

УДК 623.131

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОМОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2015 г. Э. В. Калинин, Л. Л. Панасьян

*Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Ленинские горы, Москва, 119992 Россия.
E-mail: kalinin@sumail.ru; liylipan@gmail.com*

Поступила в редакцию 26.02. 2015 г.
После исправления 18.05. 2015 г.

Рассматривается опыт применения комплекса программ, основанных на аналитических и численных методах математического моделирования, разработанный для решения инженерно-геологических задач по изучению напряженно-деформированного состояния однородных и неоднородных природных массивов горных пород с неровными внешними и внутренними границами, подверженных действию разнообразных внешних сил и влиянию техногенного воздействия. Выполнены исследования напряженно-деформированного состояния оползневых склонов в различных регионах Российской Федерации, оснований крупных гидротехнических сооружений, массивов горных пород, пройденных сверхглубокими скважинами, территорий разработки углеводородного сырья с целью оценки оседания поверхности в результате откачки нефти, изучено изменение напряженного состояния массивов пород при прохождении сейсмической волны и т.д. В качестве примеров приведены основные типы геомodelей массивов горных пород, изученных при инженерно-геологических исследованиях и наиболее часто встречающихся в природе. Рассмотрен характер распределения напряжений в таких массивах, в том числе и при возможном наличии различных строительных объектов.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, неоднородный массив, численное моделирование, геомodelь, техногенное воздействие.*

Одно из основных направлений инженерной геологии при изучении массивов горных пород, находящихся под воздействием как природных, так и техногенных сил, – исследование деформаций массива и условий его разрушения. Эта задача возникает при оценке осадки сооружений, при проходке тоннелей, в районах добычи полезных ископаемых открытым способом и с помощью горных выработок, при строительстве подземных сооружений, в районах добычи углеводородного сырья, где наблюдается оседание поверхности земли, в сейсмоопасных регионах, когда в результате проявления инерционных сил при землетрясениях возникают сейсмодислокации, при изучении устойчивости склонов и провальных явлений и в других случаях.

Существенная причина большинства механических процессов – возрастание или резкое падение напряжений в массиве горных пород. Поэтому изучение изменения напряжений в породах долж-

но быть непременно этапом своевременного прогноза современных процессов. Особенно необходим такой анализ при техногенных воздействиях на массив горных пород, так как изменение напряжений при этом происходит практически мгновенно, что приводит к возникновению и развитию инженерно-геологических процессов либо сразу, либо в ближайшее время.

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) природного массива горных пород необходимо иметь подробную и качественную фактическую характеристику геологического строения исследуемого объекта с описанием наличия тектонических нарушений, условий залегания пород, их трещиноватости, обводненности и проницаемости пород, типа движения подземных вод, а также иметь сведения о физико-механических свойствах пород. Эти данные могут быть получены в процессе проведения разведочного бурения, геофизических и инженерно-геологи-

ческих работ. На основании таких материалов создается геомеханическая модель изучаемого массива, включающая сведения о его внешних и внутренних границах, данные по деформационным и прочностным свойствам слагающих его горных пород, предположения относительно действующих на этот массив внешних сил и т.д. В дальнейшем построенная геомеханическая модель используется для изучения НДС природного массива горных пород.

Исследование напряжений в массивах пород может быть осуществлено экспериментальными методами, что сопряжено со значительными трудностями, а также с помощью физического и математического моделирования. В настоящее время в связи с появлением большого количества численных методов решения задач и развитием быстродействующей вычислительной техники наиболее оперативный и предпочтительный метод изучения НДС природных массивов пород – математическое моделирование.

В 1970–1980-е гг. на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета совместно с кафедрой механики композитов механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова был разработан комплекс программ, которые в дальнейшем совершенствовались, и с их помощью исследовались НДС природных массивов горных пород. Объекты имели сложное геологическое строение, обладали разнообразной неровной внешней поверхностью и внутренними границами между литологическими разностями пород, которые характеризовались различными физико-механическими свойствами.

Кроме того, исследуемые массивы пород могут иметь зоны повышенной трещиноватости, быть осложнены тектоническими нарушениями, характеризоваться сложной гидрогеологической обстановкой, испытывать воздействие внешних и внутренних сил, обусловленных как природными, так и техногенными факторами (рис. 1).

Одна из основных особенностей массивов горных пород – неоднородность по физико-механическим свойствам слагающих их пород. Для изучения таких массивов еще в 1978 г. была разработана программа (LEVMAG), основанная на применении вариационно-разностного принципа, которая позволяет исследовать НДС объектов с любой степенью неоднородности¹. С помощью этой программы исследовалось распределение

напряжений в массиве пород Талнахского рудного узла [17], в массиве района бурения Кольской сверхглубокой скважины [20], в породах левого склона долины р. Вахш в створе строящейся Рогунской плотины [6], в складчатом обводненном массиве месторождения Шалкия [11], в массивах пород склонов хребта Псехако на Западном Кавказе [9] и в других регионах. Исследование НДС массивов горных пород выполнялось в предположении о линейной связи между напряжениями и деформациями и в условиях плоской деформации.

Так, например, распределение напряжений в околоствольном массиве пород Кольской сверхглубокой скважины представлено на рис. 2, где показаны нормальные напряжения, действующие на горизонтальных площадках [11]. При общем увеличении напряжений с глубиной в наклонно залегающих прослоях, обладающих пониженными деформационными свойствами по сравнению с перекрывающими и подстилающими их породами, вертикальные нормальные напряжения снижаются, но одновременно происходит некоторое возрастание напряжений в подстилающих прослоях на границе с ослабленными прослоями. Анализ распределения напряжений на одной и той же глубине показывает, что наклонное залегание пород приводит к возрастанию напряжений со стороны погружения и уменьшению напряжений со стороны восстания слоев.

Существенную роль в формировании НДС массивов пород играют их трещиноватость и наличие в них трещин и разломов различных уровней и порядков. Трещины, с одной стороны, являются одним из основных концентраторов напряжений, с другой – они представляют собой главные зоны общего ослабления, по которым и происходит разрушение массивов пород. Оценка НДС массивов с трещинами – сложная задача, для решения которой необходимо привлекать весь арсенал методов математического моделирования от аналитических до численных.

При изучении НДС массивов пород с трещинами могут быть применены различные модели, что определяется характером трещиноватости изучаемого массива. Большинство расчетных способов исходит из предпосылки, что исследуемый массив пород сплошной. Поэтому широкое распространение при изучении НДС трещиноватых массивов получило представление о том, что наличие трещин в массиве влияет на его деформационные свойства, и величины показателей деформируемости определяются интенсивностью трещиноватости. Наиболее приемлем этот подход в случае,

¹ Сертификат соответствия № 1493826, код ОК 005(ОКП): 40 12000, код ДН ВЭД России: 8471

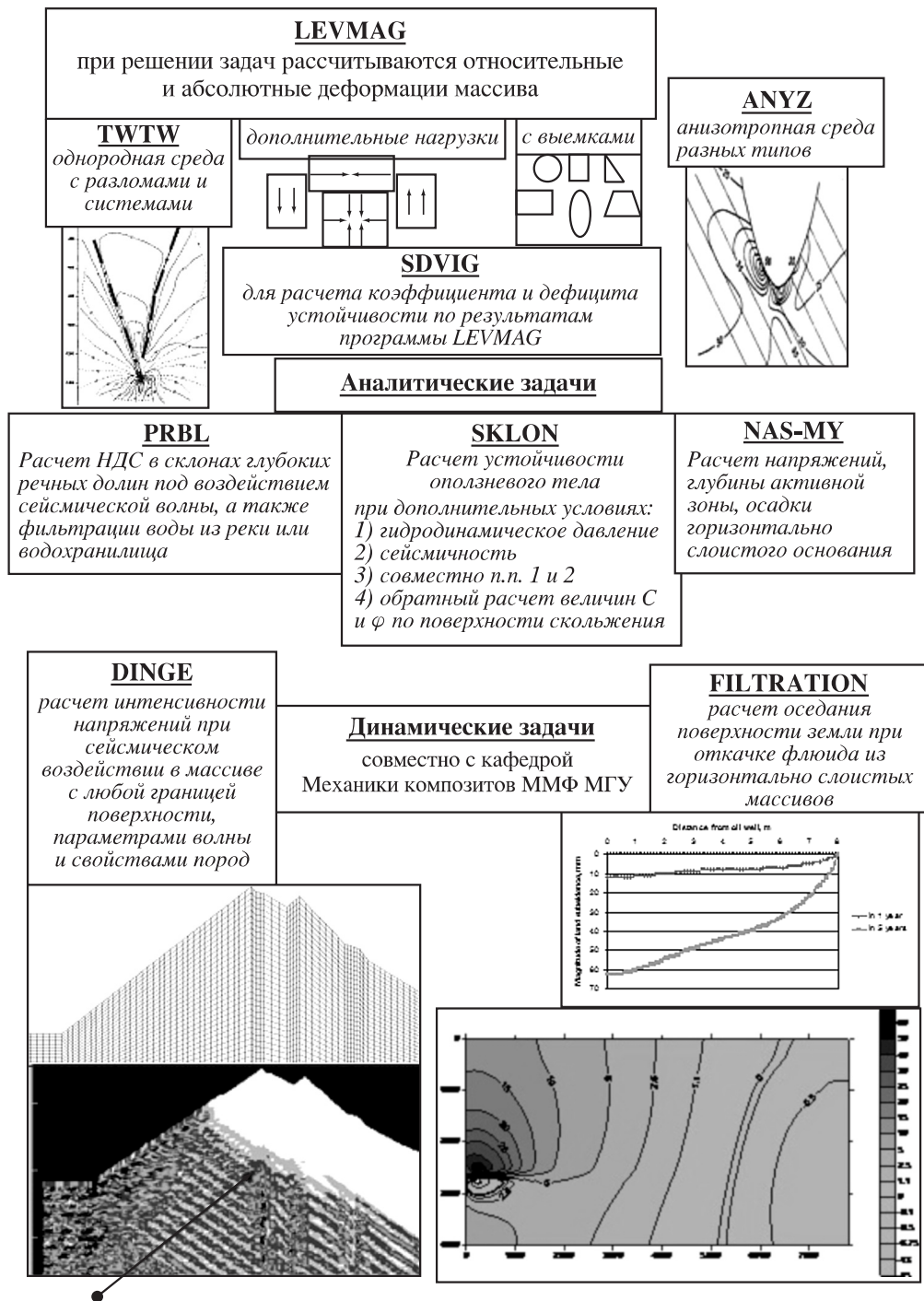


Рис. 1. Общая схема пакета программ для решения инженерно-геологических задач по изучению напряженно-деформированного состояния (НДС) однородных и неоднородных массивов горных пород с неровными внешними и внутренними границами.

когда массив разбит частыми разно ориентированными мелкими трещинами, заметно увеличивающими деформируемость массива. Моделью такого массива будет служить сплошная среда, разделенная в зависимости от степени их трещиноватости на некие части, которые будут обладать различными упругими характеристиками.

К сплошным может быть отнесен массив пород, рассеченный крупной трещиной или разломом, полностью заполненный каким-либо материалом. Тогда моделью такого массива может служить сплошная неоднородная среда, свойства которой в пределах нарушений отвечают свойствам заполнителя, а вне нарушения соответствую-

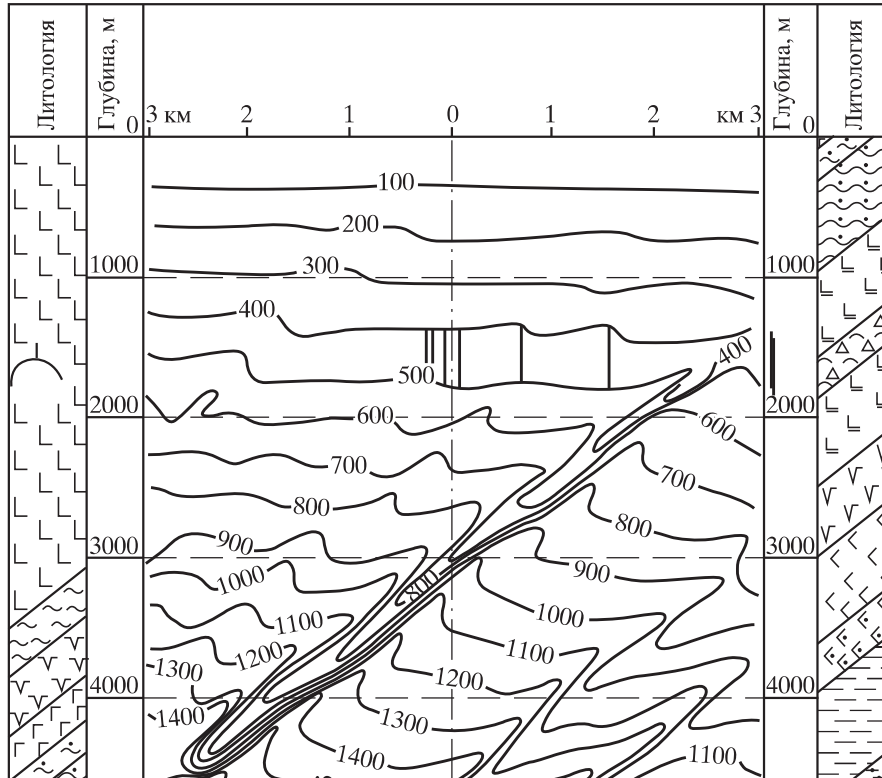


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений (кг/см^2), действующих на горизонтальных площадках, в массиве пород, пройденном Кольской сверхглубокой скважиной.

ют свойствам ненарушенного массива. Для изучения НДС таких массивов могут быть применимы все способы, с помощью которых изучается распределение напряжений в неоднородных средах.

Исследование распределения напряжений в слоистом массиве горных пород, рассеченного крупными тектоническими трещинами, было выполнено при проведении инженерно-геологических работ на Талнахском рудном узле [5, 15, 16]. На рис. 3а представлено распределение нормальных напряжений, действующих на горизонтальных площадках, в массиве пород месторождения. Видно, что в крупных тектонических нарушениях, которые заполнены материалом, имеющим существенно меньший по сравнению с вмещающими породами модуль деформации, наблюдается резкое падение напряжений, в то время как по контуру тектонических разломов происходит увеличение напряжений. В слоистой толще относительное уменьшение напряжений наблюдается в мягких прослоях, а в жестких слоях напряжения возрастают.

Распределение максимальных касательных напряжений (рис. 3б), их величина и направления осей главных напряжений на разных глубинах — важные параметры при ведении глубоких подзем-

ных разработок и оценке условий устойчивости горных выработок.

Если массив рассечен крупными незаполненными трещинами, и его нельзя рассматривать сплошным, то возникает необходимость использовать для изучения НДС массива другие модели и методы. Открытую трещину можно рассматривать, во-первых, конечной, когда ее оба конца находятся внутри массива; во-вторых — выходящей на поверхность и затухающей внутри массива; и, в-третьих — бесконечной, но открывающейся на поверхности. В первом случае моделью массива может служить область с внутренним вырезом вытянутой формы, для исследования напряжений в которой могут быть применены методы изучения НДС в сплошной среде с полостью. Во втором — это полупространство с очень узким вырезом, который открывается на поверхности и заканчивается на глубине. Наконец, в третьем случае бесконечная трещина делит полупространство на две части, изучение которых может быть выполнено раздельно.

При оценке влияния на НДС массива полых полубесконечных тектонических трещин предполагается, что на берегах трещин отсутствуют напряжения, или, если при смещении одной части

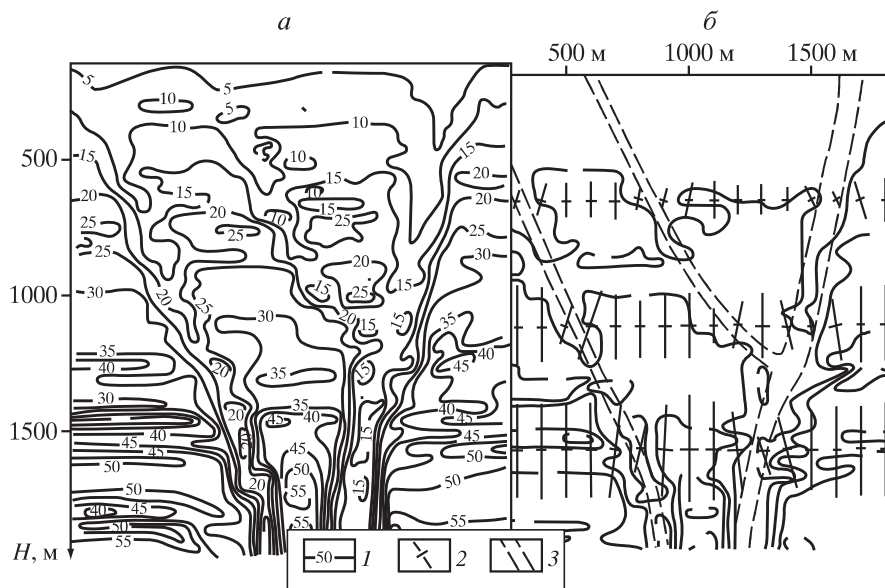


Рис. 3. Распределение гравитационных: *а* – нормальных напряжений, действующих на горизонтальных площадках в массиве пород Талнахского рудного узла, неоднородность которого обусловлена переслаиванием разных по деформационным свойствам пород и тектоническими трещинами (3); *б* – максимальных касательных напряжений (1); и направления осей главных напряжений (2) на глубинах 500, 1000, 1500 м.

массива относительно другой, их поверхности будут взаимодействовать, вдоль трещины задаются дополнительные условия, характеризующие, например, сопротивление трению или зацепление. Для изучения НДС массивов пород вблизи полых трещин применялись как аналитические, так и разнообразные численные методы. При использовании аналитических методов (рис. 1, PRBL) полубесконечная трещина может быть аппроксимирована вырезом параболической формы, для чего фокусное расстояние параболы устремляется к нулю, а собственно вырез обращается в полубесконечную узкую щель. Из численных методов могут применяться различные модификации вариационно-разностных методов, включая метод конечных элементов, но для изучения НДС трещиноватых массивов также перспективен метод граничных элементов.

Для изучения распределения напряжений в массиве пород с глубокими разнонаправленными разломами или в основании глубокой речной долины, осложненной открытым тектоническим разломом и испытывающей горизонтальное сжатие тектонической силой, был применен метод граничных элементов. Для решения поставленной задачи опубликованная программа [14], реализующая этот метод, была усовершенствована авторами путем создания добавочного модуля, учитывающего действие гравитационной силы (TWTW). В качестве примера на рис. 4 приведено распределение нормальных напряжений,

действующих на горизонтальных и вертикальных площадках, в массиве пород, осложненном двумя падающими навстречу друг другу тектоническими нарушениями.

Распределение напряжений, установленное численным методом и приведенное на рис. 4, соответствует теоретическим решениям о концентрации напряжений в концевой области трещин.

При изучении напряжений в склонах и основании глубокой долины (рис. 5) тем же методом были установлены конфигурация и мощность зоны динамического влияния тектонического разлома и величины перемещений свободной поверхности в условиях действия гравитации и тектонических сил [1].

Программа LEVMAG позволяет исследовать влияние силового нагружения на напряженное состояние массива пород. Нагрузка от сооружения моделируется силами сверху, приложение сил сбоку дает возможность оценить воздействие на перераспределение напряжений тектонической силы, а снизу – гидростатического давления. Так, например, было изучено поле напряжений в массиве пород долины р. Вахш в створе Рогунской плотины, обусловленных действием гравитационной и тектонической сил. Сопоставление данных о напряжениях, полученных с помощью математического моделирования, с результатами изучения напряжений методом разгрузки позволило оценить величину действующей тектонической

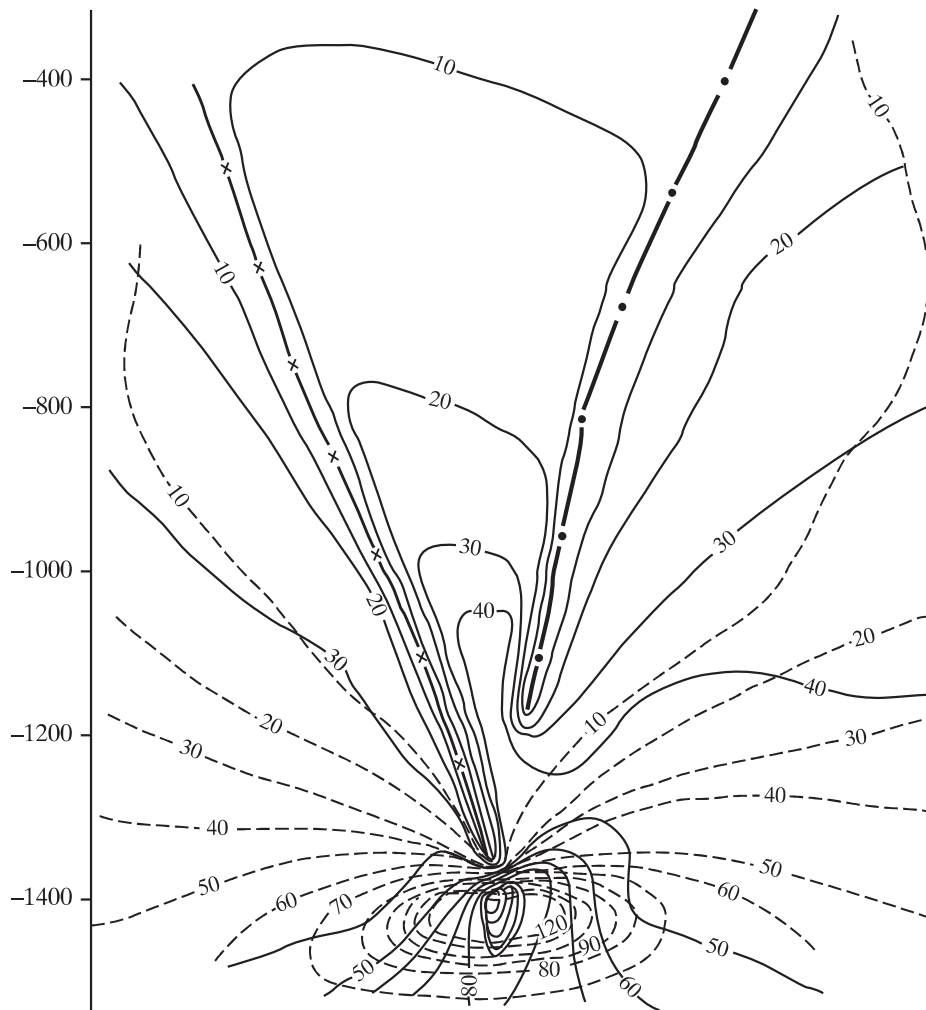


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений, действующих на горизонтальных (σ_y – сплошная линия) и вертикальных (σ_x – пунктир) площадках, в массиве с трещинами, сходящимися на глубине.

силы [6]. Аналогичная задача по сопоставлению решения численным методом и измеренным напряжениям в выработках в свое время была решена и для Норильского рудного узла [5].

Сдвиги земной коры вдоль глубинных разломов, которые наблюдаются, например, по разлому Сан-Андреас в Калифорнии или по Таласо-Ферганскому разлому в Тянь-Шане, неизбежно приводят к возникновению в перекрывающих отложениях напряжений и деформаций. Для определения их параметров было использовано численное решение трехмерной задачи в отсутствие объемной силы [19] для однородной упругой модели массива пород, представленного в виде куба осадочного чехла, залегающего на жестком основании (кристаллическом фундаменте), осложненного глубинным вертикальным разломом, по которому произошло горизонтальное смещение (рис. 6).

Наибольший интерес вызывают касательные напряжения, которые возникают на площадках параллельных сдвигу, причем напряжения на вертикальных площадках почти в 2 раза больше, чем на горизонтальных, а максимальные значения касательных напряжений фиксируются вблизи линии сдвига [8]. Точно установить положение площадок, по которым возможен сдвиг в пределах выделенного куба, можно в том случае, если будут известны строение, физико-механические свойства и мощность верхнего слоя, а также высказаны предположения о величине смещения по разрезу в расположенном ниже основании.

Если в массиве горных пород присутствуют полости естественного или искусственного происхождения (карстовые пустоты, тоннели, горные выработки и т.п.), то такие массивы можно рассматривать в качестве неоднородных по деформационным свойствам сред, и для изучения их НДС

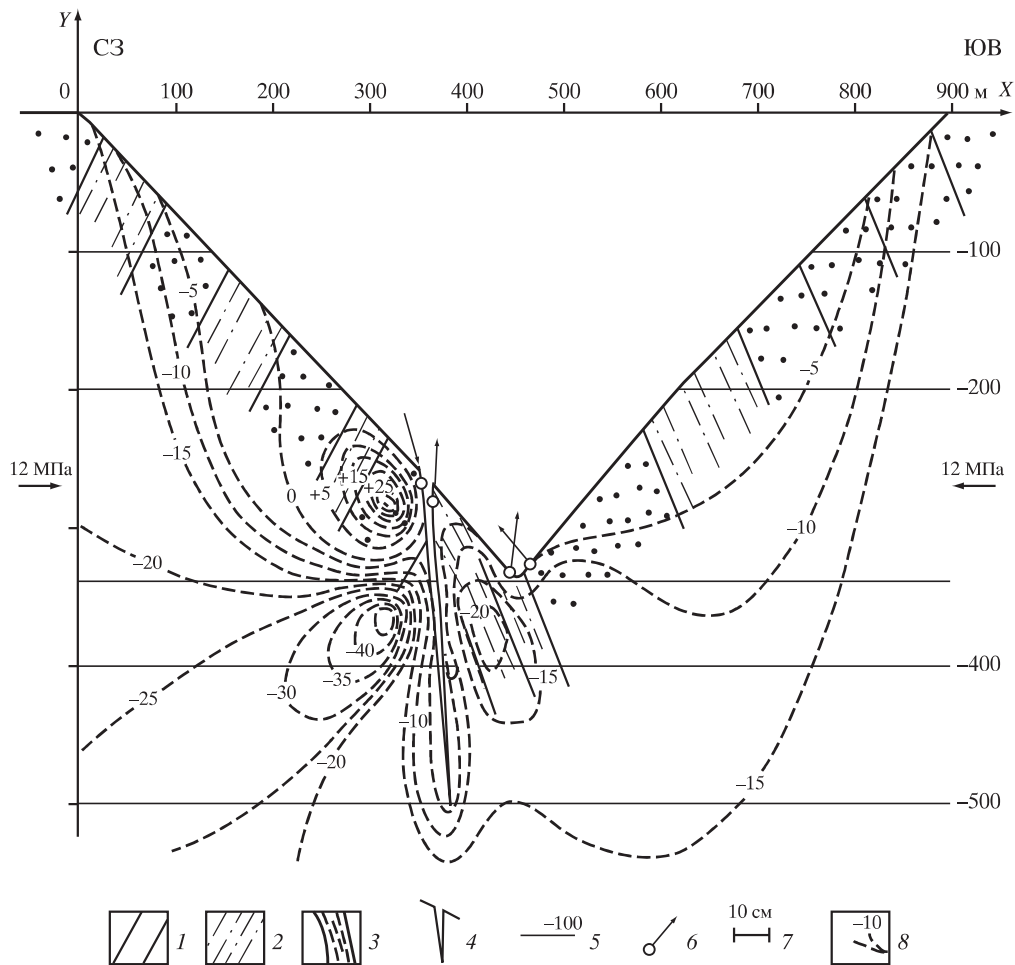


Рис. 5. Распределение горизонтальных напряжений и перемещения в долине, осложненной разрывной тектонической структурой: 1 – песчаники, 2 – алевролиты, 3 – аргиллиты, 4 – разрывная тектоническая структура, 5 – глубины, на которых определялись напряжения, 6 – точки земной поверхности и векторы их перемещения, 7 – масштаб перемещений, 8 – изолинии горизонтальных напряжений, МПа.

возможно применение программы LEVMAG. В этом случае на тех участках массива, где расположены полости, задаются нулевые значения деформационных свойств. Например, с помощью вариационно-разностного метода в левобережном склоне долины р. Вахш на участке строительства Рогунской плотины было изучено перераспределение напряжений в массиве пород в результате сооружения в нем очень крупной выработки для машинного зала проектируемой ГЭС (рис. 7).

С помощью программы LEVMAG было исследовано и напряженное состояние покровной толщи над карстовой полостью [4]. Концентрация максимальных касательных напряжений наблюдалась над угловыми точками полости (рис. 8), т.е. там, где возрастают как вертикальные, так и горизонтальные напряжения.

Большую роль в распределении напряжений играет анизотропия деформационных свойств

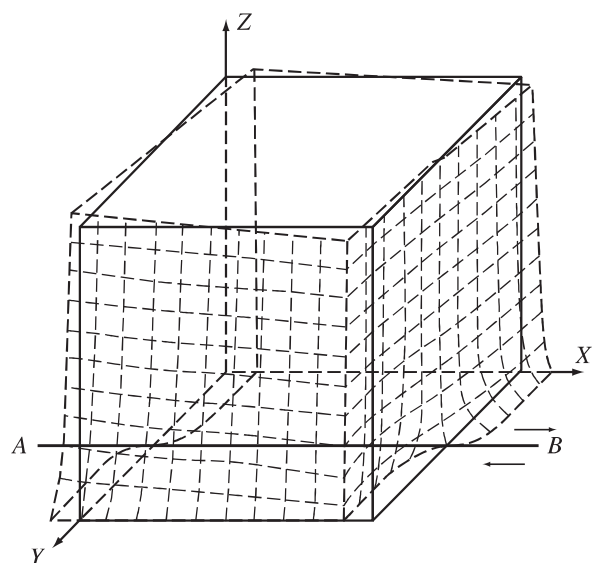


Рис. 6. Перемещения узловых точек куба при сдвиге основания относительно линии AB.

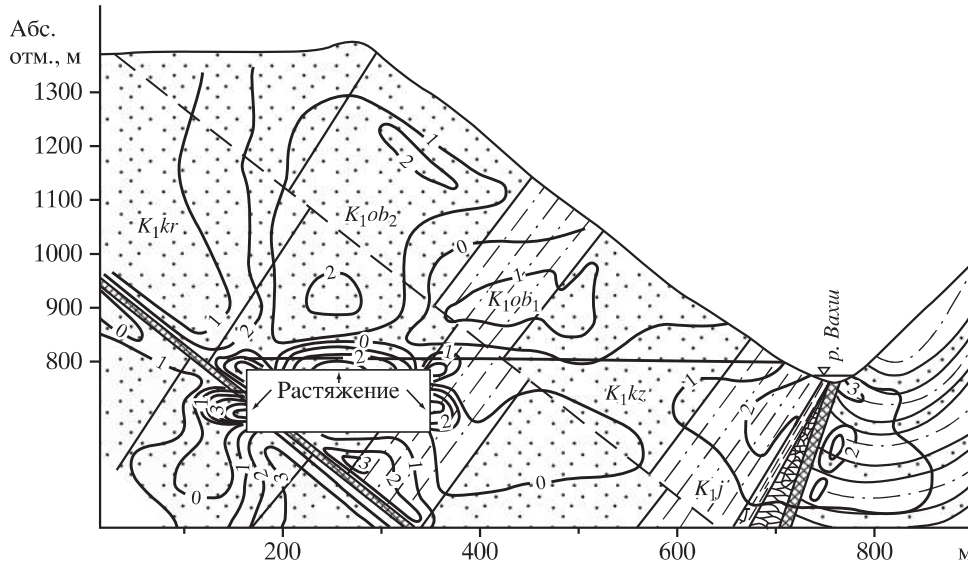


Рис. 7. Перераспределение горизонтальных напряжений в левом склоне долины р. Вахши при создании подземной полости.

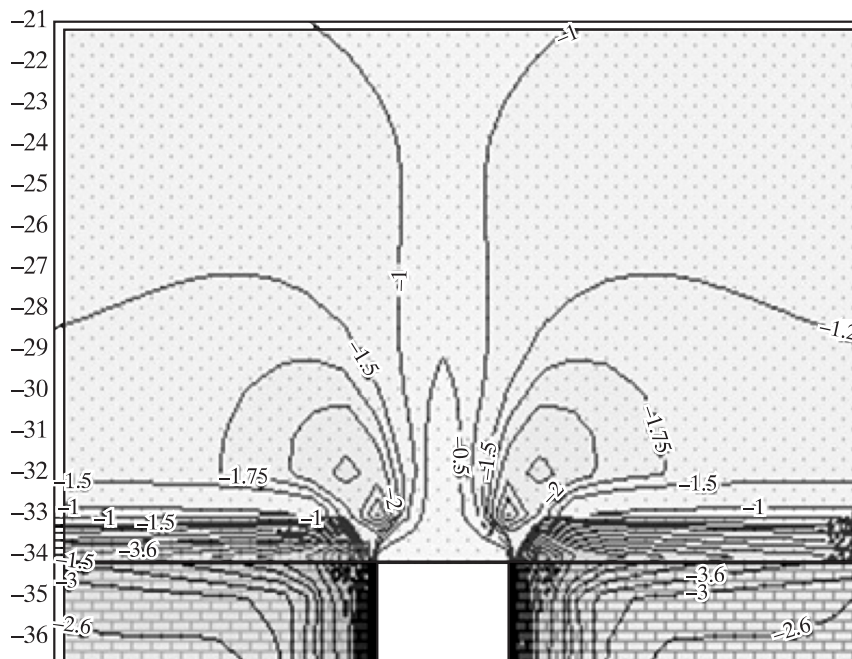


Рис. 8. Распределение максимальных касательных напряжений (τ_{\max} , МПа) в условиях двухслойной среды с полостью в основании.

массивов горных пород, которая может быть обусловлена различными причинами. Анизотропия деформационных свойств проявляется в тонкослоистых моноклинально залегающих толщах осадочных пород, к анизотропным относятся метаморфические породы, в которых имеется выдержанная в определенном направлении сланцеватость, сплошная анизотропная среда характерна для кристаллических массивов пород, рассеченных многочисленными тонкими протяженными

трещинами одного направления. В этих случаях упругие свойства массива вдоль и поперек слоистости, сланцеватости или трещиноватости будут различными, и для изучения его НДС могут быть применены модификации методов, использующиеся для изучения анизотропных сред. Если массив горных пород сложен часто переслаивающимися моноклинально залегающими слоями, отличающимися деформационными свойствами, но переслаивание слоев характеризуется неко-

торой периодичностью, то в этом случае можно применить метод осреднения [18]. С помощью этого метода задачу неоднородной теории упругости можно свести к задаче, когда среда является анизотропной. Для изучения распределения напряжений в анизотропных породах создана программа (ANYZ), основанная на использовании численного метода, разработанного на кафедре механики композитов [12]. Эта программа была применена для изучения влияния залегания слоистых массивов на распределение напряжений в породах склонов (рис. 9).

В результате сотрудничества кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета с кафедрой механики композитов механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в 1994 г. разработаны уникальные программы (DINGE), позволяющие следить во времени за смещением зон концентрации интенсивности напряжений, возникающих в горных породах склонов при распространении волн растяжения-сжатия, обусловленных землетрясением [13].

При Гиссарском землетрясении (1989 г.) на северном склоне плато Уртабоз образовались сейсмодислокации и произошли оползневые смещения [3]. Применение математического моделирования позволило выявить зоны концентрации напряжений, которые возникли при выходе распространяющихся при землетрясении сейсмических волн на поверхность склона, и установить направление и их смещение во времени (рис. 10). При этом были обнаружены зоны растягивающих напряжений вблизи бровки склона, что вероятно предопределило образование трещин закола и стало причиной развития оползневого процесса [9].

С помощью аналогичного математического аппарата было изучено изменение напряженно-



Рис. 9. Распределение напряжений (МПа) в склонах долины, заложенной в наклонно залегающем анизотропном массиве (угол наклона слоев 45°).

го состояния пород склонов долины р. Мзымта в районе строительства олимпийских объектов при прохождении сейсмических волн [22, 24]. В результате расчета установлены закономерности формирования и перемещения зон концентрации интенсивности напряжений вдоль поверхности склонов в зависимости от их крутизны и направления распространения волн (рис. 11).

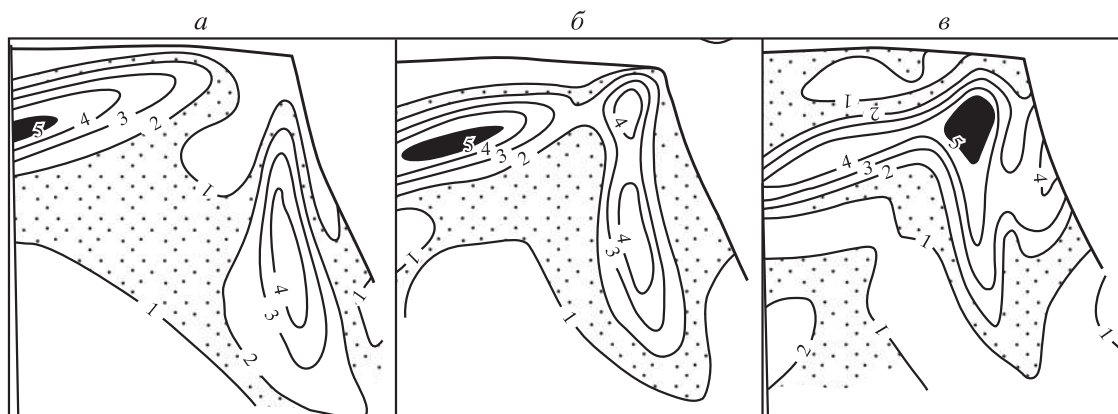


Рис. 10. Этапы (а, б, в) перемещения зон концентрации напряжений вдоль склона при распространении сейсмической волны.

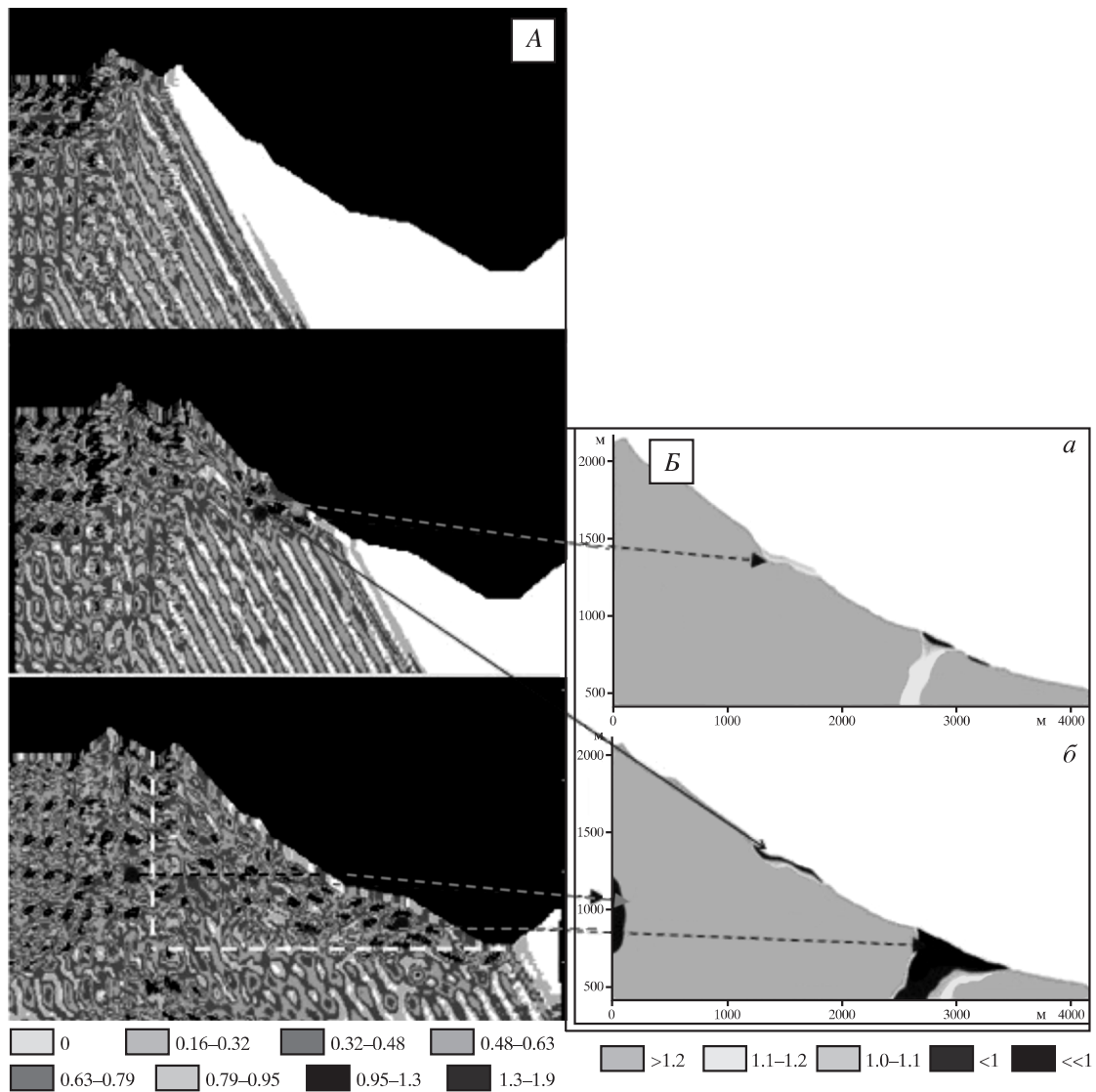


Рис. 11. *А* – перемещение зон концентрации интенсивности напряжений (МПа) в породах склона хр. Аибга при прохождении сейсмической волны сжатия-растяжения, распространяющейся под углом 40° к горизонту. *Б* – распределение коэффициента устойчивости в породах части (пунктир) этого склона: *а* – без влияния сейсмичности, *б* – с сейсмическим воздействием интенсивностью 9 баллов.

Сравнение рассчитанных величин напряжений и прочностных характеристик пород позволило провести оценку устойчивости рассматриваемого склона. Анализ напряженного состояния и устойчивости склона показывает, что динамическое решение задачи о влиянии сейсмической волны, можно достаточно уверенно использовать при прогнозе появления зон неустойчивого состояния пород склона. Это позволит оперативно и правильно организовать мониторинг, а также выбрать участки склона для наиболее безопасного освоения.

Для изучения деформирования многослойных горизонтально залегающих толщ при откачке флюидов используется теоретическая модель

М. Био, для реализации которой разработан современный комплекс программ (FILTRATION), позволяющий оценивать изменение давлений при откачке нефти и определять развитие оседания поверхности земли во времени [7, 23]. На основе теории пороупругости Био разработаны три модели для исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива пород в процессе извлечения флюида:

1. Осесимметричная модель может быть применена для исследования деформирования толщ горных пород при разработке нефтяных месторождений округлой формы в плане, например, оценки оседания на ряде нефтяных месторождений Западной Сибири и других регионов (рис. 12).

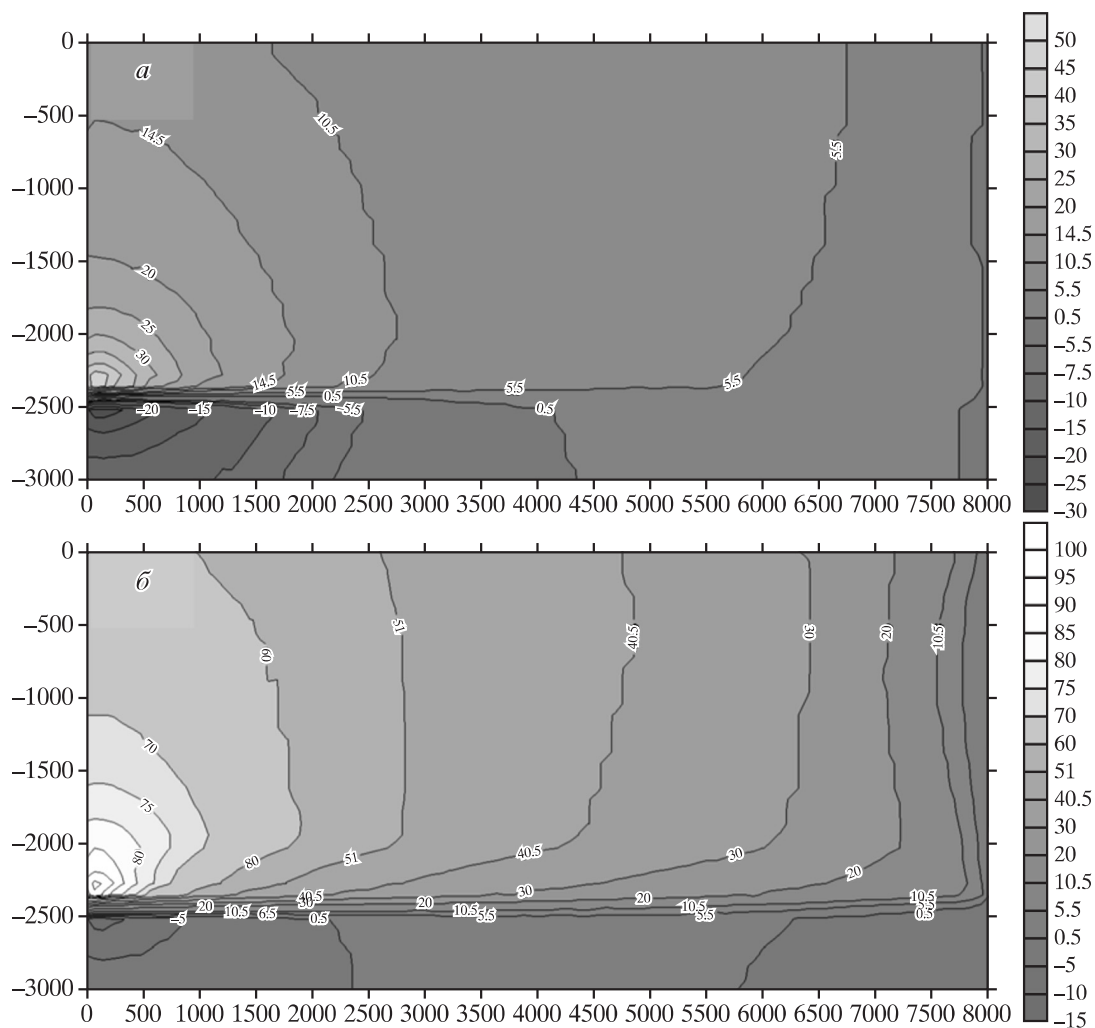


Рис. 12. Вертикальные перемещения (мм) в скелете пород через: *а* – 1 год и *б* – 5 лет, после начала откачки (нефтяное месторождение в Западной Сибири).

2. Трехмерная модель позволяет изучать влияние откачки из нескольких скважин на изменение порового давления и деформаций в массивах пород неоднородного строения.

3. Комбинированная модель (плоская – для расчета изменения давления в эксплуатируемом слое (упругий режим фильтрации), и трехмерная – для последующего расчета деформаций и напряжений в массиве) позволяет исследовать деформации многослойных объектов при длительных отборах флюида.

Для изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в предположении, что они однородны и изотропны, возможно применение аналитических способов (PRBL). С помощью метода комплексных потенциалов Колосова–Мухелишвили было изучено распределение напряжений в породах крутых склонов каньонобразной долины р. Нарын в створе Ток-

тогульской ГЭС [2]. Были выявлены основные закономерности распределения различных компонент напряжений в породах вблизи глубокой речной долины. Так, например, концентрация касательных напряжений приурочена к основанию склона, а максимальные значения горизонтальных и максимальных касательных напряжений наблюдаются в днище долины (рис. 13). В результате расчета, выполненного тем же аналитическим методом, было установлено изменение напряжений в массиве пород в окрестности долины под влиянием заполнения водохранилища глубиной 200 м [21].

Изучение распределения напряжений в полуплоскости, нагруженной прямоугольным штампом, с последующим определением глубины активной зоны и величины деформации слоистого основания осуществляется аналитическим методом с помощью программы (NAS-MY).

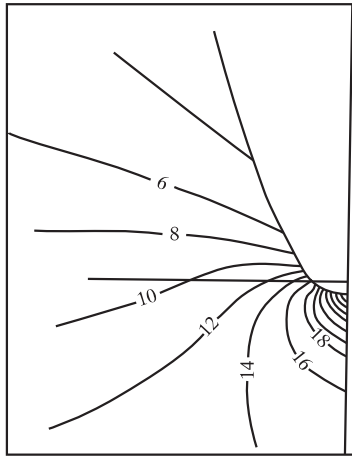


Рис. 13. Распределение нормальных напряжений (МПа) на вертикальных площадках в склонах и основании глубокой долины.

Сведения о распределении напряжений в массиве пород позволяют оценить возможность нарушения его устойчивости путем сопоставления действующих в массиве напряжений с прочностными характеристиками пород. Сравнение производится на основании коэффициентов, представляющих собой отношение предельно допустимого касательного напряжения к действующему в данной точке [10] и вычисляемых по программе SDVIG. Таким образом, может быть установлена, например, поверхность смещения оползневой блока, как зона с коэффициентами запаса прочности меньшими единицы (рис. 15). В случае, когда определена расчетом или известна поверхность, по которой возможно смещение оползневой тела, по одной из программ (SKLON) может быть вычислен коэффициент запаса его устойчивости с учетом воздействия подземных вод и сейсмичности и определено распределение внутриоползневого давления.

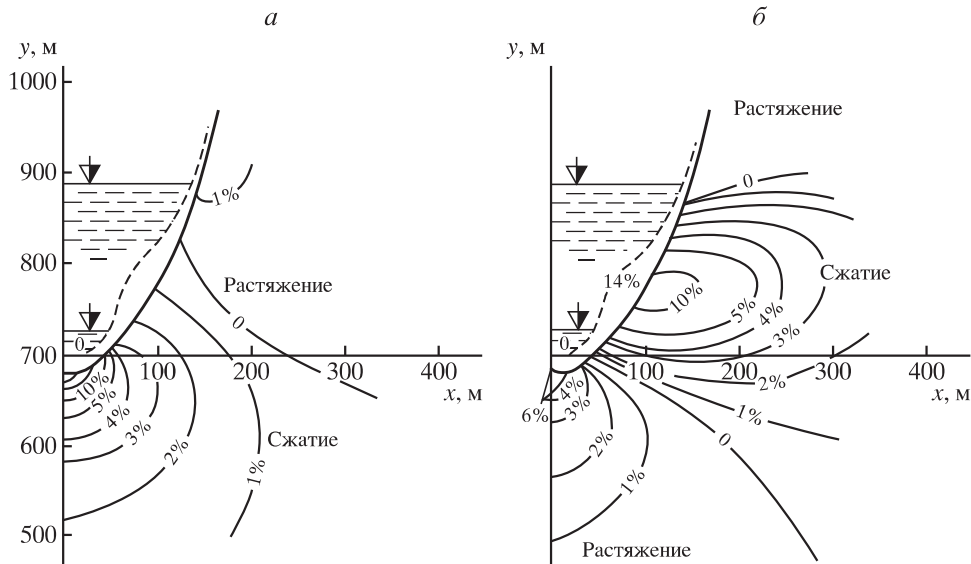


Рис. 14. Изменение нормальных напряжений на горизонтальных (а) и вертикальных (б) площадках в бортах и основании глубокой долины, выраженное в процентах к напряжениям, которые наблюдались до заполнения водохранилища.

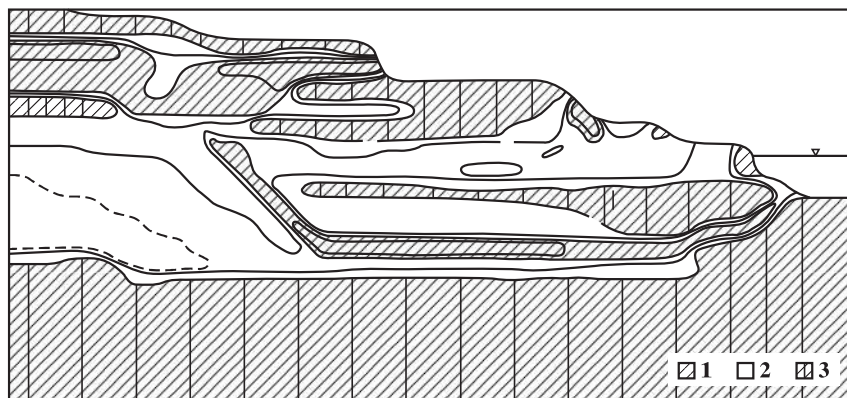


Рис. 15. Распределение коэффициента запаса прочности в массиве склона долины р. Москва. Зоны с коэффициентом запаса (k): 1 – < 1, 2 – 1–2, 3 – > 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт применения математического моделирования для расчетов напряженного состояния неоднородных массивов горных пород показывает, что достаточно трудно создать полностью универсальную программу, и для решения каждого возникающего вопроса следует использовать наиболее подходящий для этого вариант.

На распределение напряжений в массиве горных пород воздействует множество природных и техногенных факторов, поэтому более рационально оценивать влияние каждого фактора в отдельности, условно “наращивая” их воздействие в процессе расчетов, для чего также необходимо создавать собственные оригинальные программы.

Разработанные на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова программные модули могут быть применены для решения научных и практических вопросов и в педагогическом процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барыкина О.С., Калинин Э.В. Зона динамического влияния разлома как отражение основных разрывных деформаций массива пород // Современные проблемы инженерной геодинамики: Тр. Юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рожд. проф. Г.С. Золотарева. М.: Изд-во МГУ, 2014. С. 29–34.
2. Гольдштейн Р.В., Калинин Э.В. Опыт применения аналитического метода для оценки напряженного состояния массива горных пород в бортах и основании глубоких речных долин // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геолог. 1969. № 5. С. 54–65.
3. Гулакян К.А., Золотарев Г.С., Зеркаль О.В., Осюк В.А. Формирование сейсмогенных оползней в лессах плато Уртабоз (Таджикистан) // Геоэкология. 1994. № 6. С. 80–90.
4. Калинин Э.В. Напряженное состояние покровной толщи над карстовой полостью // Современные проблемы инженерной геодинамики: Тр. Юбилейной конф., посв. 100-летию со дня рождения проф. Г.С. Золотарева. М.: Изд-во МГУ, 2014. С. 59–64.
5. Калинин Э.В., Ковалко В.А., Могилевцев В.А., Панасьян Л.Л., Сим Л.А., Широков В.Н. Комплексное изучение напряженного состояния массивов горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геолог. 1995. № 2. С. 75–89.
6. Калинин Э.В., Мамаев Ю.А., Степанов В.Я. Напряженное состояние массива пород склона в районе Рогунской плотины и опыт оценки тектонических сил // Матер. Всес. шк. семинара “Измерение напряжений и их приложение в прогнозе землетрясений”. Апатиты: КФ АН СССР, 1982.
7. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Артамонова Н.Б. Методика исследований при оценке инженерно-геологических условий нефтяных и газовых месторождений // Инж. геология. 2006. № 6. С. 51–57.
8. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Гаджиев М. Г. Напряженно-деформированное состояние массива пород при сдвиге в подстилающих отложениях // Инж. геология. 1987. № 3. С. 64–68.
9. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Зеркаль О.В. Изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при прохождении сейсмических волн // Геоэкология. 2004. № 3. С. 265–272.
10. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Тимофеев Е.М. Новый подход к расчету устойчивости оползневых склонов // Вестн. МГУ. Сер.4. Геолог. 2008. № 1. С. 52–59.
11. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Широков В.Н., Артамонова Н.Б., Фоменко И.К. Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах. М.: Изд-во МГУ, 2003. 262 с.
12. Калинин Э.В., Шешенин С.В. Напряженное состояние анизотропных массивов горных пород // Инж. геология. 1991. № 1. С. 35–43.
13. Калинин Э.В., Шешенин С.В., Бужков М.И. Изменение напряжённо-деформированного состояния пород, слагающих склоны долин, при сейсмическом воздействии // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геолог. 1994. № 6. С. 43–48.
14. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. Пер. с англ. М.: МИР, 1987. 328 с.
15. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса. М.: ВНИИГеоинформсистем, 1987. 116 с.
16. Панасьян Л.Л. Распределение напряжений в неоднородных массивах горных пород // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М.: Изд-во МГУ, 1983. Вып. VI. С. 277–286.
17. Панасьян Л.Л., Голодковская Г.А. Исследование структуры поля напряжений с помощью расчетных методов. М.: Гидропроект, 1979. С. 45–56.
18. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1995. 366 с.
19. Победря Б.Е., Шешенин С.В. Некоторые задачи о равновесии упругого параллелепипеда // Изв. АН СССР. МТТ. 1981. № 1. С. 74–78.
20. Фоменко И.К., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л. Оценка поля напряжений в окрестности Кольской сверхглубокой скважины // Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глу-

- бины 12261 м.” МПГК-408. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. С. 165–167.
21. *Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г.* Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высш. шк., 1981. 317 с.
 22. *Kalinin E.V., Panasiyan L.L., Zerkal O.V.* The Seismic Wave Effect in the Slope Stability. // Second Int. Conf. on Environmental Management (ICEM2). Australia, 1998. P. 1065–1071.
 23. *Kalinin E.V., Sheshenin S.V., Artamonova N.B., Kiselev F.* Numerical investigations of the influence of fluid extraction upon the stress state of rock masses // Engineering Geology and the Environment. Rotterdam Balkema, 1997. P. 725–728.
 24. *Zerkal O.V., Kalinin E.V., Panasyan L.L.* The Formation and Distribution of Stress Concentration Zones in Heterogeneous Rock Masses with Slopes // Engineering Geology for Society and Territory: Proc. of the XII Int. IAEG Congress. V. 2. Springer International Publishing Heidelberg-New York-Dordrecht-London. 2014. P. 1251–1254.
- #### REFERENCES
1. Barykina, O.S., and Kalinin, E.V. [Zone of fault dynamic impact as a reflection of main rupture deformations in the rock massif]. *Trudy yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu prof. G.S.Zolotareva “Sovremennye problemy inzhenernoi geodynamiki”* [Proc. Jubilee Conf. in comm. centennial anniversary of Prof. G.S.Zolotarev “Modern Problems in Engineering Geomechanics]. Moscow, MGU, 2014, pp. 29–34. (in Russian).
 2. Gol’dshstein, R.V., and Kalinin, E.V. *Opyt primeneniya analyticheskogo metoda dlya otsenki napryazhennogo sostoyaniya massiva gornyykh porod v bortakh i osnovanii glubokikh rechnyykh dolin* [Experience in applying the analytical method for assessing the stress state of rock massif in the slopes and bottom of deep river valleys]. *Vestnik MGU, ser. Geolog.*, 1969, no. 5, pp. 54–65. (in Russian).
 3. Gulakyan, K.A., Zolotarev, G.S., Zerkal’ O.V., and Osiyuk, V.A. *Formirovanie seismogennykh opolznei v lessakh plato Urtaboz (Tadzhikistan)* [Formation of seismogenic landslides in loess at the Urtaboz plateau (Tadjikistan)]. *Geoekologiya*, 1994, no. 6, pp. 80–90. (in Russian).
 4. Kalinin, E.V. [Stress state of mantle cover above the karst cavity]. *Trudy yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu prof. G.S. Zolotareva “Sovremennye problemy inzhenernoy geodynamiki”* [Proc. Jubilee Conf. in commemoration centennial anniversary of Prof. G.S. Zolotarev “Modern Problems in Engineering Geomechanics]. Moscow, MGU, 2014, pp. 59–64. (in Russian).
 5. Kalinin, E.V., Kovalko, V.A., Mogilevtsev, V.A., Panas’yan, L.L., Sim, L.A., and Shirokov, V.N. *Kompleksnoe izuchenie napryazhennogo sostoyaniya massivov gornyykh porod pri razvedke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Complex study of stress state of rock massifs upon survey of mineral deposits]. *Vestnik MGU, ser. Geolog.*, 1995, no. 2., pp. 75–89. (in Russian).
 6. Kalinin, E.V., Mamaev Yu.A., and Stepanov, V.Ya. [Stress state of slope rock massif around the Rogun dam and the experience in assessing tectonic forces]. *Mater. Vses. shk. seminar “Izmerenie napryazhenii i ikh prilozhenie v prognoze zemletryaseni”* [Proc. All-Union Seminar “Stress measurement and its application to earthquake prediction]. Apatity, Kola Division AS USSR, 1982. (in Russian).
 7. Kalinin, E.V., Panas’yan, L.L., and Artamonova, N.B. *Metodika issledovani pri otsenke inzhenerno-geologicheskikh uslovii neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* [Research methods in assessing engineering geological conditions of oil and gas deposits]. *Inzhenernaya geologiya*, 2006, no. 4, pp. 51–57. (in Russian).
 8. Kalinin, E.V., Panas’yan, L.L., and Gadzhiev, M.G. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massiva porod pri sdvige v podstilayushchikh otlozheniyakh* [Stress-strain state of rock massif on shear in underlying deposits]. *Inzhenernaya geologiya*, 1987, no. 3, pp. 64–68. (in Russian).
 9. Kalinin, E.V., Panas’yan, L.L., and Zerkal’, O.V. *Izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massivov gornyykh porod pri prokhozhenii seismicheskikh voln* [Change in stress-strain state of rock massifs upon passing seismic waves]. *Geoekologiya*, 2004, no. 3, pp. 265–272. (in Russian).
 10. Kalinin, E.V., Panas’yan, L.L., and Timofeev, E.M. *Novyi podkhod k raschetu ustoichivosti opolznevykh sklonov* [A new approach to the calculation of landslide slope stability] *Vestnik MGU, ser. Geolog.*, 2008, no.1, pp. 52–59. (in Russian).
 11. Kalinin, E.V., Panas’yan, L.L., Shirokov, V.N., Artamonova, N.B., and Fomenko, I.K. *Modelirovanie polei napryazhenii v inzhenerno-geologicheskikh massivakh* [Modeling of stress fields in engineering geological massifs]. Moscow, MGU, 2003, 262 p. (in Russian).
 12. Kalinin, E.V., and Sheshenin, S.V. *Napryazhennoe sostoyanie anizotropnykh massivov gornyykh porod* [Stress state of anisotropic rock massifs]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 1, pp. 35–43. (in Russian).
 13. Kalinin, E.V., Sheshenin, S.V., and Buyakov, M.I. *Izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porod, slagayushchikh sklony dolin pri seismicheskom vozdeistvii* [Changes in stress-strain state of rocks in valley slopes on seismic impact]. *Vestnik MGU, ser. Geolog.*, 1994, no. 6, pp. 43–48. (in Russian).
 14. Crouch, S. L., and Starfield, A. M. *Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela* [Boundary

- element methods in solid mechanics]. Translated from English. Moscow, Mir, 1987, 328 p. (in Russian).
15. *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornykh porod na razlichnykh stadiyakh geologorazvedochnogo protsessa* [Methodical recommendations for the study of stress-strain state of rocks at different geological prospecting stages]. Moscow, VNIIGeoinformsistem, 1987, 116 p. (in Russian).
 16. Panas'yan, L.L. *Raspreделение napryazhenii v neodnorodnykh massivakh gornykh porod* [Stress distribution in heterogeneous rock massifs]. *Voprosy inzhenernoi geologii i gruntovedeniya*, Moscow, MGU, 1983, vyp. VI, pp. 277-286. (in Russian).
 17. Panas'yan, L.L., and Golodkovskaya, G.A. *Issledovanie struktury polya napryazhenii s pomosh'yu raschetnykh metodov* [Investigation of stress field structure with calculation methods]. Moscow, Gidroproekt, 1979, pp. 45–56. (in Russian).
 18. Pobedrya, B.E. *Chislennye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Numerical methods in the elasticity and plasticity theory]. Moscow, MGU, 1995, 366 pp. (in Russian).
 19. Pobedrya, B.E., Sheshenin, S.V. *Nekotorye zadachi o ravnovesii uprugogo paralelepipedov* [Some problems in elastic parallelepiped equilibrium]. *Izv. AN SSSR. MTT*, 1981, no. 1, pp. 74–78. (in Russian).
 20. Fomenko, I.K., Kalinin, E.V., and Panas'yan, L.L. [Assessment of stress field in the vicinity of Kola superdeep borehole]. *Rezul'taty izucheniya glubinnogo veshchestva i fizicheskikh protsessov v razreze Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny do glubiny 12261 m* [Results of the study of depth substance and physical processes in the cross-section of Kola superdeep borehole to a depth of 12261 m]. MPGK-408. Apatity, KNTs RAN, 2000, pp. 165–167. (in Russian).
 21. Tsytoovich, N.A., and Ter-Martirosyan, Z.G. *Osnovy prikladnoi geomekhaniki v stroitel'stve* [Fundamentals of applied geomechanics in construction]. Moscow, Vysshaya shkola, 1981, 317 p. (in Russian).
 22. Kalinin, E.V., Panasiyan, L.L., and Zerkal, O.V. The Seismic Wave Effect in the Slope Stability. *Second Int. Conf. on Environmental Management (ICEM2)*. Australia, 1998. Pp. 1065–1071.
 23. Kalinin, E.V., Sheshenin, S.V., Artamonova, N.B., and Kiselev, F. Numerical investigations of the influence of fluid extraction upon the stress state of rock masses. *Engineering Geology and the Environment*. Rotterdam, Balkema, 1997, pp. 725–728.
 24. Zerkal, O.V., Kalinin, E.V., and Panasyan, L.L. The formation and distribution of stress concentration zones in heterogeneous rock masses with slopes. *Engineering Geology for Society and Territory: Proc. of the XII Int. IAEG Congress*. Vol. 2. Heidelberg-New York-Dordrecht-London., Springer International Publishing, 2014, pp. 1251–1254.

EXPERIENCE IN USING GEOMODELS FOR THE STUDY OF STRESS-DEFORMED STATE IN ROCK MASSIFS USING MATHEMATICAL MODELING

E. V. Kalinin, L. L. Panas'yan

*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory, bld. 1, Moscow, 119992 Russia. E-mail: kalinin@sumail.ru*

The paper discusses the experience in applying the software complex based on the analytical and numerical modeling methods for solving engineering geological problems in the study of stress-deformed state (SDS) in isotropic and anisotropic rock massifs with irregular outer and inner boundaries and affected by various external forces including those of human-induced origin. These problems arise upon estimating building settling, cutting tunnels, in the regions of mineral resources development by open-cut and shaft methods, upon underground construction, in the areas of hydrocarbons extraction, in seismic regions, upon investigation of slope stability and collapses, etc.

In 1980s, an original program complex for the SDS study in natural rock massifs was developed and further constantly upgraded at the Department of Engineering and Ecological Geology (Geological Faculty, Moscow State University) in cooperation with the Department of Composite Mechanics (Mechanical and Mathematical Faculty, Moscow State University).

LEVMAГ program was elaborated for investigating SDS in natural rock massifs with any degree of anisotropy. It is based on the variation-difference principle (assuming a linear relation between stresses and deformations upon a flat deformation). This program was applied for the study of stress distribution in the hard rock massifs at the Talnakh ore deposit; at the Kola super-deep borehole; on the left slope of the Vakhsh River valley in the alignment of Rogun Dam under construction; in the folded water saturated massif of the Shalkiya deposit; on the slopes of the Psekhako Ridge (the Northern Caucasus), and in other

regions. The same program was used for assessing the rock massifs complicated by cavities of natural or human-made origin, i.e., karst cavities, underground tunnels, shafts, etc. For example, stress redistribution due to the excavation of a very large subsurface operating hall for the Rogun hydroelectric power station was investigated in the rock massif on the left slope of the Vakhsh River valley. In a similar way, stress distribution in a rock massif around karst cavities or in faulted massifs were analyzed.

If stretching fractures open at the surface and attenuating at the depth are traced in a rock massif, the method of boundary elements was applied (TWTW program upgraded with an additional block accounting for gravity). Stress distribution was studied in the rock massif complicated by a graben or a large open fracture, e.g., in the section of the Rogun Dam under construction, where the rock massif undergoes tectonic compression.

In mid 1990s, the collaboration between the Department of Engineering and Ecological Geology (Geological Faculty MSU) and the Department of Composite Mechanics (Mechanical-Mathematical Faculty MSU) resulted in the development of a unique software complex (DINGE and FILTRATION programs). The former allows tracing in time the displacement of stress concentration zones in slope rocks upon propagating stretching-compression waves produced by earthquakes. The case study of changing stress state is described upon passing seismic waves in rocks on the slopes of Mzymta River valley (the construction area for the Sochi Olympics 2014). The calculation results revealed the regularities in the formation and movement of stress concentration zones along the slope surface depending on their shape, steepness and wave direction. The latter program (based on M. Bio's theoretical model) was applied for assessing the deformation of multilayer horizontal strata and changing pressure upon pumping oil as well as for subsequent settling of the ground surface at a number of oil fields in the Western Siberia as well as in other regions.

The known stress state in a rock massif allows us to estimate the possible loss of its stability by comparing acting stresses to the strength parameters of the rock massif. This procedure was performed using the SDVIG software for numerous geological objects.

The program modules developed at the Department of Engineering and Ecological Geology of the Geological Faculty of the Lomonosov Moscow State University may be applied for solving scientific and practical problems as well as for teaching students at higher school.

Keywords: *stress-deformed state, anisotropic massif, numerical modeling, geomodel, human impact.*