

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ПОРОД НА ИХ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЯВЛЕНИЯ  
ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЫРАБОТКАХ**

Розглянуто особливості гідрогеологічного моніторингу стану масиву порід сучасними комп'ютерними технологіями для достовірного вирішення задач стійкості підготовчих виробок в складних гірничо-геологічних умовах.

**ESTIMATION INFLUENCES OF WATER-SATURATION OF ROCKS AT  
THEIR STRESS-STRAIN STATE AND OF ROCK PRESSURE  
MANIFESTATIONS IN THE MINE WORKINGS**

The features of hydrogeological monitoring of rock massif state with modern computer technologies for reliable solution of problems of stability of development workings in difficult geological conditions.

В настоящее время по технологическим причинам, в основном из-за выбросов, подготовительные выработки проводятся в породах средней и слабой прочности, при этом часто пренебрегают влиянием увлажнения пород на их устойчивость, что приводит к значительным экономическим потерям. Гидрогеологические процессы способствуют интенсивному неуправляемому деформированию подготовительных выработок, которые в свою очередь становятся дополнительными контурами разгрузки водоносных горизонтов. Говорить об актуальности решения данного вопроса нет необходимости, так как известны и основные причины и негативные их последствия.

Вместе с тем, весьма затруднительно заранее определить степень влияния влагонасыщенности пород на устойчивость конкретной выработки по ряду объективных причин. Во-первых, недостаточно изучены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния трещиноватых влагонасыщенных пород в условиях предельных критических нагрузок, которые возникают вокруг подготовительных выработок в период их эксплуатации. Во-вторых, несмотря на многочисленные серьезные исследования данных вопросов [1-3], недостаточно разработаны методы учета влагонасыщения в итерационных компьютерных технологиях, которые, на сегодняшний день, являются наиболее перспективными для анализа сложных геомеханических и фильтрационных процессов.

Техногенный режим подземных вод, обусловленный проведением горных работ в сложных гидрогеологических условиях, как правило, характеризуется изменением направлений и интенсивности водных потоков по трещинам, вследствие чего происходит существенное снижение прочностных свойств увлажненных пород. Многочисленными визуальными наблюдениями и инструментальными измерениями смещений контура подготовительных выработок угольных шахт Украины установлено, что в таких условиях потеря их устойчивости, в основном, обусловлена интенсивным поднятием почвы выработок, по-

роды которых как правило, состоят из глинистых компонентов: глин, глинистых, песчано-глинистых и песчанистых сланцев. Эти породы даже в дренированном состоянии характеризуются относительно низкими прочностными показателями, а при неравнокомпонентном нагружении под влиянием обводненности полностью теряют свою несущую способность.

Чисто теоретические модели, лежащие в основе гипотез пучения, чрезмерно идеализированы, сложны для практического применения и плохо поддаются математическому описанию даже в случае сплошной и однородной среды. Реальный породный массив имеет сложную структуру, выраженную слоистость, проявляет свойства пластичности, что и определяет трудность описания механических процессов деформирования. Сложность и многофакторность таких задач требуют использования для их решения упругопластических геомеханических моделей, которые могут быть реализованы с помощью современных компьютерных технологий, основанных на совмещении методов механики сплошной среды (решения реализуются методом конечных элементов [4]) с теорией предельных состояний горных пород (реализуются методом начальных напряжений [5]) при соблюдении дискретных аналогов закона сохранения энергии для каждого элемента в отдельности и расчетной схемы в целом. Такой подход к решению задач оценки напряженно-деформированного состояния влагонасыщенного породного массива, как одной из наиболее сложных геосистем, был реализован в вычислительном комплексе ГЕО-РС v. 6.0, разработанном ИГТМ НАН Украины при участии автора [6].

При моделировании геомеханических процессов не удастся воспроизвести весь комплекс факторов, влияющих на деформации пород, поэтому очевидно, что необходимо определить наиболее действующие на данный процесс параметры. Это, прежде всего, относится к физико-механическим свойствам горных пород, которые необходимо учитывать отдельно для каждого литологического слоя пород с поправочными коэффициентами, зависящими от степени влияния доминирующих факторов на напряженно-деформированное состояние массива. Так как горные породы, сформированные на глинистом цементе, в воде фактически полностью размокают за 20 суток, а песчаники снижают свою прочность примерно в 1,5-2,0 раза, то наличие воды в порах горных пород в количестве, близком к водонасыщению, кардинально изменяет их поведение в массиве, нарушенном горными работами. Влияние водонасыщения также сказывается на изменении характера связи между частицами пород, при этом у скальных, полускальных или осадочных цельных пород, кроме уменьшения прочности, снижаются силы сцепления между блоками и слоями при неупругом деформировании.

Установлены общие закономерности снижения прочности водонасыщенных пород в зависимости от их исходной прочности в естественном состоянии [1]. Для прочных песчаников и известняков справедлива корреляционная зависимость:

$$\sigma_{сжс}^w = 1,924 + 0,67\sigma_{сжс}, \text{ (МПа)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{сж}$  - предел прочности породы в естественном состоянии.

Если принять для области сжатия массива водонасыщенных глинистых пород в зоне влияния выработки остаточную прочность аналогично разрушенным породам, то для них обобщенная корреляционная зависимость принимает вид:

$$\sigma_{сж}^w = -2,49 + 0,785\sigma_{сж}, \text{ (МПа)}. \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж}$  - предел прочности породы в естественном состоянии.

При насыщении водой у осадочных пород значительно снижается сцепление. Это, как правило, относится фактически ко всем углевмещающим породам: песчаникам, известнякам, аргиллитам и алевролитам. Набухание пород (увеличение объема при смачивании) зависит от тех же факторов, что и пластичность. Оно растет с повышением степени дисперсности, особенно с увеличением содержания фракций тонких глинистых и коллоидных частиц.

Основными причинами увеличения влажности глинистых пород в почве и кровле выработок являются фильтрационные потоки по магистральным трещинам в нарушенном горными работами породном массиве, которые распространяются при неупругом деформировании пород, а также технологические процессы, требующие использования технических жидкостей в достаточно большом объеме, в частности, бурение скважин, тампонирование, бетонирование и орошение горных выработок.

При оценке фильтрационных свойств слабопроницаемых пластов следует иметь в виду то, что определяющим фактором в формировании проницаемости пород является их трещиноватость, поэтому наибольшая проницаемость наблюдается в зонах разрывных нарушений, где раскрытие трещин возрастает под влиянием очистных работ. Прогноз проявлений горного давления в таких условиях может быть основан на геомеханических моделях, позволяющих оценить этапы развития техногенной трещиноватости.

Деформации глинистых пород обычно необратимы, зависимость деформаций от напряжений носит резко выраженный нелинейный характер уже в небольших диапазонах нагружения. Для них характерны низкая прочность, высокая выдавливаемость, малая сжимаемость, низкая проницаемость и большая влагоемкость. В свою очередь горные выработки в зависимости от их формы, способа проведения, исходного напряженного состояния массива, в каждом конкретном случае, по-разному влияют на состояние влагонасыщенного массива пород.

Способы решения гидрогеологических задач разделяются на прямые и обратные. В прямых задачах определяются прогнозные показатели напряжений и деформаций в зависимости от изменения расходов и уровней воды в области фильтрации. При этом должны быть известны и заданы все размеры области фильтрации, параметры среды, граничные и начальные условия. В этом заключаются задачи прогноза водопритоков в горные выработки и работа данных

инженерных сооружений в исследуемых условиях. В обратных задачах изучаются и уточняются гидрогеологические и геомеханические условия по данным мониторинга состояния выработок. При решении такой задачи неизвестными являются некоторые элементы условий однозначности, заключающиеся, прежде всего, в уточнении данных моделирования (размеров зон неупругих деформаций, величин фильтрационного питания и др.). Для их определения должна быть известна реакция породного массива на задаваемое возмущение (проходка выработки, подпор, откачка, опыт эксплуатации инженерного сооружения), то есть показатели, характеризующие процесс изменения состояния породного массива.

Так как управление процессом освобождения внутренней энергии породного массива тесно связано с его напряженно-деформированным состоянием, то управление горным давлением можно производить технологическими способами: выбором типа крепи, направлений отработки пластов и проходки подготовительных выработок, рационализацией схем ведения горных работ, форм подготовительных выработок и конфигурации забоев. Оптимизация технологических процессов с точки зрения геомеханики теоретически возможна, при этом энергия горного массива может быть расходована на разрушение пород, что приводит к снижению себестоимости добычи. Однако на практике это многофакторный трудно управляемый процесс, поддающийся только частичной реализации.

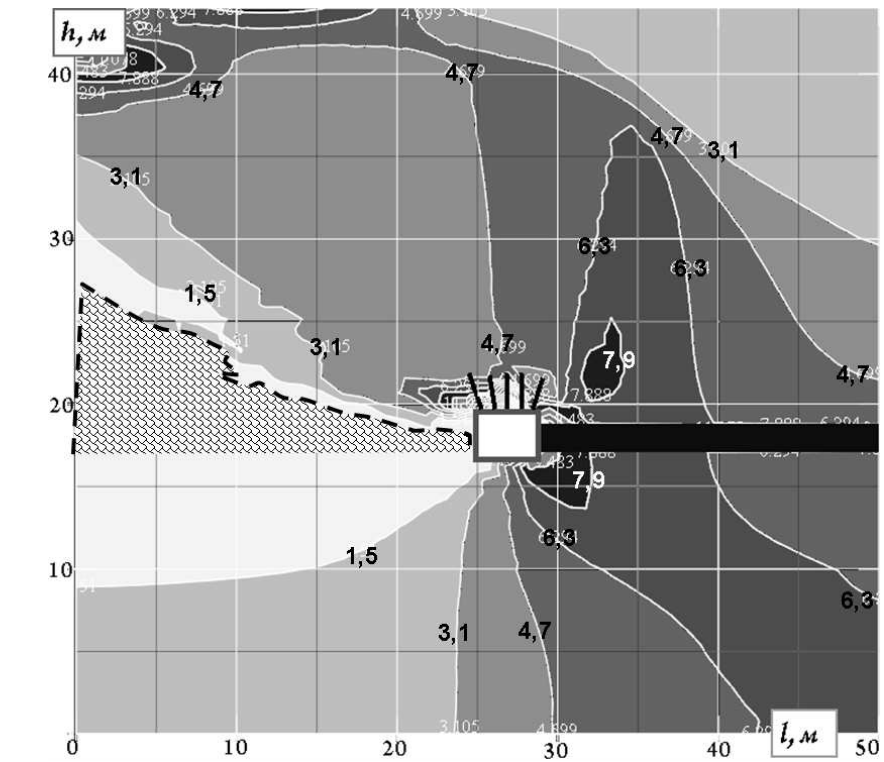
Согласно действующим нормативным документам выбор мер охраны выработок и конструкций крепи производят на основе сравнения ожидаемых смещений контура выработки с допускаемыми деформациями крепи по условиям эксплуатации. В зоне влияния очистных работ предусматривают податливые конструкции крепи либо меры по их локальной или региональной разгрузке, учитывающие гидрогеологические параметры имеющихся водоносных горизонтов путем снижения расчетного сопротивления пород на коэффициент равный 0,4-0,8 в зависимости от типа пород. При этом указывается только тип пород. Однако глинистые породы реагируют на обводнение по-разному. Несмотря на то, что гидрогеологические данные должны содержать комплекс сведений о расположении и мощности водоносных горизонтов, степени обводненности пород в местах предполагаемого размещения проектируемых выработок, гидростатических и гидродинамических напорах, характеристике химической агрессивности вод, расположении и характеристике водоупоров, условиях питания и дренажа водоносных горизонтов, показателях их фильтрационной способности и связи с поверхностными водотоками и водоемами, расположении и характеристике пьезунов, при проведении горных работ, фактически все исходные параметры, определенные на стадии геологической разведки, изменяются. Поэтому отличие проектных смещений контура выработок, зачастую, существенно отличается от реальных смещений пород в подготовительных выработках эксплуатируемых угольных шахт.

Визуальные наблюдения и измерения проведены сотрудниками ИГТМ НАН Украины в 535 сборном штреке пласта С<sub>5</sub> шахты «Самарская». Несмотря на не-

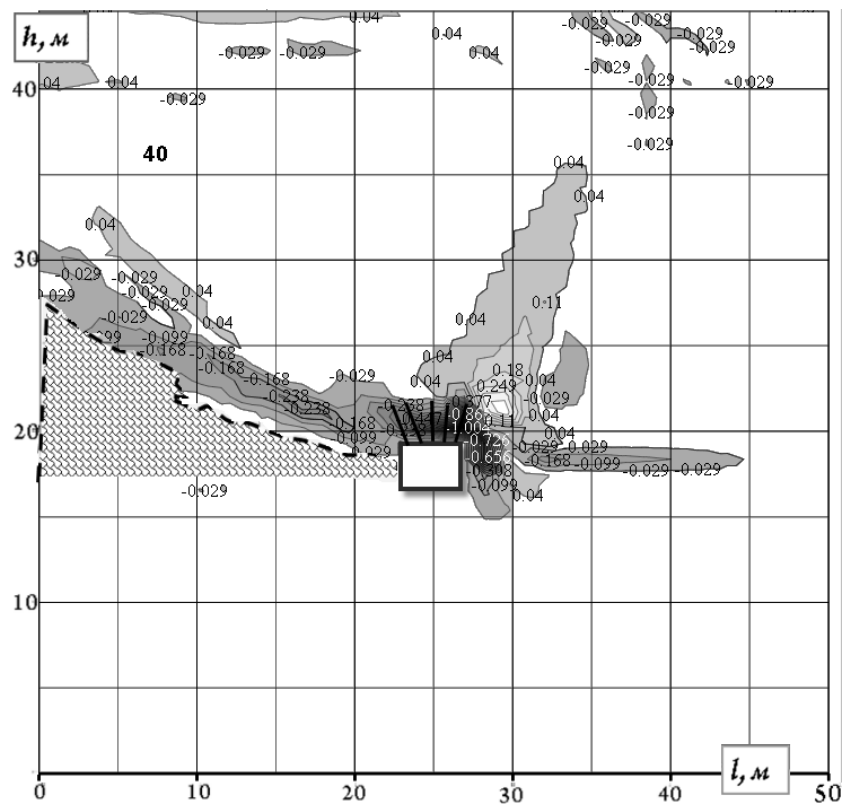
большую глубину разработки угольного пласта (130 м), горно-геологические условия разработки сложные. Кровля и почва представлены аргиллитом и алевролитом с прочностью 10-20 МПа. В непосредственной почве залегают слабые алевролиты ( $\sigma_{сж} = 11,8 - 15,0$  МПа). При водонасыщении породы весьма неустойчивые, склонны к внезапным обрушениям. Уголь прочностью  $\approx 40$  МПа. В кровле зонально расположен водонасыщенный песчаник (11-14 МПа). Пласт имеет сложную гипсометрию, изменения расстояния от почвы до угольного пласта по длине штрека составляет  $\sim 0,6-1,6$  м.

Используя корреляционные соотношения (1, 2) были проведены исследования изменений напряженно-деформированного состояния породного массива при влагонасыщении. Для возможности определения влияния фактора водонасыщения на проявления горного давления и устойчивость подготовительной выработки расчеты выполнены в условиях обводненных и сухих пород. Оценка распределения максимальных главных напряжений (рис. 1, а) показала, что краевая часть угольного пласта испытывает нагрузку 2,1-3,6 МПа. В связи с тем, что угольный пласт в  $\approx 2-3$  раза прочнее боковых пород, в зонах обводнения происходит интенсивное выдавливание пород кровли и почвы угольного пласта в выработку. Почва выработки, напротив, разгружена от напряжений. Это свидетельствует о реализации деформаций и поднятии почвы.

Наблюдения показали, что вывалы боковых пород, в основном, приурочены к зонам обводненности. Например, в районе ПК 62 наблюдается выделение воды, происходит размокание вмещающих пород в боках выработки. Как показано на рис. 1, б, максимальные изменения напряжений в породном массиве при водонасыщении происходят в предельно напряженных породах непосредственной и основной кровли над краевой частью угольного пласта (на высоту  $\approx 14$  м), а также в боку выработки в зоне стационарного опорного давления (на  $\approx 17$  м). В боку выработки со стороны угольного целика и над выработанным пространством в результате активизации деформаций обводненного массива пород максимальные главные напряжения снижаются на 0,3-1,1 МПа. В вышележащих породах напряжения, напротив, увеличиваются на 0,1-0,4 МПа. Эти негативные последствия обводнения приводят к интенсивному распространению зоны неупругих деформаций. В результате в верхних углах штрека развиваются продольные протяженные трещины (рис. 2). При этом водонасыщенная кровля выработки коржится и отслаивается (рис. 2, а), а местами обваливается (рис. 2, б). Очевидно, что такие проявления горного давления необходимо прогнозировать и заблаговременно применять дополнительные мероприятия по поддержанию выработки.



а)



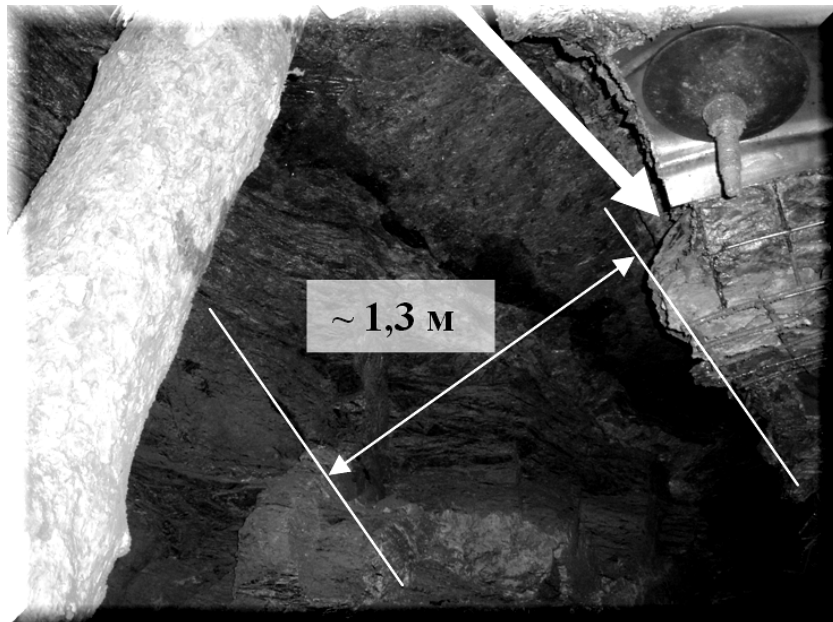
б)

а – распределение максимальных главных напряжений вокруг штрека, МПа;  
 б – изменение напряженно-деформированного состояния породного массива при его обводнении (рассчитано по разности максимальных главных напряжений с использованием физико-механических свойств водонасыщенных и дренированных пород), МПа.

Рис. 1 -- Закономерности изменения напряженного состояния водонасыщенного массива горных пород вокруг 535 сборного штрека пласта С<sub>5</sub> шахты «Самарская»:



а)



б)

а – разрушение верхних углов выработки (ПК64-ПК67);  
 б – боковой отжим влажных пород и вывалы стен выработки (ПК 73+6 м, ПК 36).

Рис. 2 – Проявления горного давления при водонасыщении пород:

По результатам наблюдений и расчетов был определен характер деформирования увлажненных пород в кровле, боках и почве выработки, рис. 3. Установлено, что интенсивные деформации начинаются в боках штрека и проявляются в виде отжима слабых пород в кровле и почве угольного пласта. Наиболее опасными местами являются верхние боковые углы выработок, которые под влиянием влажности склонны к вывалам, а система анкерного крепления теряет опору.

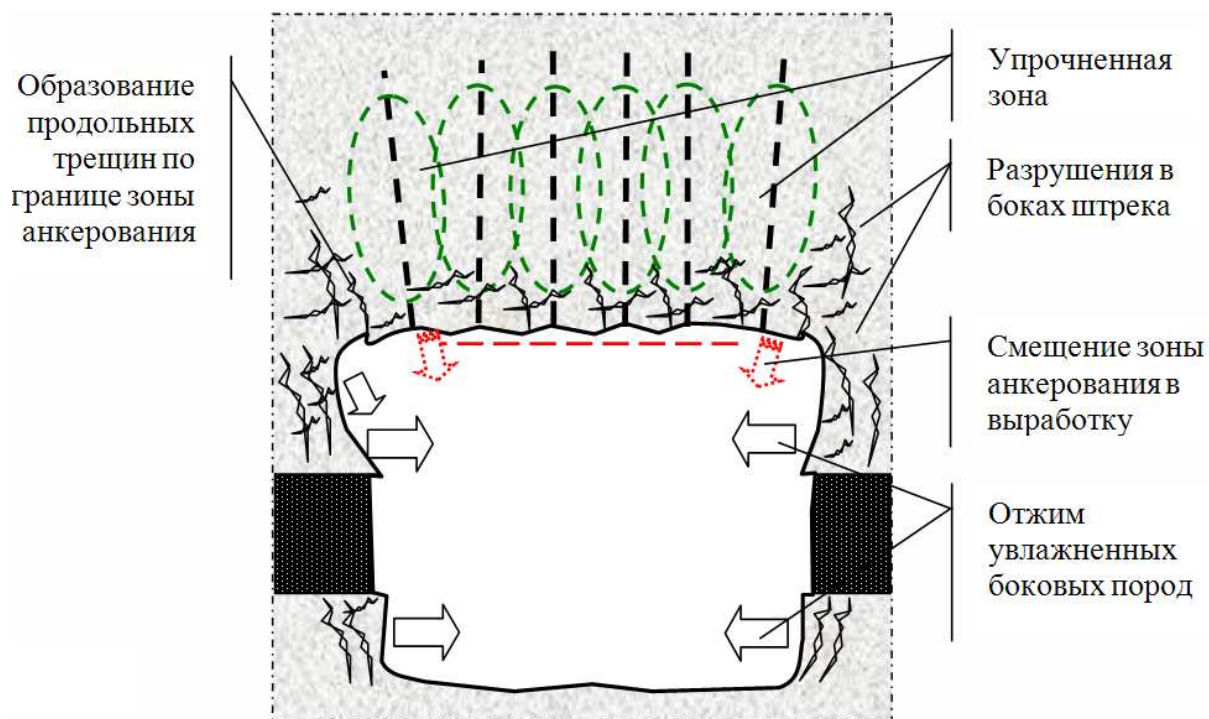


Рис. 3 – Характер деформаций увлажненных пород 535 сборного штрека пласта  $C_5$  шахты «Самарская», реконструированный по результатам расчетов и шахтных наблюдений

Таким образом, установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния массива в зависимости от обводненности подготовительной выработки, которые позволили для условий шахты «Самарская» оценить степень влияния увлажнения пород на их напряженно-деформированное состояние и проявления горного давления в подготовительных выработках. На основе математического моделирования установлено, что осуществление комплекса мероприятий, направленных на снижение поступления воды в выработку повышает ее устойчивость, а именно: снижает размеры зоны неупругих деформаций в боках и кровле выработки в зоне стационарного опорного давления, уменьшает деформации контура выработки, величину горизонтальной и вертикальной конвергенции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усаченко, Б.М. Исследование и экспресс-оценка фильтрационных процессов в трещиноватых массивах / Б.М. Усаченко, Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2005. – Вып. 59. – С. 34 – 44.
2. Садовенко, И.А. Научные основы управления геофильтрационным состоянием породного массива вокруг горных выработок: дис... д-ра техн. наук: 05.15.04; 05.15.11 [Текст] / Садовенко Иван Александрович; [Днепропетровский горный ин-т]. – Днепропетровск, 1992. – 455 с.
3. Слащева, Е.А. Разработка методики экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов: дис... канд. техн. наук: 05.15.11 [Текст] / Слащева Елена Анатольевна; [Ин-т геотехнической механики НАНУ]. – Днепропетровск, 2007. – 204 с.
4. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
5. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич – М. : Мир, 1975. – 238 с.
6. Слащева, Е. А. Особенности ввода и обработки исходной информации при решении геомеханических задач с помощью персональных ЭВМ / Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2004. – Вып. 51. – С. 296-304.