РЕКОМЕНДАЦИИ

по изучению складчатой структуры скальных массивов при инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства

П-827-85
ГИДРОПРОЕКТ

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт Гидропроект
имени С. Я. Жука

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ИЗУЧЕНИЮ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

П-827-85
Гидропроект

Москва
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1987

УДК 627.8.624.131

Составитель *А. А. Варга*

Изложены методические вопросы инженерно-геологического изучения складчатой структуры скальных массивов. Рассмотрены особенности этих структур и их практическое значение для гидротехнического строительства.

Рекомендации рассчитаны на инженеров-геологов и гидротехников.

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

П-827-85
Гидропроект

Р 3302000000-447
051 (01)-87 без объявл.

© Всесоюзный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект имени С. Я. Жука, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

Структура массивов осадочных вулканогенных и метаморфических пород характеризуется большим разнообразием морфологии и размеров складок. Поэтому выявление и инженерно-геологическая оценка складок нередко вызывают значительные трудности, особенно в сложнодислоцированных метаморфических толщах.

В структурной и рудничной геологии изучение морфологии складок и их происхождения ведется давно, и этой теме отведено много места в научной геологической литературе. В то же время вопросам инженерно-геологического изучения складок и кливажа уделялось недостаточно внимания. Эти вопросы рассматриваются в работе [12] и в небольшой степени затрагиваются в работах [13, 14] и другой литературе по инженерной геологии. В современной научно-методической литературе по инженерно-геологическому изучению складок отсутствует четкая систематизация складчатых форм, единая общепринятая терминология и недостаточно освещены многие другие спорные методические вопросы. Недооценка практического значения складок, а также теоретических и методических проблем их изучения подтверждается отсутствием специального пособия по инженерно-геологическому изучению и оценке складчатой структуры скальных массивов.

В данной работе делается попытка восполнить эти пробелы и решить следующие задачи:

обобщить материалы по складчатой структуре скальных массивов, имеющие теоретическое и практическое значение для гидротехнического строительства, обратив особое внимание на факторы, которые существенно влияют на инженерно-геологические свойства массива, а также на те вопросы, которые недостаточно освещены или по которым имеются противоречивые высказывания в научно-методической литературе;

уточнить терминологию, применяемую при инженерно-геологическом изучении складок в скальных массивах;

раскрыть инженерно-геологическое значение складок и механизм их влияния на свойства массива, акцентируя внимание на ошибках и просчетах, которые могут быть допущены при гидротехническом строительстве из-за слабого или несвоевременного изучения складчатой структуры массива;

описать основные особенности формирования складчатой структуры, проблемы генетической классификации складок, взаимосвязи с другими структурными факторами, использование геоморфологических признаков для изучения истории формирования складчатости;

обобщить опыт инженерно-геологического изучения складок, отметив основные проблемы и недостатки существующей методики; дать рекомендации по методам изучения и инженерно-геологической оценке складчатой структуры массива;

обобщить опыт и дать рекомендации по учету складчатой структуры

массива при обосновании основных проектных решений: выборе створа плотины, конструкции и размеров сооружений, глубины съема ослабленных пород, мероприятий по укреплению скальных оснований, ослабленных структурными дефектами;

обобщить материал по связанному со складками кливажу, особенностям его формирования и влияния на инженерно-геологические свойства скального массива, а также по методам его изучения; дать методические рекомендации по инженерно-геологическому изучению кливажа.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЕ СКАЛЬНОГО МАССИВА

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Складками пластов горных пород можно называть любые изгибы плоскостных структурных элементов массива, но обычно под ними подразумевают лишь изгибы слоистости в осадочных, вулканогенных и метаморфических толщах. Следует подчеркнуть важность четкого различия понятий: структурные формы (конкретные единичные складки) и складчатая структура массива (совокупность и взаимоотношения всех складок разного порядка на данном участке земной коры). Употребление термина "складчатая структура" по отношению к единичной складке не рекомендуется, хотя это нередко встречается в литературе, особенно посвященной нефтяной геологии.

Изучение складок и разработка их классификации затрудняются большим природным разнообразием их размеров, формы (рис. 1), внутренней структуры, условий залегания и взаимоотношений. Основные морфологические типы складок приведены в табл. 1. Описание складок осложняется также наличием комбинированных или переходных форм между ними и другими структурами. К переходным формам между складками и тектоническими разрывными нарушениями можно отнести: разорванные флексуры или тектонические нарушения с большим изгибом боковых пород, где амплитуда смещения вследствие изгиба соизмерима с амплитудой по разрыву; складчатые покровы типа шарьяжей, особенно характерные для альпийской складчатой системы. Разорванные флексуры наблюдались на участках плотин Кариба (Зимбабве), Бувант (Франция), Кассеб (Тунис), Рава (Ирак).

Переходные формы между складками и инъективными структурами включают в себя диапировые формы и птигматиты. Формами, сочетающими складки и сланцеватость, являются складки скалывания, в которых пластическое течение горных пород при детальном рассмотрении представляется бесконечно большим количеством очень малых смещений по мелким близпараллельным трещинам.

Главными морфологическими типами складок являются антиклинали, синклинали и флексуры. А н т и к л и н а л ь — это складка, в ядре которой находятся более древние слои. Обычно она обращена изгибом вверх, и слои падают от него в обе стороны. С и н к л и н а л ь — это складка, в ядре которой находятся более молодые пласты, чем на крыльях. Обычно она обращена изгибом вниз, и пласты на крыльях падают навстречу друг другу. Поэтому для выделения антиклиналей и синклиналей необходимы данные об относительном возрасте слоев. При отсутствии этих данных приходится применять термины антиформные и синформные складки. Ф л е к с у р а представляет собой ступенеобразный изгиб слоев, состоящий из двух относительно длинных па-

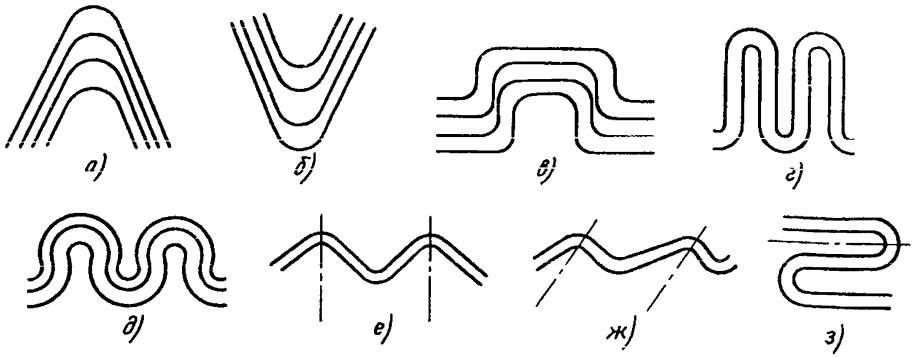

Рис. 1. Морфологические типы складок:
а – антиклиналь; *б* – синклиналь; *в* – сундучная (коробчатая); *г* – изоклинальная; *д* – веерообразная; *е* – прямая; *ж* – наклонная; *з* – лежачая

раллельных и часто пологозалегающих крыльев, сомкнутых коротким, обычно крутопадающим соединительным крылом. Шириной флексуры называют ширину зоны пликативной деформации, измеренной в вертикальной проекции на горизонтальную плоскость. В генетическом отношении флексура близка к сбросу или взбросу и отличается от них отсутствием нарушения сплошности слоев. Часто встречаются переходные формы – разорванные флексуры, сочетающие флексурную складку с разрывным нарушением. В соединительном крыле флексуры слои часто бывают растянуты, поэтому мощность их уменьшена, и породы обычно характеризуются повышенной трещиноватостью (рис. 2).

Таблица 1

Основные морфологические типы складок

Морфологический фактор	Типы складок	Морфологический фактор	Типы складок
Основная геометрическая форма	Антиклиналь Синклиналь Флексура	Наклон осевой поверхности складки	Прямая Наклонная Опрокинутая Лежачая Перевернутая
Отношение длины к ширине складки	Линейная (> 10) Брахискладка (10–3) Купол (< 3)	Мощность слоев в различных элементах складки	Параллельные (концентрические) Подобные Дисгармоничные
Форма замка и крыльев на поперечном сечении складки	Нормальная острая Нормальная округлая Изоклинальная Веерообразная Коробчатая Гребневидная	Залегание	Локальные (приповерхностные, глубинные, внутриформационные, приразломные, приконтактовые)

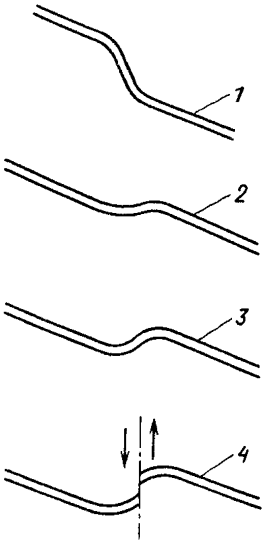

Рис. 2. Типы флексур: *1* – попутная; *2* – встречная; *3* – структурная; *4* – разорванная

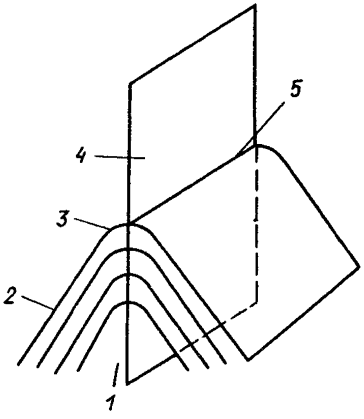

Рис. 3. Структурные элементы складки: *1* – ядро; *2* – крыло; *3* – замок; *4* – осевая плоскость; *5* – шарнир

Основными элементами складок являются их крылья, замки, оси, шарниры и осевые плоскости (рис. 3). Обращает на себя внимание неодинаковое понимание термина "ось складки". В практике изысканий и в геологической литературе можно встретить пять различных толкований этого термина:

1) пересечение осевой плоскости складки с горизонтальной плоскостью [2];

2) пересечение осевой плоскости складки с поверхностью земли (Геологический словарь, 1955 г.);

3) пересечение осевой плоскости складки с горизонтальной или вертикальной плоскостью или поверхностью земли (Геологический словарь, 1973 г.);

4) пересечение осевой плоскости складки с поверхностью пласта, или линия, соединяющая все точки перегиба слоев в замке [14], т. е. синоним шарнира складки;

5) проекция шарнира складки на поверхность земли [9].

С практической точки зрения удобнее рассматривать о с ь с к л а д к и как линию пересечения осевой плоскости складки с картируемой поверхностью, или плоскостью геологического разреза. Это наиболее близко к определению, данному в Геологическом словаре 1973 г.

Термин "шарнир складки" тоже трактуется по-разному: линия пересечения осевой плоскости с поверхностью слоя; линия, где пере-

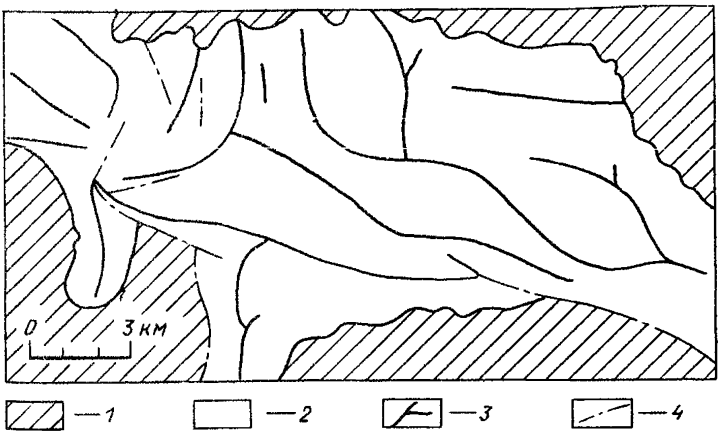

Рис. 4. Сложное размещение антиклинальных складок (по В. В. Бронгулееву): *1* – турнейский ярус; *2* – фаменьский ярус; *3* – оси антиклинальных складок; *4* – разрывные нарушения

секаются мысленно продолженные плоскости крыльев [14]. Рекомендуется употреблять первое определение как наиболее распространенное. Понятие "ось складки" нельзя заменять понятием "шарнир" и совершенно неправильны выражения типа "ось складки погружается". Плоскость, проходящая через шарниры последовательных слоев, называется осевой. Интересно отметить, что она может отсутствовать в идеальной концентрической складке, присутствовать в двойном количестве в сундучной складке или разрываться со смещением в случае углового несогласия.

Складки редко встречаются в виде изолированных одиночных форм и обычно образуют различные их сочетания. Обобщение данных о взаимном размещении складок показывает, что довольно часто в массивах наблюдается близпараллельная ориентировка осей складок. Такие субпараллельные линейные складки прослеживаются в районах гидроузлов Кассеб, Докан (Ирак) и др. В основании Асуанской плотины (Египет) наблюдается близпараллельное залегание многочисленных

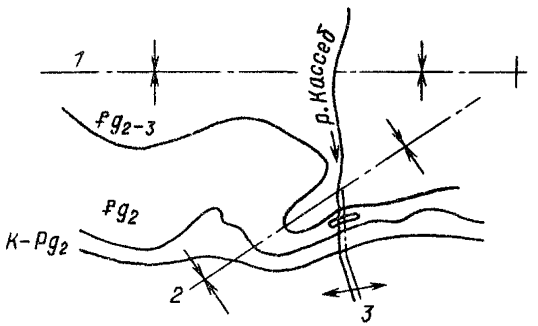

Рис. 5. Различная ориентировка синклинальных складок (азимуты простирания осей) разного порядка в районе арочной плотины Кассеб:
1 – первого порядка – 40°;
2 – второго порядка – 60°;
3 – третьего порядка – 310°

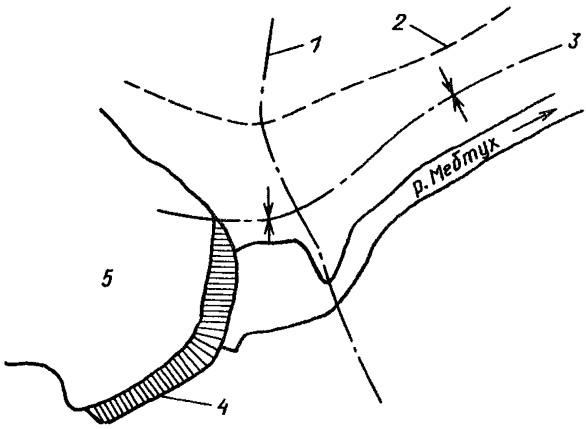

Рис. 6. Схема участка плотины Шерфас с перпендикулярным расположением осей складок (по Н. Н. Маслову):
1 – ось антиклинали; *2* – разрывное нарушение; *3* – ось синклинали; *4* – плотина; *5* – водохранилище

флексур второго порядка. Встречаются случаи и более сложного залегания складок (рис. 4). На участке арочной плотины Кассеб складки трех порядков ориентированы по-разному (рис. 5). Надо также учитывать возможность наложения разноориентированных форм различных этапов складкообразования. Причем такое наложение разновременных складок можно наблюдать не только в древних метаморфических комплексах, но и в более молодых альпийских складчатых областях. Например, в основании плотины Шерфас (Алжир) выявлено пересечение взаимно перпендикулярных складок (рис. 6).

2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

Складчатая структура обычно определяет геологическое строение слоистых толщ и в сочетании с другими структурными факторами влияет на инженерно-геологические условия строительства гидротехнических сооружений. Например, складки могут определять залегание таких структурных форм, как напластование, тектонические нарушения, системы мелкой трещиноватости, сланцеватость и инъективные тела.

Из 565 проанализированных случаев существенного влияния различных структурных факторов на инженерно-геологические свойства скальных оснований гидротехнических сооружений 5% приходится на случаи влияния складок. Причем в 21% из-за несвоевременного учета складчатой структуры во время строительства потребовался пересмотр первоначальных проектных решений. В инженерно-геологической литературе отмечается, что наибольшее влияние складки оказы-

вают на прочность оснований и их анизотропию (30% случаев) на гидрогеологические условия (30%) и деформационные свойства массива (20%). Кроме того, складки влияют на устойчивость природных склонов и строительных откосов, на эрозионную прочность массива, условия проходки и устойчивость сводов подземных выработок. Следует отметить, что приведенное соотношение является весьма приближенным и дает лишь общее представление об инженерно-геологическом значении складок.

Складчатые структуры оказывают также влияние на напряженное состояние массива и на экзогенные процессы. Все это делает складчатые структуры важным инженерно-тектоническим фактором, который необходимо учитывать при выборе створа, а также типа и размеров сооружений, определении устойчивости природных склонов, откосов котлованов и подземных выработок.

Влияние складок на прочностные и механические свойства массива, примеры которого приведены в табл. 2, проявляется в приуроченности ослабленных трещиноватых зон к сводам антиклиналей или вообще к резким изгибам компетентных слоев и к отдельным локальным складкам. Складчатые структуры определяют залегание прочных или слабых пачек и слоев горных пород и обычно увеличивают неоднородность оснований. При этом степень изменчивости состава осадочных пород обычно больше поперек, чем вдоль простирания складчатости. Конседиментационные складки (образовавшиеся одновременно с отложением осадков) могут влиять на фациальный состав пород, существенно изменяя их механические свойства (плотина Табка в Сирии). Складки также контролируют ориентировку систем секущих трещин, которая, в свою очередь, влияет на устойчивость откосов (гидроузлы Норрис, США; Бени-Бадель, Алжир; Остин, США; Понтезей, Италия; Ириль Эмда, Алжир) устойчивость бетонных сооружений на сдвиг, прочность примыканий арочных плотин (Хайвосси, США; Салиме, Испания) и устойчивость подземных выработок.

Примером влияния складчатой структуры на свойства материала пород являются песчаники в тувинском прогибе. По данным Г. А. Голодковской (1968 г.), повышенная прочность юрских песчаников по сравнению с девонскими, имеющими аналогичный состав, объясняется влиянием мезозойского складкообразования. С увеличением интенсивности складчатости связано в основном и общее повышение прочности пород нижних структурных этажей по сравнению с верхними.

Полевые геофизические исследования напряженного состояния барремских известняков в кадарской коробчатой антиклинали в районе Ирганайской ГЭС (СССР) показали, что складчатая структура влияет на анизотропию упругих свойств материала пород. В образцах породы, отобранных в своде складки, проявляется сжатие, а на крыльях преобладает растяжение, что может рассматриваться как результат остаточных тектонических напряжений.

Таблица 2

Примеры влияния складок на механические свойства массива

Гидроузел, страна	Геотектоническое положение	Породы	Структура	Влияние на инженерно-геологические условия	Проектные решения
Кариба, Зимбабве [5]	Докембрийский складчатый комплекс	Гнейсы, кварциты	В правобережном примыкании арки небольшая разорванная флексура	Флексура характеризуется интенсивным выветриванием и низким модулем деформации	Укрепление примыкания бетонными контрфорсами
Гриб, Алжир [11]	Альпийский складчатый комплекс	Песчаники, мергели	Антиклинальная складка не была обнаружена при изысканиях, поэтому 2/3 плотины размещаются не на песчаниках, а на мергелях; антиклиналь определила также неблагоприятную ориентировку слоистости	Неблагоприятная ориентировка слоев (наклон в нижний бьеф под углом 12°) снижает устойчивость плотины на сдвиг, явилась причиной образования оползня объемом в несколько сотен тысяч кубических метров на откосе водосбросного канала	Устройство заанкеренной плиты в основании плотины, а также дренажа, свай и подпорных сооружений на канале
Кастийон, Франция [5]	То же	Известняки	В правобережном примыкании залегает шарнирная зона антиклинали, характеризующаяся повышенной трещиноватостью и большим раскрытием трещин	Интенсивная трещиноватость снижает устойчивость примыкания арочной плотины	Укрепительная цементация, устройство бетонных контрфорсов с предварительно напряженными анкерами

Продолжение табл. 2

Гидроузел, страна	Геотектоническое положение	Породы	Структура	Влияние на инженерно-геологические условия	Проектные решения
Женисся, Франция [5]	–	Известняки	В сводовой части антиклинали породы имеют большую трещиноватость и раздробленность	Снижение прочностных и деформационных свойств массива, а также его водопроницаемости	Выбор створа, удаленного от шарнира складки
Фергуг, Алжир [11]	Альпийский складчатый комплекс	Песчаники	Антиклинальный выступ со стороны верхнего бьефа	Складка определяет положение маломощной (30 м) пачки прочных песчаников, выбранных в качестве основания плотины. При изысканиях неправильно определили форму складки и положение этой пачки	В процессе строительства пришлось сдвинуть плотину и изогнуть ее ось в соответствии с уточненной конфигурацией крыла складки
Табка, Сирия	Платформенный чехол	Мел, доломиты	Небольшая очень пологая антиклиналь конседиментационного происхождения	На участке антиклинали бентонитовые прослои фациально замещаются мергелем, повышая прочность массива на сдвиг	Размещение ГЭС, совмещенной с водосбросом на участке складки

Таблица 3

Примеры влияния складок на гидрогеологические условия массива

Гидроузел, страна	Геотектоническое положение	Породы	Структура	Влияние на гидрогеологические условия	Проектные решения
Фум-Эль-Герза, Алжир [11]	Альпийский складчатый пояс	Известняки, мергели	Синклиналь, к оси которой приурочено ущелье	Складка определяет залегание водоупорных слоев мергеля, позволяющее обойтись небольшой цементационной завесой	Складчатая структура способствовала выбору данного створа
Женисся, Франция	То же	Известняки	Синклиналь на участке водохранилища	Складка определяет залегание водонепроницаемых слоев, обусловливающих водоудерживающую способность водохранилища, несмотря на наличие закарстованных известняков	Учет складки при выборе участка створа
Монтежак, Испания	Альпийский складчатый пояс	Известняки	Антиклиналь	Приуроченность подземной реки к гребню антиклинали. При попытке наполнить водохранилище наблюдалась фильтрация (4 м³/с) в подземную реку	Поверхностная заделка трещин в ложе водохранилища не приостановила утечек
Курейский, СССР	Платформенный чехол	Диабазы	Мульдообразная складка на участке основных сооружений гидроузла	Совместное влияние складки и долеритового силла обусловливает возникновение напорного (до 65 м) водоносного горизонта под долеритами	–
Вади-Мефруш, Алжир [11]	Альпийский складчатый комплекс	Доломиты, мергели, известняки	Синклиналь на участке водохранилища	Складка, контролируя положение водоупорного слоя, определила водоудерживающую способность водохранилища	Учет складки при определении НПУ и объема водохранилища
Кентакки, США	–	Известняки	Небольшая антиклиналь	К шарниру антиклинали приурочен крупный карстовый канал	Сооружение бетонной пробки и подземной арки
Чарвакский, СССР	Фанерозойский складчатый комплекс	”	Антиклиналь	В сводовой части складки наблюдаются трещиноватость и интенсивное развитие карста	–

Большое влияние региональных складчатых структур на естественно-напряженное состояние скального массива подтверждается результатами измерения напряженности пород в 11 железорудных месторождениях Урала. Эти исследования, проведенные на глубинах 100–700 м, показали, что на Урале существует горизонтальное субширотное (т. е. перпендикулярное простиранию геологических структур) сжатие, превышающее в 1,5–5 раз давление вышележащих пород и являющееся, по-видимому, проявлением тектонических сил.

Влияние складок на гидрогеологические условия (табл. 3) определяются прежде всего характером залегания водоупорных или водопроницаемых слоев и пачек. В одних случаях синклинальные складки определяют водоудерживающую способность водохранилища, влияют на выбор его НПУ (Фум-Эль-Герза, Вади-Мефруш, Жениссия, Кассеб). В других случаях благоприятное залегание водоупорного слоя преграждает пути фильтрации и способствует выбору створа плотины. На участке проектируемой Мосульской плотины на р. Тигр (Ирак) антиклинальная складка определяет залегание слоев гипса, опасность растворения которых оказала влияние на выбор местоположения этой плотины. В синклиналях обычно формируются напорные воды (Курейский гидроузел) и артезианские бассейны.

Наличие складок иногда способствует разгрузке напорных вод, а также формированию карста (рис. 7). Так, в бассейне р. Черек (СССР) артезианские воды заключены в карбонатной толще, прикрытой водонепроницаемыми глинистыми породами нижнемелового возраста. Один из очагов разгрузки этих вод приурочен к выходу на поверхность карбонатных пород в ядре брахиантиклинального поднятия. На этом участке выявлены глубокие субвертикальные карстовые каналы с круп-

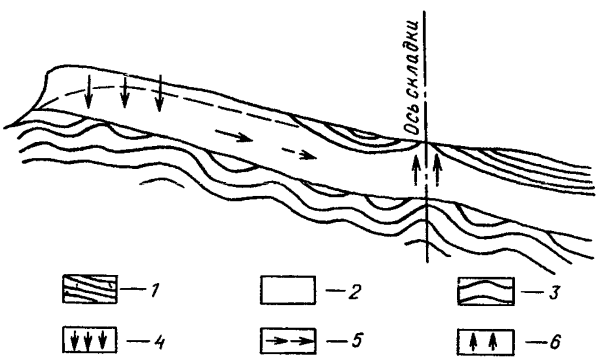

Рис. 7. Схема формирования карста в бассейне р. Черек Балкарский (по И. С. Кривицкому, 1981 г.):
1 – глина; *2* – известняк; *3* – глинистый сланец; *4* – зона инфильтрации; *5* – зона транзита; *6* – зона разгрузки, приуроченная к антиклинали

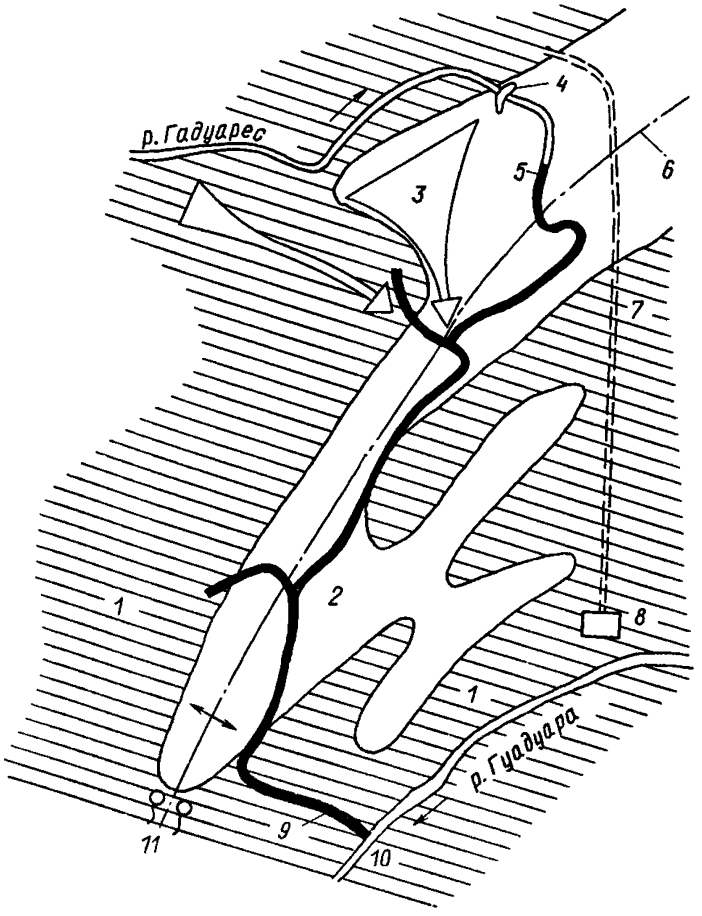

Рис. 8. Схема фильтрации воды по карстовому каналу, проходящему по оси антиклинали на участке арочной плотины Монтежак (по Р. Терону, 1973 г.):
1 – мергели; *2* – известняки; *3* – направление фильтрации; *4* – арочная плотина; *5* – вход в подземный канал; *6* – ось антиклинали; *7* – напорный туннель; *8* – здание ГЭС; *9* – основной карстовый канал; *10* – выход подземной реки; *11* – источники

ными полостями, восходящими источниками и провальным озером.

Шарнирные зоны антиклиналей из-за повышенной трещиноватости могут иметь значительную проницаемость. В некоторых карбонатных массивах наблюдается приуроченность к гребням крупных карстовых каналов. В нижнем бьефе плотины Монтежак (Испания) р. Гадуарес уходит в подземный карстовый канал длиной около 3,8 км, впадающий в р. Гуадуара на отметке, лежащей на 150 м ниже начала подземной реки. Этот карстовый канал проходит в основном вдоль осевой части антиклинали, сложенной верхнеюрскими известняками (рис. 8). При попытке заполнить водохранилище после окончания строительства арочной плотины высотой 74 м началась фильтрация воды из водохра-

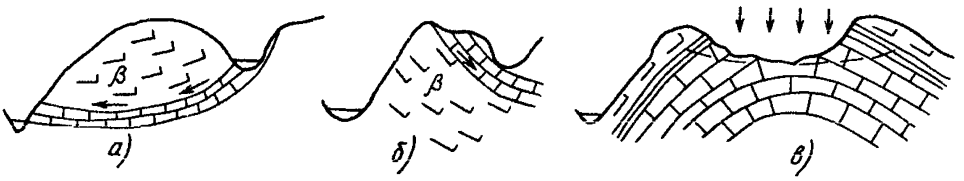

Рис. 9. Схема влияния складчатой структуры массива на движение подземных вод (по З. Рукингу, 1981 г.):
а – синклиналь, благоприятствующая фильтрации подземных вод в соседнюю долину; *б* – синклиналь, препятствующая фильтрации подземных вод в соседнюю долину; *в* – антиклиналь, способствующая дренированию подземных вод долиной, приуроченной к гребню складки и препятствующая фильтрации в расположенную ниже соседнюю долину

нилища в расположенную поблизости подземную реку в размере 4 м^3/с. Несмотря на дополнительную поверхностную заделку трещин в ложе водохранилища, утечки воды не сократились. Приуроченность карстопроявлений к гребням антиклинальных складок отмечается также на гидроузлах Кентакки, Докан и др. На участке проектируемого гидроузла Рава р. Евфрат пересекает валообразную антиклиналь, в ядре которой обнажаются прочные известняки свиты ана, которые образуют местный подъем дна реки, но не сказываются на уровне подземных вод из-за трещиноватости и закарстованности пород. Эти условия привели к образованию на участке антиклинали локальной зоны обратных уклонов подземных вод.

Характерные примеры влияния складчатости на движение подземных вод в закарстованных верхнепалеозойских известняках приводятся З. Рукингом. На рис. 9, *а* синклиналь обусловливает фильтрацию подземных вод в соседнюю долину по этим известнякам с формированием карстовых каналов. На рис. 9, *б*, наоборот, синклиналь препятствует фильтрации подземных вод в соседнюю долину и способствует их дренажу в вышерасположенную долину. На рис. 9, *в* антиклинальная складка препятствует фильтрации в соседнюю нижерасположенную долину и обусловливает дренаж подземных вод в долину, приуроченную к гребню складки. Во всех этих случаях складки определяют направление фильтрации и разгрузку подземных вод.

Складчатость, определяющая ориентировку слоев, оказывает влияние на интенсивность выветривания. При этом на участках с преобладанием крутопадающих слоев можно ожидать при прочих равных условиях более глубокого выветривания по сравнению с участками с пологим залеганием пород.

Большое косвенное инженерно-геологическое значение складок связано с их воздействием на рельеф, который, в свою очередь, существенно влияет на устойчивость склонов и, следовательно, на выбор створа плотин. Прямое влияние складок на рельеф проявляется в формировании в пределах синклиналей расширений речных долин в виде

межгорных котловин, удобных для устройства водохранилищ. Так, водохранилища Кассеб, Жениссия, Вади-Мефруш, Фум-Эль-Герза и многие другие приурочены к синклиналям, образующим понижения в рельефе и расширения долин. На участке проектируемой Акстафинской плотины (СССР) местная брахиантиклиналь образует сужение долины, выбранное для створа плотины [7]. Долины образуются иногда и по осевой части антиклинали в результате усиленной эрозии по более трещиноватым и тектонически нарушенным участкам ее гребня и при наличии слабых пород в ядре складки (плотины Ортотокойская, СССР; Гриб, Алжир; Манери, Игари, Тилайя, Индия).

Створ плотины часто приурочивается к участку, где горная река прорезает узкое ущелье поперек хребта-антиклинали (плотины Докан, Мосульская, Бекме, Ирак; Сарсанг, СССР). При этом ущелье может образоваться на участке, ослабленном разрывными нарушениями или локальными складками. На участке плотины Кассеб ущелье прорезает крыло складки второго порядка в том месте, где оно осложнено антиклинальным изгибом третьего порядка (см. рис. 5). Проектируемая плотина Саманала Вева (Шри-Ланка) приурочена к участку долины, сформированному по слабовыраженной флексуре второго порядка. Разрывные нарушения в обоих этих случаях под руслом отсутствуют.

Знание складчатых структур необходимо для выявления историко-генетических особенностей скальных массивов. Складкообразование составляет важный этап формирования массива, и его изучение необходимо для понимания геологической истории района, для установления последовательности образования структур. Форма складок и наклон крыльев являются как бы индикаторами общей интенсивности деформации массива. Изучение складок необходимо также для понимания механизма тектонических деформаций, механизма "течения" горных пород, кинетических и динамических условий формирования скальных массивов. Знание складчатых структур позволяет уточнить пространственную ориентировку и некоторые закономерности формирования разрывных структур.

3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СКЛАДОК

Механизм формирования складок сложный и длительный. На формирование складчатости влияют многие факторы: тектонические, гипергенные, литологические и магматические, из которых тектонические являются основными. В соответствии с геотектоническими условиями выделяют два основных генетических типа складчатости: геосинклинальный при формировании которого большое значение имели горизонтальные тектонические (орогенические) движения, и платформенный с преобладанием вертикальных тектонических движений. Наибольшие трудности вызывает проблема определения происхождения геосинклинальной линейной складчатости. В сложно дислоцированных массивах

складчатые структуры могут, по-видимому, образоваться не только путем одноэтапной сложной гетерогенной деформации, но и путем повторных разноориентированных дислокаций. Так, установлено, что в районе гидроузла Фум-Эль-Герза складчатость формировалась в результате двух фаз орогенических движений, разнородных по амплитуде и направленности: послемеловой северо-восточного простирания и постмиоценовой – широтной. Это подтверждает возможность изменения направления тектонических сил в процессе геологической истории района [11]. Вообще число орогенических фаз может достигать четырехпяти [2].

Существенное влияние на формирование складок могут оказать структура напластования осадочных толщ, литологический состав, свойства и мощность отложений. Известно, например, что глинистые породы обладают более длительной и более выраженной пластичностью по сравнению с другими породами. Вообще пластичность и жесткость пород являются относительными понятиями. Большую роль при их определении играют контрастность состава слоев и свойства преобладающих пород. Так, при формировании складок в известняках с подчиненными глинистыми прослоями глины перераспределяются и приспосабливаются к изгибам слоев известняка, а в глинистых толщах с подчиненными слоями известняка последние разламываются и приспосабливаются к складчатым дислокациям глин. По данным Г. Д. Ажгирея [1], наблюдается зависимость размеров складок от мощности и степени пластичности осадочных пород.

По временным соотношениям процессов осадконакопления и складкообразования выделяются два основных вида складок: постседиментационные и конседиментационные (рис. 10). Конседиментационные складки, образующиеся одновременно с осадконакоплением, приводят к уменьшению мощности и изменению фациального состава отложений в своде антиклинали (например, на участке проектируемого гидроузла Рава на р. Евфрат).

В некоторых случаях при складкообразовании существенное значение приобретают экзогенные факторы, а именно: гравитационные силы и напряжения, связанные с экзогенными преобразованиями пород. Участие фактора силы тяжести в формировании складок не вызывает сомнения, однако отсутствует единая точка зрения на критерии его выделения и на его относительное значение. Бесспорно, с этим фактором связаны подводные оползни и встречающиеся часто на склонах приповерхностные изгибы слоев. Сила тяжести, по-видимому, определяет максимально возможные размеры складок (продольного изгиба), поскольку необходимый рост напряжений при увеличении массы складки не может превысить предела прочности горных пород [2].

На участках некоторых гидроузлов (Хадита и Рава в Ираке, Ереванский в СССР) установлены проявления "гипсовой тектоники", связанные с увеличением объема пород на 67% при гидратации ангидрида.

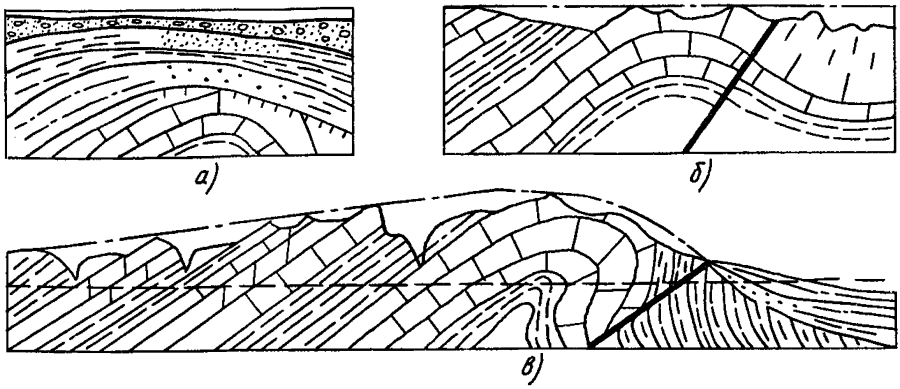

Рис. 10. Фазы развития антиклинальной складки (по Н. П. Костенко): *а* – конседиментационная; *б* – конденудационная; *в* – конэрозионная

Для складок этого происхождения характерны приуроченность к гипсоносным пачкам и затухание на глубине обычно до 100 м. Не исключена возможность образования дислокаций и за счет разбухания некоторых глин. В районах, подвергшихся оледенению, можно иногда встретить проявление гляциодислокаций (Каневская ГАЭС, СССР) со сложным сочетанием складчатых и инъективных форм.

На формирование складок могут также влиять магматические и метаморфические процессы и, в частности, развитие глубинных гранитоидных и гнейсовых диапиров. Относительно небольшие складки часто встречаются по контактам интрузивных тел как результат внедрения в условиях определенной пластичности вмещающих пород. Например, на участке Асуанского гидроузла в зоне экзоконтакта порфировидных кварцевых монцонитов мощностью 2–5 м наблюдались мелкие складки, проявившиеся наиболее четко у самого контакта и постепенно убывающие с увеличением расстояния от него. Оси этих складок обычно параллельны простиранию слоистости кристаллического массива. В ультраметаморфических комплексах складки могут образовываться при селективном плавлении субстрата, и в этом случае они будут, по-видимому, тяготеть к участкам массива с максимальным содержанием жильного материала мигматитов.

Существует два основных механизма складкообразования – пластическое течение и дифференциальное скольжение (скалывание) по системе близпараллельных трещин, причем различие между ними имеет масштабный характер. По степени влияния напластования на формирование складки или по ориентировке тектонических сил относительно напластования выделяют складки продольного и поперечного изгиба. Надо отметить, что такая типизация очень практична для моделирования из эквивалентных материалов, но не всегда удобна для полевых наблюдений. Таким образом, можно выделить четыре типа складок: продоль-

ного изгиба, образовавшиеся в результате течения; продольного изгиба в результате скалывания; поперечного изгиба в результате течения и поперечного изгиба в результате скалывания. Интересные генетические классификации складок разработаны В. В. Белоусовым, В. Е. Хаиным, В. В. Бронгулеевым [2, 16, 3].

В заключение следует еще раз отметить разнообразие геологических условий, длительность и многофакторность процесса складкообразования, что не позволяет допустить единый универсальный механизм их образования. Очевидно, что вопрос о происхождении складок нельзя решать в отрыве от основных проблем геотектоники: формирования геосинклиналей, платформ и т. д.

4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КЛИВАЖЕ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ

Для структурной геологии характерно неоднозначное понимание терминов "кливаж" и "сланцеватость". Так, некоторые исследователи [1] вкладывают в понятие "кливаж" генетическое содержание и связывают его исключительно со складкообразованием, другие определяют его только по морфологическим признакам. В одних определениях к кливажу относят только секущие слоистость формы, а в других – как секущие, так и согласные формы. Некоторые исследователи вообще отказываются от этого термина, поскольку он не имеет определенного установившегося значения, и предлагают его заменить терминами "трещиноватость", "отдельность" или "сланцеватость". Неудобство термина "кливаж" заключается еще и в том, что он заимствован из английского языка, на котором им обозначают также и спайность кристаллов. Поэтому Ж. Гогель [4] предложил заменить его общим понятием "листоватость". Однако и этот термин неудачен, так как включает помимо кливажа (в нашем понимании) также непластование и полосчатость в гнейсах. При инженерно-геологическом изучении структуры массива рекомендуется использовать термин "кливаж" для обозначения способности пород раскалываться по субпараллельным сближенным трещинам и поверхностям ослабления на тонкие пластины толщиной до 2 см.

Сланцеватость рассматривается некоторыми геологами как синоним кливажа (П. Н. Кропоткин), а также как все ориентированные структуры метаморфического происхождения, которые придают породам макроскопически видимую тонкую делимость (Ф. Тернер). Однако большинство исследователей связывает сланцеватость с ориентировкой пластинчатых минералов. В. В. Белоусов [2] называет сланцеватостью проявление плоскопараллельной текстуры в тех случаях, когда перекристаллизация приводит к образованию кристаллов размером более 1 мм, а кливаж – до 1 мм.

При инженерно-геологическом изучении скального массива сланцеватость целесообразно рассматривать как разновидность кливажа, при котором способность раскалываться обусловлена параллельным

Таблица 4

Параметры влияния кливажа на анизатропность деформационных свойств скальных пород

Гидроузел	Геотектоническое положение	Породы	Параметр			Виды опытов	Литературный источник
			Наименование	Значение, МПа			
				параллельно кливажу	перпендикулярно кливажу		
Контра, Швейцария	Альпийская складчатая область	Гнейсы	Модуль деформации	17 000	7 000	Полевые	[6]
Верзаска, Швейцария	То же	Гнейсы	То же	25 000	10 500	"	Линк, 1968 г.
Клервен, Англия	" "	Аргиллиты	Прочность на сжатие	21,5	43	Лабораторные	[6]
Маврово, Югославия	" "	Глинистые сланцы	Модуль деформации	11 500	2 300	Полевые	[15]
Плотина в Чехословакии	Альпийская складчатая область	Сланцы	Модуль деформации	14 600 19 000 77 000	6 500 7 200 405	Полевые Лабораторные	[15]
Рогунский, СССР	Фанерозойский складчатый комплекс	Алевролиты	Модуль упругости	47 700 49 300	39 800 44 300	То же	"
Курпсайский, СССР	То же	Аргиллиты	Прочность на сжатие	41,8	58,3	" "	"
Байпазинский, СССР	" "	"	Прочность на сжатие Модуль деформации Модуль упругости	16,7 30 000 36 000	44 24 400 32 000	" " " " " "	"

расположением пластинчатых или листоватых минералов. При таком понимании терминов "кливаж" и "сланцеватость" можно применять общий термин "кливаж" для обозначения этого структурного фактора, характеризующегося специфической анизотропией и способностью пород раскалываться на тонкие плитки.

Кливаж надо рассматривать как самостоятельный инженерно-структурный фактор, поскольку он представляет собой важнейшую структуру метаморфиечских комплексов, оказывает существенное влияние на прочность, деформационные свойства и анизотропность массива, характеризуется специфической морфологией и сложным генезисом, связанным в основном с пластично-вязкими тектоническими деформациями. Примеры влияния кливажа на анизотропность деформационных свойств скальных пород приведены в табл. 4.

Кливаж является структурой по отношению к массиву и текстурой относительно образца.

Обращает на себя внимание разнообразие проявлений кливажа как по размерам, так и по ориентировке. По размерам выделяются локальные зоны кливажа (например, приразрывные) и региональные, которые могут протягиваться на сотни километров (например, северо-восточная зона смятия в Рудном Алтае). На Урале были выявлены кливаж-антиклинали, достигающие размеров 500 X 25 км, с падением плоскостей кливажа на крыльях под углами 30–50°.

Ориентировка кливажа часто связана с залеганием складок. При этом наблюдаются параллельность кливажа осевой плоскости складки или веерообразный кливаж, расходящийся над сводом антиклинали. Кливаж, сходящийся над сводом антиклинали, называется обратным веерообразным. Иногда наблюдается наложенный кливаж, не связанный с осевой поверхностью. По отношению к напластованию кливаж может быть послойным или секущим, причем пересечение слоистости плоскостью секущего кливажа образует линейность (полосчатость), указывающую на ориентировку шарнира складки. Н. Дункан (1965 г.) выделяет два типа секущего кливажа: по-разному ориентированный в различных слоях (в зависимости от их состава) и пересекающий все слои без изменения своей ориентировки.

Иногда можно встретить одновременное присутствие кливажа нескольких направлений.

Кливаж оказывает многообразное влияние на инженерно-геологические свойства скальных массивов. Он составляет 7% всех проанализированных случаев отрицательного влияния структурных факторов на свойства оснований. Из них в 30% случаев несвоевременная оценка кливажа приводила к пересмотру во время строительства первоначальных проектных решений. Наибольшее влияние кливаж оказывает на прочность массива и устойчивость природных склонов и строительных откосов. Меньше кливаж влияет на деформационные свойства, эрозионную прочность пород и на условия строительства подземных сооружений.

Кливаж оказывает значительное воздействие на анизотропию прочностных и деформационных свойств пород (табл. 4), причем характерная особенность кливажа заключается в том, что он влияет на свойства как массива, так и пород в образце. При этом в направлении вдоль кливажа отмечаются максимальные значения модуля деформации и скорости упругих волн, но минимальные значения прочности на сдвиг и на сжатие. Например, пораженные кливажом долериты, залегающие в основании бетонных сооружений Богучанской ГЭС, отличаются пониженными значениями скорости упругих волн 3500 м/с и динамического модуля деформации 30 000 МПа по сравнению с 5000 м/с и 60 000 МПа в сохранных породах.

Кливаж также косвенно воздействует на инженерно-геологические условия путем влияния на экзогенные процессы. В приповерхностных частях массива кливаж ускоряет процессы выветривания и при разгрузке обусловливает раскрытие кливажных трещин и расщепление породы на тонкие плитки, ухудшая ее механические свойства. Степень выветривания при этом зависит от угла падения кливажа. Крутое залегание кливажа облегчает просачивание поверхностных вод по его трещинам и способствует образованию более глубокой зоны выветривания, чем при горизонтальном залегании.

Проявление кливажа при разгрузке наблюдается не только в метаморфических породах. Так, в меловых породах основания гидроузла Табка местами обнаружили скрытый послойный кливаж. Керн, извлеченный из таких участков, быстро распадается по этим ослабленным поверхностям. На участке плотины Фолсом (США) при выемке строительного котлована в кварцевых диоритах небольшие зоны рассланцевания мощностью около 10 см вначале были ошибочно приняты за тектонические нарушения, а затем было установлено, что это зоны рассланцевания, быстро выклинивающиеся на глубине. В траповых интрузиях иногда встречается скрытая тонкая сланцеватость, невидимая в обычных условиях, но проявляющаяся под влиянием выветривания или взрывов. При воздействии этих факторов долериты распадаются на тонкие плитки, снижая прочность массива и вызывая необходимость ограничения взрывных работ при вскрытии строительных котлованов. На участке Богучанской ГЭС такие рассланцованные зоны приурочены к коленообразному изгибу силла.

Некоторые примеры влияния кливажа на устойчивость гидротехнических сооружений на сдвиг приведены в табл. 5. Эти примеры показывают, что наиболее неблагоприятным является залегание плоскости кливажа параллельно контакту плотины со скалой. Так, одна из причин аварии плотины Сент-Френсис (США), приведшей к гибели 426 человек, заключалась в неустойчивости гравитационной плотины, построенной в пределах одного берега на рассланцованных породах. Роль кливажа в этой аварии подтверждается тем, что та часть плотины, где контакт бетона со скалой был параллелен кливажу, разрушилась, а та часть,

Таблица 5

Примеры влияния кливажа на устойчивость гидротехнических сооружений

Гидроузел, страна	Геотектоническое положение	Породы	Структура	Влияние на инженерно-геологические условия	Проектные решения
Раппбоде, ГДР [6]	Складчатый комплекс	Глинистые сланцы	Сланцеватость, ориентированная параллельно склону	Сланцеватость обусловила неустойчивость склона при его подсечении строительной выемкой	Осторожное проведение строительных работ
Кончас, Канада [6]	То же	Песчаники, сланцы	Сланцеватость в слое мощностью около 20 м	Сланцеватость способствовала оползанию откоса котлована плотины через месяц после его проходки	Изменение конструкции гравитационной плотины и способа строительных работ
Эмоссон, Швейцария	Альпийский складчатый комплекс	Роговики	Кливаж	На правом берегу усилие от арочной плотины параллельно кливажу, ослабляющему устойчивость ее примыкания	Увеличение выемки в примыкании и утолщение пяты арки
Семеура, Япония	Складчатый комплекс	Сланцы	Интенсивная сланцеватость	Снижение прочности основания плотины на сдвиг	Изменение конструкции профиля гравитационной плотины
Сент-Френсис, США	То же	"	Сланцеватость, параллельная склону	Сланцеватость – один из факторов уменьшения сопротивления пород сдвигу, вызвала разрушение гравитационной плотины	–
Эрраген, Алжир [11]	Альпийский складчатый комплекс	Сланцы	Неблагоприятно ориентированные сланцеватость и ослабленные поверхности напластования	Сланцеватость и поверхности напластования снижают устойчивость плотины на сдвиг	Устройство контрфорсов специальной конструкции с домкратами
Санта-Евлалия, США	Фанерозойский складчатый комплекс	Сланцы, кварциты	Неблагоприятно ориентированная сланцеватость (параллельно контакту бетона со скалой)	Сланцеватость ослабляет устойчивость арочной плотины на сдвиг в левобережном примыкании	Применение анкеров с предварительным натяжением
Тайгарт, США	Складчатый комплекс	Песчаники, сланцы	Сланцеватость	Сланцеватость – один из факторов неустойчивости плотины на сдвиг	–
Крушне, Чехословакия [6]	Складчатый комплекс	Биотитовые парагнейсы	Сланцеватость и напластование, ориентированные на левом берегу параллельно склону	При проходке котлована происходили оползни, особенно в период весеннего снеготаяния	Укрепление от косов котлована
Хамиз, Алжир [11]	Альпийский складчатый комплекс	Слюдистые сланцы, известняки	Сланцеватость	Сланцеватость, снизившая эрозионную прочность основания, обусловила интенсивный размыв пород в нижнем бьефе	Укрепление нижнего бьефа
Охайо Ривер № 26, США	Складчатый комплекс	Сланцы	Неблагоприятно ориентированные ослабленные	Сланцеватость вызвала в 1912 г. разрушение (сдвиг) плотины высотой 6 м	–
Алла Селла Зербино, Италия	Альпийский складчатый комплекс	Серпентинитовые сланцы	Сланцеватость	Сланцеватость, снижающая эрозионную прочность основания, способствовала разрушению бетонной гравитационной плотины высотой 12 м (1935 г.)	–
Кариба, Зимбабве	Докембрийский складчатый комплекс	Гнейсы	То же	Сланцеватость способствовала эрозии пород в основании временной верховой перемычки, приведшей к затоплению строительного котлована	–

где ее контакт со сланцами ориентирован под углом 45° к кливажу, уцелела. Иногда структурный дефект основания обусловлен сочетанием кливажа и тонких глинистых прослоев (плотина Форт Пек в США). Наиболее благоприятным для строительства плотин залеганием кливажа следует считать его крутое падение с простиранием параллельно оси плотины. Однако это условие не является гарантией устойчивости сооружения, если не учитывать другие факторы. Например, в примыкании арочной плотины Мальпассе (Франция) крутопадающая сланцеватость способствовала концентрации напряжений от арки и повышению водонепроницаемости в этой зоне, что привело к возрастанию гидростатического давления и в конечном счете к разрушению плотины. По мнению П. Лонда, в рассланцованных породах вообще часто проявляется поровое давление, и поскольку цементация здесь не всегда эффективна, то в этих породах необходима хорошая дренажная система.

Неблагоприятная ориентировка кливажа, дополненная воздействием выветривания и разгрузки, является важным фактором неутойчивости откосов. В подошве примыкания плотины Кончас обнажается в стенке котлована слой сланцев мощностью около 20 м. По проекту в этих породах вертикальный откос с асфальтовым покрытием должен был стоять в течение 2—3 мес. Однако фактически откос, ослабленный кливажом, начал оползать через месяц. В результате пришлось изменить как конструкцию плотины, так и способ производства работ. При разработке котлована здания ГЭС гидроузла Оахе (США) кливаж в сочетании с интенсивной разгрузкой (подъем дна котлована достиг 60 см) и влиянием тектонических нарушений и трещиноватости обусловил опасность оползания откосов. Для ограничения разгрузки и выветривания принимались следующие меры: быстрая анкеровка и пригрузка основания бетоном, временное закрепление (до укладки бетона) поверхности котлована битумным покрытием. Неустойчивость откосов из-за кливажа отмечалась в стенках котлована плотины Борт (Франция), что вынудило устроить специальные железобетонные подпорные конструкции.

Воздействие кливажа на устойчивость подземных выработок можно проиллюстрировать на примере туннеля Лларворси (США), пройденного в палеозойских сланцах, когда сланцеватость повлияла на фактическую форму туннеля и обусловила повышение объема выемки по сравнению с проектным. На участке ГАЭС Лейк Далио (США) залегают гнейсы с близвертикальной сланцеватостью. Пройденная в них подземная камера высотой 60 и длиной 195 м ориентирована вдоль кливажа. В связи с возможностью значительной разгрузки в стенах камеры и обрушения отдельных блоков потребовалось применить специальный метод строительства, заключавшийся в том, что оставляли целик и сооружали шесть временных балок на середине высоты камеры, которые удалили после укрепления ее стен. Крепление стен производилось с помощью предварительно напряженных тросовых анкеров длиной до 30 м, обыч-

ных анкеров длиной 3—5 м, торкрет-бетона и металлической сетки. При этом общая длина анкерных скважин составила около 52 км.

На ряде гидроузлов кливаж является одним из факторов ослабления эрозионной прочности скального массива. Например, на участке Новосибирской ГЭС при пропуске паводка 1959 г. были размыты глинистые и углистые сланцы в нижнем бьефе на глубину 10—12 м. На участке гидроузла Хамиз интенсивный размыв в нижнем бьефе был связан со сланцеватостью древних метаморфических пород и с их недостаточным креплением [11]. При строительстве арочной плотины Калдервуд (США) в паводок большой поток воды обрушился с плотины в недостроенный водобойный колодец, образовав в сланцах и песчаниках нижнего бьефа эрозионный котел размером 9 X 15 и глубиной 15 м, дно которого было расположено на 3,2 м ниже основания плотины. Снижение прочности пород было обусловлено кливажом и трещиноватостью. Плотина Бандикут-Бар (Алжир) построена на крутопадающих прочных кварцитах с прослоями рассланцованных филлитов мощностью до 6 м. В первый год эксплуатации гидроузла в нижнем бьефе непосредственно вблизи плотины размыло филлиты на глубину 6 м. Эту щель заделали, но на следующий год ее снова размыло, и создалась опасность сдвига основания плотины. Это заставило вынуть рассланцованные и разуплотненные филлиты и заполнить щель монолитным бетоном, заанкеренным в кварциты.

Характерный для многих складок кливаж отличается сложным, иногда многоэтапным генезисом, связанным главным образом с тектонической деформацией массива и с метаморфическими процессами при сильном воздействии литологического фактора. В общем можно выделить четыре основных генетических типа кливажа: послойный, осевой поверхности, приразрывный и кливаж в основании покровных образований, залегающих над выступом кристаллического фундамента.

По механизму формирования, а также по степени участия материала породы в деформации и в перекристаллизации кливаж принято разделять на два основных типа: кливаж течения и кливаж разлома. Оба типа кливажа тесно взаимосвязаны. Они различаются по условиям образования: кливаж течения обусловлен главным образом метаморфизмом, в частности перекристаллизацией пород, а кливаж разлома — тектоническими деформациями. Деформацию пород можно определить путем измерения содержащихся в них деформированных раковинок и оолитов, однако надо учитывать, что на их форме отражается не только тектоническая деформация, но и трансформация осадков в процессе диагенеза. По данным Невина, кливаж разлома образуется вместо кливажа течения, если есть возможность небольшого увеличения объема массива. Кливаж разлома может наложиться на кливаж течения с соотвстствующим исправлением плоскостей последнего. Кливаж разлома в отличие от трещиноватости развивается, по-видимому, в целом в более глубоких частях земной коры, где породы теряют свою хрупкость. Предполага-

ется, что кливаж течения ориентируется перпендикулярно тектоническим сжимающим напряжениям, а кливаж разлома — по направлениям максимальных касательных напряжений, т. е. под углом около 45° к направлению действия тектонических сил. Некоторые исследователи (Де Ситтер и др.) объясняют кливаж разлома результатом сжатия, действовавшего перпендикулярно плоскостям кливажа.

Кливаж обычно тесно связан со складчатостью, однако выявление генетической связи кливажа со складками иногда сопряжено с трудностями, как, например, в том случае, когда он связан с крупными складками, а не с мелкими, или при наложении нескольких разноориентированных генераций кливажа, обусловленных последовательными этапами складкообразования. Формирование кливажа может быть также связано с тектоническими разрывными нарушениями и напластованием.

Влияние напластования проявляется в формировании послойного кливажа и в зависимости его интенсивности от мощности слоя. Густота кливажа зависит также от литологического состава и размера зерен пород. Большое влияние на формирование кливажа оказывает относительная компетентность слоев. С этим связано преломление кливажа при переходе от одного слоя к другому. Для переслаивающихся песчаников и сланцев с учетом зависимости хрупкости пород от глубины можно ожидать в близповерхностных условиях формирования трещиноватости, на большей глубине — кливажа течения в сланцах и на еще большей глубине — формирования кливажа течения в сланцах и кливажа разлома в песчаниках. Сланцеватость, параллельная слоистости, может образоваться без воздействия тектонических напряжений за счет перекристаллизации в условиях высокой температуры глинистых минералов с унаследованием их первичной ориентировки, отражающей плоскость осадконакопления. Возможность образования сланцеватости при отсутствии сильной деформации доказывается находками в сланцах недеформированных органических остатков. Поэтому послойную сланцеватость нельзя использовать в качестве показателя интенсивности деформации.

С тектоническими нарушениями может быть связано формирование локальных зон кливажа, залегающих параллельно или под углом к нарушению. Так, в Центральном Казахстане существуют зоны приразломного кливажа мощностью 200—400 м. Интересно отметить, что этот кливаж образовался раньше тектонических брекчий, заполняющих шов нарушения, так как в брекчии обнаружены разноориентированные рассланцованные обломки.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ СКАЛЬНОГО МАССИВА

5. ПОЛЕВОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ СКЛАДОК

Структурный анализ и инженерно-геологическая оценка скальных массивов требуют подробного описания их складчатой структуры. Однако в инженерно-геологической практике детальное морфологическое изучение складок нередко заменяется определением их основного типа с присвоением названия антиклиналь или синклиналь. Такое неполное описание может привести к неточному определению складки. Так, например, в основании Ингурской плотины (СССР) по проектным и литературным данным отмечается небольшая антиклиналь, однако на основании анализа круговых диаграмм трещиноватости выявляются следующие изменения азимутов простирания межпластовых трещин вдоль оси плотины: 120–115–130–140 – нарушение – 125°, что соответствует слабо выраженной флексуре, разорванной правобережным тектоническим нарушением. Иногда основание плотины, располагающейся на крыле складки, характеризуют как моноклиналь, даже если ее замок находится недалеко от сооружения.

Описание складки рекомендуется проводить по следующей схеме:

1) основной морфологический тип складки, состав и возраст пород в ядре и на крыльях;

2) форма и размеры в плане, ориентировка оси, отношение длины к ширине, порядок складки;

3) залегание шарнира (направление и угол наклона);

4) форма и размеры в поперечном сечении (в нескольких сечениях, если конфигурация складки меняется вдоль оси), форма замка, залегание крыльев;

5) наклон осевой плоскости;

6) изменение мощности слоев в различных частях, фациальные изменения пород в связи с конседиментационным складкообразованием;

7) изменение формы с увеличением глубины залегания;

8) разрывные нарушения и системы мелкой (фоновой) трещиноватости, пространственно связанные со складкой, закономерности их ориентировки относительно ее элементов;

9) наличие кливажа, ориентированного закономерно относительно складки;

10) положение в складчатой структуре района и залегание относительно соседних складок;

11) особенности механизма и истории формирования, генетический тип;

12) влияние складки на инженерно-геологические особенности

и свойства скального массива, положение проектируемого сооружения относительно складки.

Залегание слоев на крыльях складки предпочтительнее выражать азимутом и углом падения, чем простирания, так как это сокращает запись (не надо писать направление падения) и удобно для нанесения на круговую диаграмму. Однако эта рекомендация не относится к очень редкому случаю вертикального залегания слоев, которое надо обозначать через азимут простирания.

Иногда, особенно в ультраметаморфических комплексах, бывает трудно замерить истинное залегание крыльев складки, поскольку оно маскируется многочисленными мелкими складками. В этом случае рекомендуется провести массовые замеры с нанесением элементов залегания слоев на круговую диаграмму. На диаграмме легко определить среднее положение элементов складки, наклон ее шарнира и осевой плоскости.

Например, на участке Асуанской плотины после нанесения результатов массовых замеров залегания слоев на круговую диаграмму выявилось два четких максимума. Основной максимум со средним азимутом падения 270° и средним углом падения 30° соответствует крылу антиклинальной складки первого порядка и второстепенный максимум со средним азимутом падения около 75° и средним углом падения около 25° отвечает соединительным крыльям флексурных складок второго порядка. Несовпадение простираний этих максимумов отражает слабое погружение к северу шарниров флексурных складок.

Плотина Кассеб приурочена к эоценовым известнякам, слагающим крыло синклинали второго порядка, причем замеры угла залегания слоев показали, что имеется довольно большой разброс его значений без четкой закономерности. Однако нанесение элементов залегания слоистости в каждом примыкании плотины на отдельные круговые диаграммы наглядно показало, что полученные максимумы на каждом берегу смещены примерно на 30° один относительно другого. Эти максимумы, таким образом, отражают крылья антиклинальной складки третьего порядка, ось которой совпала с руслом реки. По диаграмме были вычислены положение осевой плоскости (простирание и угол наклона) и наклон шарнира.

Большой диапазон размеров складок и обычно одновременное присутствие складок разного порядка, характеризующихся различным инженерно-геологическим значением, делает актуальным проблему разделения складчатых форм на порядки. При этом с практической точки зрения удобнее применять местную шкалу, основанную на конкретных формах изучаемого массива, а не универсальную, в отношении которой пока отсутствует единое мнение. Кроме того, опыт изысканий показывает, что реальные складки в различных районах не совпадают ни по количеству порядков, ни по размерам составляющих их форм.

На инженерно-геологических картах различного масштаба, а тем

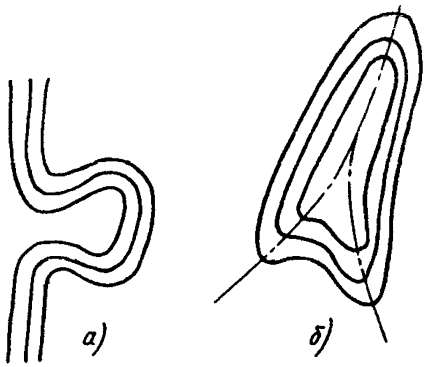

Рис. 11. Схематическое изображение в плане некоторых типов складок: *а* – "структурный нос"; *б* – складка с виргацией (разветвлением оси)

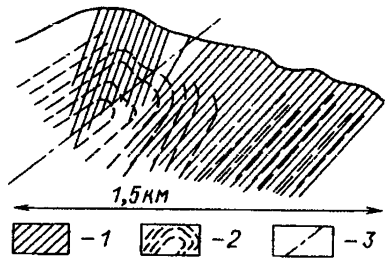

Рис. 12. Кливаж в замке антиклинали в аспидных сланцах (по Шолпо, 1977 г.): *1* – кливаж; *2* – полосчатость; *3* – ось – антиклинали

более на всякого рода структурных схемах и планах необходимо показывать оси складок с указанием их порядка, направления и угла наклона шарнира. При этом надо показать различными обозначениями основные морфологические типы складок и элементы залегания пород на крыльях в количестве, достаточном для создания наглядного представления о форме складок. На геологических профилях необходимо показывать проекцию осевой плоскости складки с указанием ее типа и порядка. В некоторых случаях и особенно при очень пологих складках удобно выявлять и изображать на картах складчатые формы с помощью изолиний, проведенных по какому-нибудь маркирующему горизонту или по слою, имеющему особые свойства (рис. 11).

Картирование и описание складчатой структуры массива должно сопровождаться крупномасштабными зарисовками мелких складчатых форм. Это важно потому, что мелкие формы могут отражать в миниатюре общую складчатую структуру участка. В частности, мелкие и крупные складки одной и той же системы часто являются подобными: имеют приблизительно одинаковую степень сжатости, более или менее одинаковое положение в пространстве осевых поверхностей и шарниров, сходный характер сопряжения с осложняющими их разрывами и развивающимися в породах упорядоченными текстурами. Поэтому наблюдения и зарисовки малых складчатых форм помогают понять лучше складчатую структуру всего массива и историю ее формирования.

При выявлении складок нередко встречаются значительные трудности, особенно в сложнодислоцированных или литологически однородных толщах. Например, в однообразной вулканогенно-обломочной толще, залегающей в нижнем бьефе Худонской плотины (СССР), складчатость и залегание пород можно установить с трудом по ориентировке

редких гнезд шлакообразных туфов и нечетких линзовидных скоплений относительно крупных обломков, а также по слабо выраженным в рельефе уступам, образованным более прочными разностями.

Сложную проблему представляет собой выделение складок в толще нижнеюрских однородных черных аспидных сланцев мощностью около 3000 м, залегающих в центральной части Кавказа между реками Терек и Андийское Койсу. Слоистость здесь маскируется интенсивным кливажом, близпараллельным осевым поверхностям складок, а на крыльях совпадающим с напластованием. Очень редкие маломощные прослои кварцевых песчаников позволяют в отдельных местах выявить интенсивную складчатость. Так, в районе перевала Качу наблюдается опрокинутая к северу изоклинальная складка (рис. 12). На наличие складок указывает также несоответствие мощностей, установленных в конкретном разрезе и в целом по району, а также случаи веерообразного расхождения кливажа, характерные для замка антиклинали. Иногда складки в кливажированных литологически однородных толщах обнаруживаются на аэрофотоснимках. В этих условиях нельзя ограничиваться одним пересечением участка кажущегося моноклинального залегания пород. Необходимо сделать несколько пересечений с прослеживанием пород по их простиранию. Рекомендуется также искать коренные выходы пород вблизи уреза воды, где на отполированных водой поверхностях иногда фиксируется полосчатость, образованная тонкими, более песчанистыми прослоями. Как правило, нижняя поверхность песчанистого прослоя более резкая, чем верхняя, что позволяет установить не только элементы залегания слоя, но и определить, как лежат пласты (нормальные, или они перевернуты).

6. ИЗУЧЕНИЕ ИСТОРИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СКЛАДОК

Историко-генетическое изучение складок затрудняется сложностью процесса их формирования, характеризующегося длительностью и многофакторностью. Встречаются складки в пределах которых устанавливается разный механизм образования для различных слоев. В современных представлениях о генезисе и причинах формирования складок много неясного, спорного и гипотетичного. Тем не менее целенаправленные наблюдения и творческий анализ полученных данных позволяют сделать определенные выводы.

При изучении процессов складкообразования следует различать кинематические и динамические аспекты. Кинематические особенности формирования складки характеризуют происходящие движения, а динамические — объясняют причины этих движений и, в частности, вызывающие их силы. Выявление динамических условий складкообразования более сложно, чем изучение их кинематических особенностей. Анализ морфологических особенностей региональных складок обычно позволяет определить главные направления складкообразующих движений,

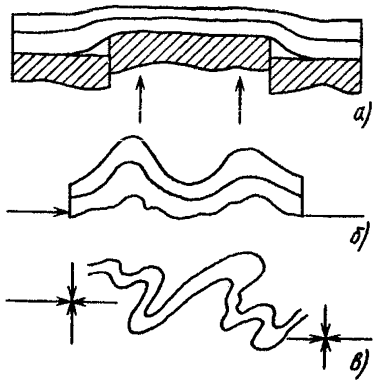

Рис. 13. Основные кинематические типы складки (по В. В. Бронгулееву): *а* – штамповые (поперечный изгиб); *б* – коробления (продольный изгиб); *в* – течения

т. е. их основные кинематические типы (рис. 13).

Складки поперечного изгиба, образующиеся при вертикальных тектонических движениях горизонтально залегающих пород характеризуются, по данным [3], следующими признаками: изометрическими или эллиптическими формами в плане; простыми и весьма пологими формами в поперечном сечении; крутыми и близвертикальными осевыми поверхностями; прихотливым расположением в плане синклиналей и антиклиналей обычно без образования ритмично сменяющих друг друга волн; увеличением в процессе их формирования поверхности и уменьшением мощности деформируемых слоев (за исключением конседиментационных синклиналей, в которых мощность может увеличиться). Эти складки обычно характерны для платформенных покровов.

Складки продольного изгиба, образующиеся при горизонтальных тектонических движениях, можно выделить по следующим признакам [3]: отчетливый линейный характер складок; меньшая площадь в плане, чем у складок поперечного изгиба; изменение формы поперечного сечения вдоль оси складки от пологой на краях до крутых, изоклинальных или веерообразных в середине складки; изменение в широких пределах наклона осевой поверхности как в разных складках, так и в пределах одной складки; иногда наличие лежачих и опрокинутых складок; значительное проскальзывание слоев на крыльях складки в процессе ее формирования. Эти складки распространены в складчатых поясах.

Некоторые трудности вызывает иногда определение генетического типа локальных складок, имеющих ограниченное распространение. Среди них помимо небольших неровностей крупных тектонических складок следует выделять складки внутриформационного течения, которые, по данным [3], характеризуются следующими особенностями: локализацией в сравнительно маломощных толщах пород и затуханием в подстилающих и перекрывающих их отложениях; разнообразием форм поперечного сечения; резкой дисгармоничностью; различным наклоном

осевых плоскостей; изменением мощности слоев на различных крыльях складки.

Признаками локальных приразломных складок, обусловленных тектоническими движениями по разлому, являются их пространственная приуроченность к зоне нарушения и, по-видимому, соответствие формы изгиба направлению относительного смещения тектонических блоков, разделяемых этим разломом. При этом иногда бывает трудно отличить такой приразломный изгиб слоев от разорванной флексуры. К разорванной флексуре, очевидно, можно отнести изгиб, при котором его амплитуда превышает амплитуду смещения по нарушению.

Признаком локальных складок, образующихся при инъективных дислокациях, служит их приуроченность к экзоконтакту относительно крупных инъективных тел (интрузии, диапиры и др.). Небольшие изгибы могут образоваться и около маломощных интрузивных тел. Так, в основании Асуанской плотины линзовидные тела порфировидных гнейсо-гранитов мощностью до 40 м, образовали при своем внедрении изгибы вмещающих сланцев с амплитудой в несколько метров, что является доказательством их интрузивного внедрения, а не образования путем расплавления на месте.

Особенностью локальных гравитационных складок является их приуроченность к маломощной (до нескольких метров) приповерхностной зоне на горных склонах с направлением изгиба слоев вниз по склону. Основным признаком локальных складок, образующихся вследствие перехода ангидрида в гипс, является приуроченность их к гипсоносным отложениям при отсутствии в окружающих породах.

Значительный интерес представляет собой определение складчатости по отношению к процессу осадконакопления, или, другими словами, отнесение складки к постседиментационному или конседиментационному типу. Здесь важное значение имеют наблюдения над мощностью слоев и фациальными изменениями пород в различных элементах складки. Признаками конседиментационных складок (т. е. формирующихся одновременно с осадконакоплением) является сокращение мощности в антиклиналях и, наоборот, увеличение мощности слоев в синклиналях. При этом породы в гребне конседиментационной антиклинали могут относиться к более мелководным фациям по сравнению с одновозрастными осадками на крыльях складки, а породы в центральной части синклинали могут представлять собой более глубоководные фации. В своде конседиментационной антиклинали может происходить и частичный размыв пород. Иногда можно встретить складку конседиментационную в своей верхней части и постседиментационную внизу. На участке проектируемого гидроузла Рава конседиментационный характер антиклинальной складки был доказан в результате изучения четырех нижних пачек евфратской свиты, которые отчетливо выделяются на крыльях, а в своде антиклинали переходят в трудно расчленяемый рифогенный комплекс с уменьшением общей мощности в 2–3 раза.

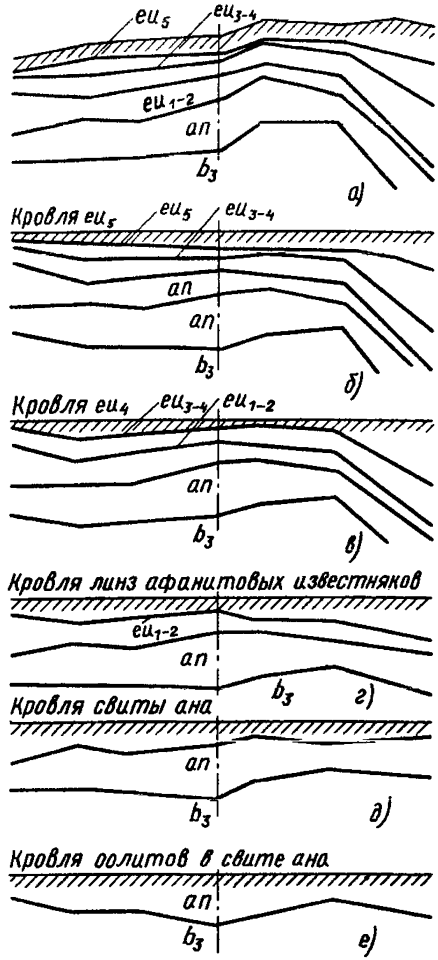

Рис. 14. Схема формирования складки: положение ее на моменты завершения отложения различных пачек, свит, линз и горизонтов:
а – современное положение; *б* – пачки eu_5; *в* – пачки eu_4; *г* – линзы афанитовых известняков; *д* – свиты ана; *е* – оолитовый горизонт

Определенный интерес представляет также восстановление истории формирования складок. При этом большое значение имеют анализ угловых несогласий, позволяющий установить основные этапы складкообразования, и определение абсолютного возраста пород синорогенных и посторогенных интрузий, позволяющее уточнить время образования складок. Процесс формирования конседиментационных складок можно уточнить путем последовательного анализа мощностей слагающих их литологических пачек с помощью простых графических построений.

Методика такого анализа рассматривается на примере антиклинали, расположенной на правобережном участке проектируемой плотины Рава (рис. 14). В ядре этой узкой валообразной складки, протянувшейся в широтном направлении на расстояние более 100 км, местами обнажаются рифогенно-обломочные известняки свиты ана, окруженные породами евфратской свиты.

При восстановлении истории формирования этой антиклинали исходили из допущения, что кровля литологических пачек залегала во время осадконакопления горизонтально и что в замке антиклинали не было размыва пород. Анализ начинался со спрямления кровли нижней пачки свиты ана (горизонт оолитовых известняков) с сохранением ее фактической мощности. При этом форма подошвы пачки характеризовала складчатую деформацию этой первоначально горизонтальной поверхности за период отложения пород пачки. Затем спрямляли кровлю верхней пачки свиты ана, а получившиеся при этом изгибы подошвы верхней пачки характеризовали рост складки за период образования этой пачки. Дальнейшее спрямление вышележащих пачек свидетельствовало о последовательном формировании складки во время отложения пород данных литологических пачек. Восстановленная, таким образом, картина последовательного роста антиклинали в связи с процессом осадконакопления указывает на длительность ее формирования, а также на неравномерность складкообразующих движений в пространстве и во времени.

Оценка степени сжатости складок характеризует в целом интенсивность деформации скального массива. При таком анализе, однако, могут возникнуть определенные трудности, особенно в литологически однородной метаморфической толще. В этом случае без видимой складчатой структуры можно судить о деформации массива по ориентировке осевой поверхности и шарниров птигматитовых складок. Изоклинальные складки, характеризующие интенсивно деформированный массив, трудно распознаются из-за параллельного залегания крыльев и редкого присутствия в обнажениях шарниров. Поэтому эти тесно сжатые складки часто принимают за моноклинальное залегание и делают неправильный вывод об отсутствии в этих породах следов больших деформаций, а также ошибочно оценивают мощность этих пород.

Определенные трудности представляет также выявление в осадочных и особенно в метаморфических толщах наложенной складчатости, отражающей деформацию разного плана и возраста. При этом на практике нередко фиксируют только позднюю складчатость, как наиболее четко выраженную, что приводит к ошибочному представлению о развитии в этих породах простых и сравнительно пологих складок, образовавшихся в одну фазу деформации.

Следует отметить, что только одно присутствие двух направлений складок (основного и поперечного относительно оси складки) не является достаточным доказательством нескольких разновременных и разнонаправленных фаз складкообразования, а может быть также одновременным проявлением сложного поля напряжений. Признаками наложенной складчатости могут служить: изгибы осевых поверхностей (плоскостей) более ранних складок; искривления поверхностей разрывов, осложняющих эти складки; изгиб кливажа осевой поверхности ранних складок; секущее положение осевых поверхностей наложенных складок относительно осевых поверхностей ранних складок.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ СКЛАДОК И РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУР

Существует пространственная связь тектонических нарушений и систем мелкой трещиноватости с формированием и залеганием складок. Последние контролируют ориентировку как межпластовых, так и секущих разрывов, а также зоны повышенной трещиноватости. В этом проявляется большое практическое значение складчатых структур. В данном разделе рассматривается только связь систем мелкой трещиноватости со складками, поскольку в геологической литературе допускается, что эта связь более определенная, чем с тектоническими нарушениями. Поэтому в генетической классификации трещин был выделен специальный тектонический тип "соскладчатых" трещин.

Влияние складчатости, по-видимому, проявляется не только в формировании соскладчатых трещин, возникающих во время складкообразования, но также связывается и на доскладчатых и послескладчатых трещинах. Ранее образовавшиеся трещины могут быть переориентированы вместе с поворотом слоев, при этом в одних частях складки они могут приоткрыться, а в других, наоборот, сомкнуться. Формирование бесспорных соскладчатых трещин может быть связано с проскальзыванием слоев, зажатых между более пластичными породами. Более сложное сочетание соскладчатых трещин образуется в поздние этапы складкообразования под действием тех же сил, но в условиях, когда породы уже потеряли способность к пластическому течению. Наконец, симметрия смятого в складки массива должна влиять на ориентировку образующихся в дальнейшем трещин. Поэтому закономерное размещение систем трещин относительно складки не является доказательством их одновременного образования со складками.

Часто наблюдается концентрация трещин в шарнирных частях складок. А. В. Королев (1951 г.) описывает смятые в складку пироксеновые порфириты, характеризующиеся следующими значениями модуля трещиноватости: на пологом южном крыле складки 5, ближе к оси 12, в осевой части 18 и на северном крутом крыле 12 трещин на 1 м. В известняках карбона этим же автором описано сгущение кальцитовых прожилков в осевой части складки, достигающих 22% общего объема породы по сравнению с 2–3% на крыле этой складки.

Повышенная трещиноватость в сводах антиклиналей была установ-

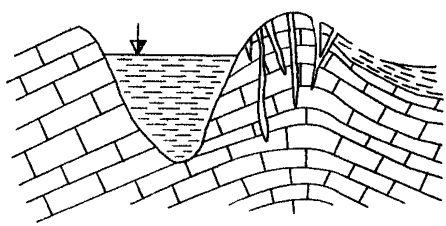

Рис. 15. Антиклинальная складка в юрских известняках на правобережном участке арочной плотины Кастийон. Зона повышенной трещиноватости приурочена к гребню антиклинали

лена на участках плотин Жениссия, Кастийон (рис. 15), Чарвакская (СССР).

В отношении закономерной ориентировки трещин нет единой общепринятой точки зрения. Известно три основных варианта схемы связи ориентировки трещинных систем со складками:

1) Де Ситтер (1960 г.), В. А. Букринский, А. В. Михайлова (1963 г.) увязывает трещиноватость с залеганием шарнира и осевой плоскости складки.

2) Л. Д. Кноринг (1969 г.) связывает трещинные системы с залеганием слоев на крыле складки.

3) В Рекомендациях ЦНИИС (1974 г.) ориентировка трещин связывается одновременно со слоистостью и складчатостью. В исследовании Н. В. Мельникова (1962 г.) показано одновременное присутствие систем, связанных со всей складкой, и систем, специфичных для того или иного ее крыла. Наличие многочисленных вариантов связи трещиноватости со складками подчеркивает субъективный характер определения генетического типа тектонических трещин.

Необходимо отметить более сложную и многообразную картину пространственного размещения трещинных систем в реальных складчатых массивах по сравнению с вышеупомянутыми упрощенными схемами. Об этом свидетельствует разнообразие рисунков круговых диаграмм, полученных на различных участках. Даже в пределах одной складки в разных слоях может наблюдаться различная трещиноватость.

В основании арочной плотины Кассеб выделяются три наиболее распространенные системы трещин: одна межпластовая и две, в которых трещины перпендикулярны слоистости. При этом трещины двух последних систем не различаются достаточно четко по морфологическим признакам, чтобы среди них можно было выделить трещины скола и отрыва. Обращает на себя внимание, что практически отсутствуют трещины, параллельные или перпендикулярные линии простирания слоистости.

Сложные геометрические взаимоотношения трещиноватости и складок показаны Р. П. Никельсеном (1967 г.) для Аппалачского плато (США). Там выделяются четко выраженные системы трещин, перпендикулярные оси складок. Однако при повороте оси складки эта преобладающая система трещин обычно не поворачивается, а пересекается и замещается другой системой, близперпендикулярной оси, т. е. наблюдается как бы скачкообразное изменение залегания системы на фоне постепенного изгиба складки.

Сложность условий формирования трещин в связи со складкообразованием выражается в наличии обычно многих складок разного порядка, неодинаково ориентированных, образовавшихся в несколько этапов, часто сложной формы, с изгибанием шарнира, со смещением сводов и т. п. Надо также учитывать различие максимальной интенсивности складкообразования, физико-механических условий в период складкообразования и тектонических процессов в геосинклинальных

и платформенных областях. К этому можно добавить неоднородность поля напряжения в пределах одной формирующейся складки, связанную с наличием слоев и пачек разной компетентности и с образованием при изгибе относительно крепкой пачки на внешней стороне перегиба зоны относительного растяжения, а на внутренней – зоны сжатия.

Большое воздействие на характер влияния складок на трещиноватость, по-видимому, оказывают временные взаимоотношения процессов складкообразования и литификации. Так, при прочих равных условиях можно получить разные круговые диаграммы для складок, образовавшихся в процессе литификации (конседиментационная складчатость) или после литификации и при наличии нескольких этапов складкообразования, приуроченных к разным стадиям литификации. Имеет значение и отношение длины трещин к размерам складки. Так, в случае большой складки и относительно мелких трещин последние будут больше связаны с напластованием и меньше с осевой плоскостью, чем в случае длинных трещин и относительно небольшой складки.

8. ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ СКЛАДОК С РЕЛЬЕФОМ

При инженерно-геологических изысканиях изучение влияния складчатости на рельеф представляет значительный интерес, так как помогает уточнить складчатую структуру массива и восстановить последний этап ее формирования по особенностям рельефа, а также понять процессы формирования рельефа и, в частности, историю формирования долины. При этом нельзя ограничиваться упрощенными представлениями о прямом выражении складок в рельефе в форме антиклиналей-поднятий или синклиналей-прогибов, а также случаях инверсии в виде впадин по антиклиналям. Следует отметить тесную взаимосвязь рельефа с новейшими складчатыми деформациями, изучать которые надо на основе геоморфологического анализа. Поэтому настоящий раздел составлен в основном по материалам Н. П. Костенко [8], являющегося специалистом в этой области.

Необходимо прежде всего различать "мертвые", т. е. неразвивающиеся складки, и "живые", развивающиеся, по-разному влияющие на рельеф и на горообразование (рис. 16). "Мертвые" складки могут образовать неровности в рельефе только путем избирательной денудации в условиях общего подъема. Здесь важное значение имеют литолого-структурный фактор, обусловливающий разную устойчивость тех или иных частей складки, и глубина денудационного среза. "Живые" складки играют главную роль в рельефе, который формируется в процессе их новейшего тектонического развития и под одновременным влиянием денудации, искажающей и смягчающей новейшие рельефообразующие движения.

Очевидно, что новые складки могут быть выражены в рельефе только при превышении скорости вертикальной составляющей тектони-

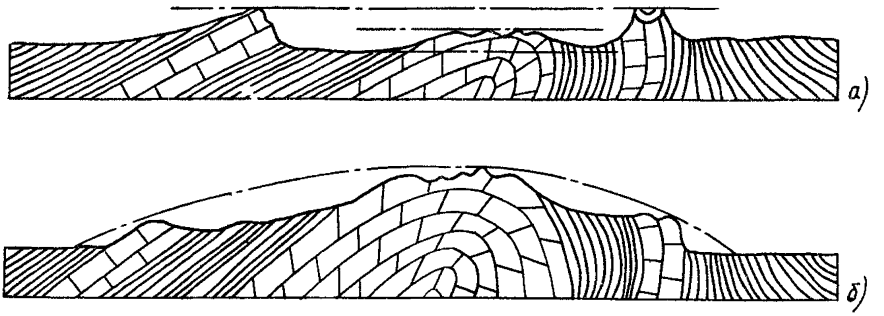

Рис. 16. Схема поперечных сечений "мертвых" (*а*) и "живых" (*б*) антиклинальных складок (по Н. П. Костенко)

ческого движения над нивелирующим воздействием экзогенных процессов денудации и аккумуляции новейших осадков. "Живые" складки могут осложниться разрывными нарушениями. В некоторых случаях этот процесс приводит к полному отмиранию деформации изгиба и к возникновению новой "живой" структурной формы с блоковым строением и перемещением отдельных блоков только по разрывным нарушениям. Эти перемещения могут в различной степени наследовать направление движения и скорость прежних складчатых деформаций.

В горных складчатых областях встречаются сложные сочетания "живых" и "мертвых" складок различного порядка. При изучении новейшего развития складок необходимо учитывать общие и локальные тектонические движения и их взаимоотношение. При этом правильней рассматривать не изолированные складки, а сопряженные системы синклиналей и антиклиналей. В сопряженных системах складок горных сооружений относительная роль отрицательных и положительных форм неравнозначна и синклинали, как правило, имеют подчиненное значение. Новейшие складчатые дислокации принято разделять в морфологическом отношении на мегаскладки с большим радиусом кривизны, составляющим десятки и сотни километров, и обычные складки с относительно малым радиусом кривизны, не превышающим несколько километров.

Мегаскладки, т. е. пологие изгибы, положительные формы которых совпадают с главными системами хребтов, устанавливаются по деформациям поверхностей выравнивания, сформировавшихся до горообразования. Особенности этих пологих складок заключаются в их глубоком заложении и длительном развитии, соизмеримом с этапами горообразования. Причем наиболее интенсивные вертикальные движения являются поздне- или посторогенными по отношению к внутреннему складкообразованию. Формирование мегаскладок первого порядка часто сопровождается проявлениями интрузивного и эффузивного магматизма. В строении мегаскладок надо различать внешнее строение,

характеризующееся пологим сводом, и внутреннее, обусловленное складками более высокого порядка и разрывными нарушениями. С учетом внутреннего строения мегаскладки можно подразделить на сводово-складчатые, наблюдаемые в осадочных породах (например, Крым), сводово-блоково-складчатые (Большой Кавказ) и сводово-блоковые, распространенные в условиях поднятого фундамента. Следует отметить отсутствие единой точки зрения на природу и механизм формирования мегаскладок. В частности, неясна относительная роль складчатых и разрывных деформаций при их образовании.

Новейшие складки с относительно малым радиусом кривизны отмечаются преимущественно в осадочных толщах и реже в породах фундамента. Можно выделить два основных типа этих складок: постседиментационные складки, в которых изгиб поверхности выравнивания близок к общему изгибу слоев, и складки с длительным конседиментационным развитием, предшествующим становлению складки в рельефе. При этом изгиб поверхности выравнивания не совпадает с общим изгибом слоев и отражает лишь последнюю стадию его формирования.

Геоморфологическое выражение процессов складкообразования происходит по-разному в областях с длительным поднятием и в областях с устойчивым прогибанием, представляющих предгорные и межгорные впадины.

В условиях общего поднятия и денудации формирование возвышенностей-антиклиналей и впадин-синклиналей всегда сопровождается образованием зонального рельефа, являющегося признаком современного или лишь недавно прекратившегося новейшего развития структурной формы. При этом центральная часть новейшего поднятия больше денудирована по сравнению с сопредельными районами. По мере удаления от свода к крыльям интенсивность эрозии угасает вплоть до перехода денудационного рельефа в аккумулятивный в сопряженной области понижения. Соответственно при развитии синклинали, выраженной в рельефе, наблюдается угасание расчлененности рельефа от склонов к центру.

При ундуляции новейших антиклиналей подъем и погружение их шарниров происходит практически независимо от литологического фактора. Участки резкого понижения шарнира антиклинали часто пропиливаются сквозными долинами рек. Подъем складок в условиях крутого склона общего поднятия приводит к наклону антиклиналей и синклиналей в сторону сопряженной впадины. При развитии таких асимметричных складок наблюдается смещение водораздельной части соответствующих хребтов на крылья антиклиналей.

В конденудационных складках поверхность выравнивания срезает наиболее активно поднимающуюся часть антиклинальной складки, обычно соответствующей водоразделу возвышенности. При неравномерном росте складок в рельефе образуются эрозионно-денудационные ступени на склонах возвышенности, соответствующие региональным

врезам транзитных рек. Изучение этих эрозионно-денудационных форм позволяет проследить процесс роста складок в течение их конэрозионного развития.

В условиях общего погружения и аккумуляции новейших четвертичных отложений может происходить локальное поднятие антиклинали с постепенным освобождением ее из-под покрова рыхлых отложений. Одним из признаков роста такой антиклинали является местный зональный рельеф с концентрическим расположением вокруг центра новейшего поднятия трех зон различной глубины денудационного среза: полного обнажения, просвечивающей и закрытой складки. В случае наклонной складки зональность является неправильно-концентрической.

В отличие от "мертвой" складки, повсеместно расчлененной сквозными долинами преимущественно транзитных рек, в "живой" растущей антиклинали в начале конэрозионного развития наблюдается формирование местного водораздела и множества сквозных и составных долин. При этом общий рисунок расчленения в пределах растущего поднятия сохраняет в плане радиально-лучистый характер относительно возникшего местного водораздела. Нарастание скорости роста возвышенности способствует миграции рек в сторону меньшего воздымания. Дальнейшее повышение скорости миграции рек сменяется их закреплением в быстро углубляющихся долинах. Сокращение ширины этих долин пропорционально увеличению скорости роста складки. Превышение скорости подъема над максимальной интенсивностью эрозии приводит к отмиранию большинства рек в центральной части развивающегося поднятия.

Все изложенное указывает на большую и сложную связь рельефа со складчатой структурой массива и новейшими тектоническими движениями. При инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства необходимо получать максимальную геологическую информацию путем анализа рельефа на конкретном участке. Это является весьма эффективным, но недостаточно используемым в практике изысканий методом исследования массива.

9. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКЛАДОК НА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СКАЛЬНОГО МАССИВА

Для инженерно-геологического обоснования проектных решений надо четко представлять особенности и характер влияния складчатой структуры на свойства массива. Оценка влияния складчатости на инженерно-геологические условия строительства гидротехнических сооружений сводится обычно к рассмотрению и анализу следующих вопросов: уточнению пространственного залегания слоев с определенными инженерно-геологическими свойствами; выявлению условий залегания и состава пород на отдельных участках и отметках; изучению инженерно-

геологических свойств скального массива, связанных со складкой в целом; выявлению инженерно-геологических свойств, характерных для различных элементов складки; уточнению размещения разрывов, пространственно связанных со складкой; уточнению современного напряженного состояния скального массива в связи с его складчатой структурой; уточнению гидрогеологических особенностей, обусловленных складками. Решение этих вопросов обеспечивает основу для оценки прочностных, деформационных, фильтрационных и других свойств массива, связанных с его складчатой структурой.

Уточнение пространственного залегания слоев с определенными инженерно-геологическими свойствами касается недоступных для непосредственного наблюдения глубинных и подрусловых частей массива. К этим слоям относятся водоупорные и водопроницаемые пачки, пласты относительно прочных или слабых пород, пачки легкорастворимых пород и т. п. Особое практическое значение имеет точное определение ориентировки межпластовых трещин и тонких глинистых прослоев, обычно определяющих устойчивость откосов и прочность оснований сооружений на сдвиг. При геометрических построениях необходимо учитывать, что положение слоев может существенно измениться смещением по разрывным нарушениям. Так, разрывные нарушения могут разорвать со смещением водоупорные или водонепроницаемые слои, опустить или поднять пачку прочных пород и т. п.

Выявление пространственного залегания и состава пород на отдельных участках массива и отметках касается прежде всего выявления их неоднородности и анизотропности в основании конкретных сооружений, в стенках и дне строительного котлована, на трассе туннеля, в кровле и стенках подземных камер ГЭС и др. Особенно трудно решается эта задача для глубинных подземных сооружений ввиду дороговизны и малой эффективности глубокого бурения. Например, при проходке деривационного туннеля Ладжанурской ГЭС (СССР) пересекаемые им Лечхумская синклиналь и Дехвирская антиклиналь оказались сжатыми и с более крутым залеганием крыльев, чем предполагалось по материалам изысканий. Вследствие этого отрезок туннеля в породах чокрака оказался на 600 м короче, а в породах карагана на столько же длиннее, чем ожидалось [10]. Этот пример показывает значение учета складок для экстраполяции геологических данных на глубинные части массива.

Определение инженерно-геологических свойств скального массива, связанных со складкой в целом, относится прежде всего к участкам интенсивной складчатости, характеризующимся значительной тектонической нарушенностью пород и представляющим собой ослабленные зоны, а также к локальным складкам, ослабляющим отдельные части основания сооружения. Так, зона крутых разорванных складок на левобережном примыкании контрфорсной плотины Фарахназ Пехлеви (Иран) снижает общие прочностные и деформационные характеристики

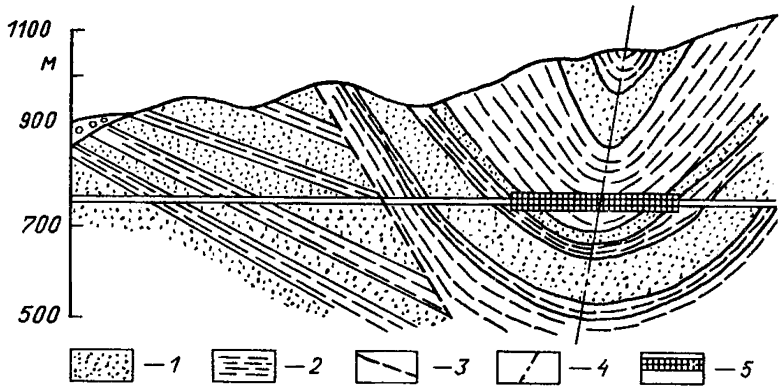

Рис. 17. Схематический геологический разрез по оси деривационного туннеля на гидроузле Локтак. К замку синклинали приурочены сильнотрещиноватые водонасыщенные породы и высокие естественные напряжения, повлиявшие на условия проходки туннеля:

1 – песчаник; *2* – сланцы; *3* – тектоническое нарушение; *4* – след осевой плоскости синклинали; *5* – участок сильнотрещиноватых и водоносных высоконапряженных пород

основания плотины, в связи с чем пришлось убрать ослабленные породы на глубину 30–40 м и провести значительные работы по укреплению скального массива и повышению устойчивости плотины на сдвиг. Ослабленная зона интенсивно смятых и опрокинутых линейных складок в основании гравитационной плотины Ксинагьян (Китай) обусловила возникновение нескольких оползней во время строительства, в связи с чем потребовалось сместить ось плотины на левом берегу. Примером ослабленного участка, связанного с локальной складкой, является разорванная флексура с наложением кармана интенсивно выветрелых пород в примыкании арочной плотины Кариба [5]. В этих примерах проявляется значение интенсивности складчатости как показателя общей деформированности и тектонической нарушенности массива при определении степени сохранности пород основания проектируемого сооружения.

Выявление инженерно-геологических свойств, характерных для различных элементов складки, производится в случаях возможного присутствия ослабленных или высокопроницаемых зон в своде антиклинали и фациальных изменений пород в осевых частях складок, наличия обводненных или напорных участков в ядрах синклиналей, а также повышенных естественных напряжений в местах изгиба слоев. Ослабленные, сильнотрещиноватые зоны, приуроченные к гребням антиклиналей, были, например, встречены при строительстве плотин Кастийон (рис. 15), Женисия, Будуа (Франция). В основании гидроузла Табка горизонтальный прослой бентонита, существенно снижающий прочность бетонных сооружений на сдвиг, оказался замещенным более

прочным мергелем на своде небольшой очень пологой антиклинальной складки. Наличие этого фациального замещения, связанного с конседиментационным формированием складки, существенно повлияло на размещение напорных бетонных сооружений. При проходке туннелей на гидроузлах Лактак (Канада) (рис. 17), Манери через осевые участки синклинальных складок были встречены сильно водонасыщенные породы, осложняющие проведение горных работ. В основании плотины Кентакки (США) вдоль гребня антиклинали был обнаружен значительный карстовый канал, что вызвало необходимость специальных работ по его заделке.

С помощью складчатой структуры можно иногда уточнить положение локальных участков массива с концентрацией горизонтальных естественных напряжений, а также выявить ориентировку максимальных сжимающих усилий, определяющих горное давление при проходке подземных выработок. Так, относительно повышенные напряжения можно предположительно ожидать в ядре синклинали и в глубине шарнирных частей антиклинали с ориентировкой максимальных напряжений близперпендикулярно оси складки. Это следует учитывать при размещении опытных выработок для измерения естественных напряжений. Повышенные напряжения вероятнее встретить в ядрах более молодых и особенно неотектонических форм (туннель Жинвальской ГЭС).

Некоторые типы складок можно использовать также для выявления участков повышенных естественных напряжений в приповерхностных частях скального массива. Так, в Южном Онтарио (США) в горизонтально залегающих известняках было установлено формирование современных складок-выбросов. Эти породы относятся к платформенному покрову, несогласно залегающему на древнем архейском фундаменте, причем данный район характеризуется сейсмически спокойными условиями. Складки-взбросы имеют обычно амплитуду порядка нескольких метров (максимально 10 м) и наибольшую длину около 1,5 км. Оси этих складок вытянуты преимущественно в северо-западном направлении. Установлено, что они начали образовываться после ледникового периода и продолжают формироваться в настоящее время. Одна такая складка образовалась в 1945 г., запрудила ручей и создала таким образом, небольшое наводнение.

Формирование этих складок связано с повышенными приповерхностными горизонтальными напряжениями, что подтверждается их непосредственными измерениями. Предполагается, что повышенные горизонтальные напряжения обусловлены региональными тектоническими причинами, что обеспечило более или менее постоянную ориентировку максимальных усилий на протяжении около 400 км, а возможно, остаточными напряжениями от давления ледника, располагавшегося ранее в этом районе. Образование аналогичных складок наблюдается иногда в дне строительных котлованов вследствие разгрузки во время их выемки.

10. УЧЕТ СКЛАДОК ПРИ ОБОСНОВАНИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Задачами изысканий являются оценка инженерно-геологических условий и выдача соответствующих исходных материалов для проектирования гидротехнических сооружений. В материалах изысканий должно содержаться инженерно-геологическое обоснование таких проектных решений, как выбор створа, компоновки и конструкции сооружений. Обязанностью инженера-геолога должна быть рекомендация при необходимости альтернативного варианта, более благоприятного для конкретных природных условий. В то же время право окончательного принятия того или иного варианта принадлежит проектировщику.

Анализ 40 случаев значительного влияния складок на основные проектные решения показывает, что они чаще всего влияют на выбор створа и местоположения основных сооружений гидроузла (около 35% случаев) и на выбор конструкции и размеров плотины (около 20% случаев). Меньшее влияние они оказывают на ориентировку и крепление подземных выработок (10% случаев), проектирование и укрепление откосов (10%), укрепление скального основания (10%) и на производство противофильтрационных работ (10%). Под значительным влиянием складок на проектные решения здесь подразумеваются случаи, определяющие выбор проектного варианта, или случаи запоздалого выявления складки, приведшие к изменению проекта, аварии или задержке и существенному осложнению строительства.

Большое практическое значение имеет правильный учет складчатой структуры на начальных стадиях проектирования при выборе участка створа и местоположения основных сооружений гидроузла. При этом надо учитывать возможное наличие в связи со складками как общей тектонической дислоцированности основания, так и локальных ослабленных зон. Например, на участке плотины Ксинагьян (Китай), сложенном девонскими песчаниками и сланцами, была выявлена с запозданием ослабленная зона сильнодеформированных пород, связанная с интенсивной опрокинутой складчатостью, что обусловило образование нескольких оползней во время строительства и потребовало смещения оси плотины на левом берегу. Локальная ослабленная зона в своде антиклинали, представленная трещиноватыми и раздробленными породами, оказала существенное влияние на выбор створа плотины Жениссия. Плотина была удалена от оси складки.

При выборе створа плотины нужен также анализ складчатой структуры как фактора, контролирующего залегание слоев и пачек, характеризующихся определенной прочностью или проницаемостью. Например, на участке плотины Фум-Эль-Герза складка определяет залегание водоупорных слоев и, таким образом, оказывает большое влияние на выбор места плотины [11]. На участке проектируемой Мосульской плотины выбор оси существенно зависит от двух кулисообразных антиклиналей, которые определяют положение наиболее прочных пород, пригодных в качестве основания бетонных сооружений, и залегания слоев легко-

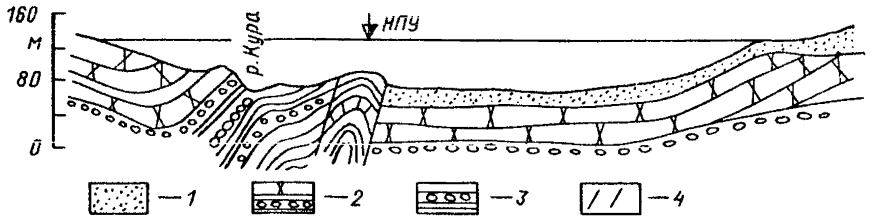

Рис. 18. Геологический разрез по оси проектируемой Акстафинской плотины (по Б. А. Кантору):
1 – четвертичные суглинки, супеси и галечники; *2* – верхнеапшеронские песчаники с прослоями суглинков и конгломератов; *3* – нижнеапшеронские суглинки и конгломераты; *4* – линии надвига

растворимого гипса, которые нежелательно иметь на небольшой глубине непосредственно под плотиной.

Створ плотины Понголапоорт (США) был приурочен к пологому крылу складки, сложенному переслаиванием прочных дацитов и более слабых пирокластических пород. Значение складки здесь проявилось в залегании этих слоев на отметке заложения фундамента бетонных сооружений. При этом выбирали участок, где в основании сооружений присутствуют дациты мощностью не менее 30 м.

Выбор створа Акстафинской плотины (СССР) проводился с учетом наличия в долине р. Куры брахиантиклинали, в ядре которой обнажаются более прочные акчагыльские и апшеронские породы (рис. 18). Наличие этих пород, позволяющее сократить глубину строительного котлована и объем бетонных работ, явилось одним из факторов, обусловивших выбор этого участка. При проектировании гидроузла Фергут (Алжир) плотину разместили на пачке прочных известковистых песчаников. Однако из-за неполной изученности складчатой структуры было неправильно определено положение слоев песчаника на крыле складки. В результате во время строительства на правом берегу пришлось сместить ось плотины в нижний бьеф на 65 м и повернуть ее на 18° [11]. Плотина Сетана (Франция) была размещена на крыле антиклинали, наклоненной в сторону верхнего бьефа под углами 11–34°. После уточнения складчатой структуры плотину передвинули на 25 м вниз по реке, чтобы в основании ее правобережной части залегали более прочные конгломераты.

В случае конседиментационной складчатости необходимо учитывать при выборе створа связанные с этими складками фациальные изменения пород. Так, на участке плотины Табка на р. Евфрат в близгоризонтально залегающих мелах с отдельными прослоями бентонита была выявлена небольшая очень пологая антиклинальная складка. Бентонитовый прослой на гребне этой складки оказался замещенным мергелем, что повысило прочность этого массива на сдвиг и позволило оптимальным образом разместить бетонные напорные сооружения.

При выборе створа плотины часто приходится учитывать также косвенное влияние складок через их воздействие на рельеф [плотины Акстафинская, Мосульская, Сарсангская, Докан, Бекме (Иран), Рава]. Наиболее распространенный случай — это пересечение рекой антиклинали с образованием ущелья, являющегося благоприятным топографическим фактором при строительстве плотины.

Существенное значение имеет своевременный учет складчатой структуры массива при выборе конструкции сооружения и, в частности, типа и размеров плотин. Так, при строительстве плотины Гриб в ее основании с запозданием была выявлена антиклиналь, обусловившая неблагоприятный наклон слоев с уменьшением сопротивления пород сдвигу, а также установлено, что плотина размещена преимущественно на мергелях вместо предполагаемых в основании более прочных песчаников. Для повышения устойчивости плотины в ее основании пришлось устроить заанкеренную железобетонную плиту [11].

В примыкании плотины Ириль Эмда складчатая структура обусловила неблагоприятную ориентировку слоев относительно бортов долины, что привело к формированию крупного оползня. Поскольку съем оползня исключался из-за очень большого его объема, то пришлось разместить водосброс в теле плотины и выбрать специальную конструкцию плотины, подпирающей оползший массив [11].

Неблагоприятная ориентировка слоистости из-за антиклинальной складки в основании плотины Игари, сложенном палеозойскими сланцами и кварцитами с падением в нижний бьеф под углами 2—5°, вызывала опасность сдвига проектируемой гравитационной плотины высотой 55 м, в связи с чем потребовалось устройство специального зуба глубиной 7,5 м. В примыкании проектируемой арочной плотины Сетана залегают неустойчивые на сдвиг блоки, образовавшиеся из-за межпластовых трещин и тектонических нарушений, возникших как следствие складчатости. В конечном счете из-за этого пришлось заменить арочную плотину каменнонабросной.

При выборе типа плотины надо считаться с возможным влиянием складок на неоднородность деформационных свойств скального основания. Например, в основаниях плотины Салиме (Испания), Хайвосси (США) и Канкано (Италия) складчатая структура способствовала различной ориентировке слоистости на разных берегах по отношению к действующим нагрузкам от арочной плотины (на одном примыкании близперпендикулярно и на другом близпараллельно слоистости). Характерная для этих пород значительная анизотропность деформационных свойств привела в этих условиях к существенной неоднородности свойств основания, что заставило отказаться от первоначально намеченного арочного типа плотины.

Необходимо иметь в виду также возможное влияние складок на размеры сооружений. Так, на участке плотины в провинции Хубей (Китай) в связи с наличием ослабленной зоны, связанной с интенсивной

опрокинутой складчатостью, вынуждены были уменьшить высоту плотины. Вследствие залегания в пределах синклинали водоупорных слоев в районе плотины Вади-Мефруш потребовалось выполнить детальный структурный анализ и учитывать складки при выборе НПУ водохранилища [11].

При проходке подземных выработок особое внимание следует уделять перегибам слоистости и особенно ядрам синклиналей, при пересечении которых могут произойти значительный приток воды и обрушение стенок туннелей. Все это нередко требует изменения ориентировки и усиления крепления горных выработок. Например, при строительстве туннеля Локтак (США) длиной 6620 и диаметром 4,5 м была зафиксирована приуроченность участка наиболее трещиноватых и водонасыщенных пород к ядру синклинали, что осложнило проходку туннеля и заставило усилить его крепление. К этому же участку были приурочены максимальные естественные напряжения, вызывающие деформацию крепи. Большая разница в напряженном состоянии массива на сравнительно коротких расстояниях сделала невозможным применение здесь стандартных видов крепления.

На строительстве деривационного туннеля и подземной ГЭС Игари в палеозойских сланцах и кварцитах были выявлены высокие сжимающие напряжения, ориентированные перпендикулярно оси антиклинали и вызвавшие интенсивную разгрузку в стенках подземных выработок. Это заставило ориентировать ось подземной камеры ГЭС перпендикулярно оси складки. В туннеле на гидроузле Манери при пересечении ядра синклинали отмечалось увеличение водопритока и обрушение стенок выработки, что вынудило на этом участке изменить направление туннеля, провести значительные дренажные и цементационные мероприятия.

Нередко приходится укреплять скальный массив, ослабленный в связи с общей или локальной складчатой дислоцированностью. При этом на практике применяют различные укрепительные мероприятия. Левобережный участок контрфорсной плотины Фарахнез Пехлеви (Иран) высотой 107 м сложен тектонически нарушенными в результате интенсивной складчатости песчаниками и кварцитами, характеризующимися модулем деформации менее 5000 МПа. При строительстве плотины здесь потребовалось удалить значительный объем слабых пород мощностью 30–40 м, провести укрепительную цементацию, а также устроить специальную дренажную систему. В примыкании арочной плотины Кариба было проведено укрепление зоны с низкими деформационными свойствами, связанными с наличием там флексурной складки, путем устройства бетонного контрфорса. Ослабленная зона в примыкании плотины Кастийон, приуроченная к гребню антиклинали, была укреплена цементацией, анкерами и специальными контрфорсами [5].

Как показывает анализ многочисленных случаев формирования оползней на участках гидротехнического строительства, основное внима-

ние необходимо обращать на обусловленную складками неблагоприятную ориентировку поверхностей напластования (особенно тонких глинистых прослоев) относительно склона. При таком неблагоприятном залегании слоистости обычно требуется укрепление скального массива.

На участке каменнонабросной плотины Ириль Эмда борт долины, сложенный верхнемеловыми глинистыми сланцами с падением слоев в сторону долины под углом около 20°, осложнен огромным оползнем, перекрывающим подножье склонов. Выполаживание склонов исключалось из-за очень большого объема земляных работ. Пятилетние изыскания позволили обосновать возможность строительства здесь плотины, подпирающей неустойчивое примыкание. Устойчивость примыкания была также повышена с помощью дренажных скважин и галерей [11].

На участке гидроузла Раггаль (Австрия) для повышения устойчивого склона, ослабленного неблагоприятно ориентированной слоистостью в связи со складкой, было применено его анкерное крепление. При строительстве плотины Гриб была обнаружена неблагоприятная за счет антиклинали ориентировка ослабленного линзовидного прослоя мергеля мощностью до 1,5 м, который способствовал образованию в борту водосбросного канала оползня объемом в несколько сотен тысяч кубических метров. Для обеспечения устойчивости откоса были применены дренаж, специальные анкеры и подпорные сооружения с опорой на другой берег [11]. На участке плотины Бикоу (Китай) наблюдался особый вид экзогенной складчатости в форме приповерхностного изгиба слоев вниз по склону под влиянием гравитационных сил. Образование трещин в местах перегиба слоев привело к формированию оползня. Для предотвращения новых оползней потребовалось интенсивное крепление отдельных участков склона.

При обосновании противофильтрационных мероприятий очень важно уточнить обусловленное складками залегание водоупорных и водонепроницаемых слоев, а также возможное наличие сильнотрещиноватых и проницаемых зон в замках антиклиналей. При этом перпендикулярная ориентировка оси складки относительно долины с крутым залеганием ее крыльев является в общем случае более благоприятной для основания плотины по сравнению с параллельным залеганием.

На участке гидроузла Шерфас, который приурочен к опрокинутой синклинали, осложненной разрывным нарушением, непосредственно в основании гравитационной плотины находятся известняки тортонского яруса, залегающие на водонепроницаемых глинистых породах гельветского яруса (рис. 19). Здесь размещение плотины и объем противофильтрационных работ целиком зависели от складчатой структуры скального массива, определяющей условия залегания водоупора. При этом в замке складки, оказавшемся более трещиноватым и закарстованным, потребовалось на левом берегу увеличить рядность цементационной завесы [11].

В основании плотины Гриб складка обусловливает неблагоприятное

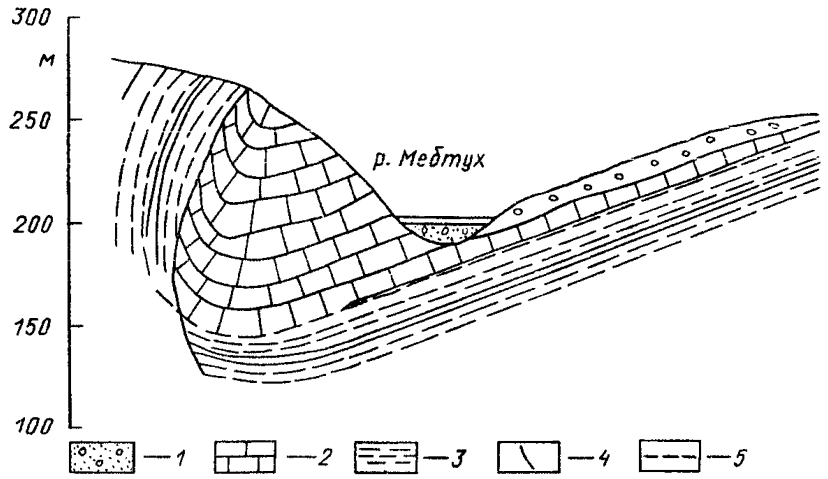

Рис. 19. Геологический разрез по оси плотины Шерфас (по Н. Н. Маслову): *1* – аллювий; *2* – известняки; *3* – глинистые породы; *4* – разрывное тектоническое нарушение; *5* – границы цементационной завесы

залегание сильнопроницаемых песчаников, способствующее фильтрации воды из водохранилища в нижний бьеф. Для предотвращения фильтрации и возможной суффозии песчаного заполнителя трещин были устроены зуб глубиной до 40 м и цементационная завеса. Специальные противофильтрационные мероприятия пришлось провести в тектонически нарушенных зонах, приуроченных к ядрам антиклинальных складок на участках плотин Кастийон, Будуа и др.

В основании гидроузла Фум-Эль-Герза сильнопроницаемые трещиноватые известняки залегают на водонепроницаемых мергелях. Размеры цементационной завесы на этом участке определялись формой синклинальной складки, ось которой совпадает с направлением долины. В случае крупных карстовых каналов возможны пути сосредоточенной фильтрации вдоль осей складок в основании плотины (Докан, Кентакки и др.). Они требуют заделки в виде бетонных пробок, сооружаемых с поверхности или подземным способом.

Развитие карста в значительной степени определяется складчатой структурой скальных массивов, сложенных известняками, поэтому изыскания надо начинать с ее изучения.

11. ИЗУЧЕНИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КЛИВАЖА

В практике изысканий и в инженерно-геологической литературе часто наблюдается некоторая недооценка кливажа: свойства скальных пород в образце и в массиве нередко определяют без учета их анизотропии, обусловленной кливажом; в инженерно-геологических мате-

риалах дается недостаточно полное описание зон кливажа, иногда не отличают кливаж от мелкой трещиноватости или от напластования, не включают кливаж в число структурных факторов, слабо анализируют связь кливажа со складками и слоистостью. Все отмеченные выше методические недостатки затрудняют правильную инженерно-геологическую оценку кливажа, исследования которого осложняются также такими его особенностями, как значительное морфологическое разнообразие, недостаточно ясные генезис и механизм образования.

При полевых описаниях кливажа рекомендуется обращать внимание на следующие вопросы:

описание зон кливажа: формы, размеров, элементов залегания, особенностей пространственного распространения относительно других структурных форм;

описание кливажа: его ориентировки, интенсивности, особенностей развития в слоях различного состава, показателей кливажа, предложенных М. А. Гончаровым (1977 г.) — средней толщины "линз кливажа", степени уплощения линз (отношение длины к толщине линзовидных пластинок);

выявление пространственных взаимоотношений кливажа со складками, слоистостью и системами трещин; определение угла между средним положением кливажа и напластованием; желательно провести детальные зарисовки обнажений поперек простирания кливажа;

описание историко-генетических особенностей кливажа, его генетических и возрастных взаимоотношений с другими структурными формами. Установление вероятной ориентировки эллипсоида деформации при формировании кливажа;

анализ влияния кливажа на инженерно-геологические свойства массива, выявление возможных недостатков скальных оснований, связанных с кливажом. При этом особое внимание должно быть уделено влиянию кливажа на сопротивление сдвигу в массиве и в образце, устойчивость строительных откосов и стенок подземных выработок, способность пород к интенсивной разгрузке, быстрому выветриванию и эрозии.

Кливаж необходимо учитывать при планировании оптимального комплекса геотехнического и геофизического опробования и для правильной интерпретации его результатов. В частности, все геомеханические исследования надо проводить с обязательной оценкой анизотропии пород, т. е. ориентировать нагрузки параллельно и перпендикулярно кливажу. Очень важно также учитывать характерную для многих кливажированных пород способность значительно изменять свои свойства, быстро разгружаться и выветриваться в результате техногенного воздействия. В этих условиях иногда приходится менять способы производства строительных работ, не допускать длительного стояния вскрытого котлована. Желательно оставлять в котловане защитный слой или применять различные защитные покрытия, удаляемые только в по-

следний момент перед бетонированием основания сооружения.

В метаморфических и особенно ультраметаморфических породах с помощью кливажа можно уточнить складчатую структуру массива, если ее трудно установить обычным способом. При расшифровке складчатой структуры массива исходят из того, что кливаж осевой плоскости обычно не параллелен слоистости на крыльях складок (кроме изоклинальных) и перпендикулярен слоистости в замке складок, а пересечение кливажа и напластования образует линейность, параллельную шарниру складки. Для установления ориентировки шарнира складки необходима статистическая обработка данных большого количества измерений линейности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Складчатая структура массива – это совокупность всех складок разного порядка, имеющихся на данном участке. Употребление термина "складчатая структура" по отношению к единичной складке не рекомендуется.

2. Главными морфологическими типами складок являются антиклинали, синклинали и флексуры. Основными элементами складок являются крылья, замки, оси, шарниры и осевые плоскости.

3. Складчатая структура обычно определяет геологическое строение слоистых толщ и в сочетании с другими факторами влияет на инженерно-геологические и гидрогеологические условия. Складчатость, определяющая ориентировку слоев, оказывает влияние на интенсивность выветривания пород и на формирование рельефа.

4. На образование складчатости влияют многие факторы: тектонические, гипергенные, литологические и магматические, из которых главными являются тектонические. Существует два основных механизма складкообразования: пластическое течение и дифференциальное скольжение.

5. Кливаж оказывает значительное воздействие на анизотропность прочностных и деформационных свойств пород. По механизму формирования кливаж принято разделять на два типа: кливаж разлома и кливаж течения. При инженерно-геологическом изучении структуры массива рекомендуется использовать термин "кливаж" для обозначения способности пород раскалываться на тонкие пластинки толщиной до 2 см.

6. Для структурного анализа и инженерно-геологической оценки скальных массивов требуется подробное описание складчатой структуры по определенной схеме. На инженерно-геологической карте необходимо показывать оси складок, их порядок, направление и углы наклона шарнира.

7. Историко-генетическое изучение складок затрудняется слож-

ностью процессов их формирования, характеризующегося длительностью и многофакторностью. Основными кинематическими типами складок являются складки поперечного и продольного изгиба.

8. Существует пространственная связь тектонических нарушений и систем мелкой трещиноватости с залеганием складок. Часто наблюдается концентрация трещин в шарнирных частях складок.

9. Изучение влияния складчатости на рельеф помогает уточнить складчатую структуру массива и восстановить последний этап ее формирования. При этом следует различать "живые" и "мертвые" складки. При изысканиях для гидротехнического строительства необходимо проводить анализ рельефа.

10. Оценка влияния складок на инженерно-геологические условия строительства гидротехнических сооружений сводится к уточнению условий залегания слоев, выявлению свойств, обусловленных определенным типом складок, уточнению напряженного состояния пород, уточнению гидрогеологических условий.

11. При обосновании проектных решений должна учитываться складчатая структура массива. Она обычно оказывает большое влияние на выбор створа и типа плотины, местоположение основных сооружений гидроузла, на способы укрепления откосов и основания, проходки подземных выработок и др.

12. Кливаж в значительной мере влияет на инженерно-геологические условия скальных массивов, так как создает анизотропность механических свойств пород, способствует их избирательному выветриванию, снижает сопротивление сдвигу и повышает сжимаемость и водопроницаемость. Поэтому при инженерно-геологических изысканиях необходимо тщательно выявлять и изучать кливаж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ажгирей Г. Д.** Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1966. 260 с.

2. **Белоусов В. В.** Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1971. 310 с.

3. **Бронгулеев В. В.** Проблема складкообразования в земной коре. М.: Недра, 1967. 290 с.

4. **Гогель Ж.** Основы тектоники. М.: Мир, 1969. 190 с.

5. **Джегер Ч.** Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. 255 с.

6. **Заруба К., Менцл В.** Инженерная геология. М.: Мир, 1979. 468 с.

7. **Кантор Б. А.** Акстафинская и Шамхорская плотины на р. Куре // Геология и плотины. 1964. Т. IV. С. 113–127.

8. **Костенко Н. П.** Развитие складчатых и разрывных деформаций в орогенном рельефе. М.: Недра, 1972. 210 с.

9. **Косыгин Ю. А.** Тектоника. М.: Недра, 1969. 310 с.

10. **Куницын П. В.** Ладжанурская плотина на р. Ладжанури // Геология и плотины. 1964. Т. IV. С. 90–112.

11. **Маслов Н. Н., Пильгунова З. В.** Плотины Северной Африки. М.: Госэнергоиздат, 1960. 136 с.

12. **Нейштадт Л. И., Пирогов И. А.** Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М.: Энергия, 1969. 248 с.

13. **Прочухан Д. П., Фрид С. А., Доманский Л. К.** Скальные основания гидротехнических сооружений. Л.: Стройиздат, 1971. 190 с.

14. **Руководство** по инженерно-геологическим изысканиям для гидротехнического строительства / Под ред. Е. С. Карпышева. М.: Энергия, 1976. 377 с.

15. **Тер-Микаелян К. Л.** Некоторые методы и результаты статистических исследований деформационных свойств скальных оснований // Тр. Гидропроекта. 1966. Сб. 14. С. 218–238.

16. **Хаин В. Е.** Общая геотектоника. М.: Недра, 1964. 310 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЕ СКАЛЬНОГО МАССИВА 5

1. Основные понятия . . . . . –
2. Инженерно-геологическое значение складчатой структуры 9
3. Некоторые особенности формирования складок 17
4. Общие сведения о кливаже и его значение 20

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ СКАЛЬНОГО МАССИВА 29

5. Полевое изучение и описание складок . . . . . –
6. Изучение историко-генетических особенностей складок 32
7. Определение взаимоотношения складок и разрывных структур 37
8. Изучение связи складок с рельефом 39
9. Изучение влияния складок на инженерно-геологические свойства скального массива 42
10. Учет складок при обосновании проектных решений 46
11. Изучение и инженерно-геологическая оценка кливажа 51

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 53

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 55

Редактор *Е. С. Карпышев*
Редактор издательства *Р. М. Ваничкина*
Художественные редакторы *Б. Н. Тумин, Т. Н. Хромова*
Технический редактор *Н. А. Минеева*

Н/К

Набор выполнен в Энергоатомиздате на Композере ИБМ-82. Подписано в печать 12.11.86. Т-19661. Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,43. Усл. кр.-отт. 3.67. Уч.-изд. л. 3.72. Тираж 600 экз. Заказ 935. Заказное. Цена 20 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
109033, Москва, Ж-33, Волочаевская ул., 40

gost.e-ecolog.ru