за обвалом, показали, что в течение месяца, характеризующегося относительной стабильностью погодных условий, скорости обломков оказались на уровне среднегодовых за предшествующий пятилетний период.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Иверонова М. И. Движение осыпей. Тр. Ин-та геогр. АН СССР, вып. 60. М., 1954.  
Gardner J. Observations of surficial talus movement. Z. Geomorfologie, 1969, v. 13, № 3.  
Ostaficzuk St. Die Anwendung der terrestrischen Photogrammetrie zur Überwachung tätiger Rutschungsgebiete.— Wissenschaft. Z.— Techn. Univ. Dresden, 1964, B. 13, H. 2.

Географический факультет,  
МГУ им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
7.IV.1970

#### ON THE STUDY OF THE MOVEMENT OF ROCK WASTE BY A PHOTOGRAMMETRIC METHOD

F. V. NIKULIN, N. V. KHMELEVA, AND B. F. SHEVCHENKO

#### Summary

Stationary surveys from the same bases and the same orientation of the optical axis and the height of a theodolite's objective make it possible to detect the change of state, form and spatial situation of the studied object's surface. Pairs of simultaneous and non-simultaneous pictures are grouped for deciphering and measuring.

There predominates a well regulated movement of the surface layer of rock waste by way of the sliding of surface forms and separate fragments. The intensity of movement depends on the degree of saturation of the active layer of water. The velocity of movement of unmarked fragments has been measured with great precision.