



**ДУВАНСКИЙ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

Научный сотрудник научно-исследовательского отдела зданий и подземных сооружений в сложных геотехнических условиях ДП «Донецкий Промстройинипроект», аспирант ГП Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций.

Основные направления деятельности – механика подземных сооружений, строительные конструкции зданий и сооружений в сложных геотехнических условиях.

Автор 4-х научных трудов.

E-mail: gir.dptm@mail.ru

УДК 624.195

**КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРОТЯЖЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ЗАКРЫТОГО СПОСОБА РАБОТ**

*Ключевые слова: подземные сооружения, метрополитен, строительные меры защиты.*

*Розглянута актуальна проблематика будівництва протяжних підземних споруд закритого способу робіт, що стосується геомеханіки, механіки підземних споруд і будівельних конструкцій. Відображен механізм впливу тектонічних порушень на підземні споруди.*

*Рассмотрена актуальная проблематика строительства протяженных подземных сооружений закрытого способа работ, касающаяся геомеханики, механики подземных сооружений и строительных конструкций. Отражен механизм влияния тектонических нарушений на подземные сооружения.*

*The topical problematic of extended underground structures' construction by the trenchless method, concerning geomechanics, mechanics of underground structures and building structure is considered. The mechanism of influence of tectonic disturbance on the underground structures is reflected.*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Строительство подземных сооружений часто осложнено геологическим сложением грунтового массива. Строители и проектировщики не раз сталкивались с различными сложными геотехническими условиями, но проблемы строительства, связанные с тектоническими нарушениями, на сегодняшний день не имеют однозначного определения и трактуется современными учеными по-разному. Так как тектонические движения образуют деформации грунтового массива, следовательно образуются и тектонические нарушения, обусловленные высокими полями напряжений. Многообразие тектонических нарушений довольно велико, поэтому неправильное определение влияния этих нарушений может привести, без соответствующих мер защиты, к недопустимым деформациям подземных сооружений.

**2. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Детальные исследования напряженного состояния коры и литосферы в целом начали проводить в середине 50-х годов с появлением теории тектоники литосферных плит.

В 1954 году М.В. Гзовским впервые было введено понятие «тектоническое поле напряжений» [1, 2]. Им же в этот период времени предложен метод реконструкции палеонапряжений (ориентировки главных напряжений) по геологическим данным о трещиноватых структурах. Он первым отметил связь напряжений с новейшими движениями земной коры и предложил методику для определения величины касательных напряжений по средним градиентам вертикальных перемещений. В процессе исследования была дана предварительная оценка величины касательных напряжений в земной коре и определен их характер (рис. 1).

Несмотря на определенные допущения, при получении

Дивись рисунок 1 на стор. 4 обложки



данных о напряжениях [3, 4] удалось выяснить важные черты общего напряженного состояния земной коры, в том числе и в сейсмически активных поясах. Оказалось, что горизонтальные напряжения преобладают по величине над вертикальными и широко распространяются в верхней части земной коры, образуясь исключительно от движений грунтового массива.

Также было установлено, что движение грунтового массива в верхних частях вызвано эндогенными силами, нарушающими равновесие. При этом горные породы могут претерпеть смятие, разрыв; происходит их воздымание или опускание, что приводит к изменению рельефа земной поверхности – возникают уступы или разрывы. Кроме эндогенных сил, предполагается влияние и космических, которые также отражаются на глобальных тектонических событиях.

Следствием таких процессов является нарастание напряжений, которые могут быть меньше структурной прочности грунтового массива, но достаточными для деформирования массива, тогда горизонтально залегающие слои, в одних случаях испытывают лишь наклон и приобретают моноклиналиное залегание, в других случаях – смяты, изогнуты. Такие нарушения называются *складчатыми* (рис. 2), а их отдельные формы – *складками*. В случаях нарастания напряжений до превышения структурной прочности грунтового массива слои разрываются, их сплошность теряется. Тогда образуются нарушения, именуемые *разрывными* (рис. 3), а их формы – *разрывами*.

Среди различных типов разрывных нарушений можно выделить главные: сброс, взброс, надвиг и т.д. (рис. 3).

Строительство протяженных подземных сооружений в зонах тектонических нарушений требует детальных исследований, позволяющих оценить величину тектонических воздействий в численном выражении. Полученные величины можно будет учесть в статических расчетах с целью определения действительных усилий возникающих в конструкциях, что позволит достоверно их запроектировать и разработать защитные мероприятия, обеспечивающие безопасную эксплуатацию рассматриваемых сооружений в зонах тектонических нарушений.

### 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО ВЫРАЖЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Для определения тектонических воздействий на подземные сооружения целесообразно воспользоваться тензором напряжений для трехмерной постановки задачи, аналогичным для определения напряженного состояния грунтового массива по гравитационной теории:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\sigma_z$  – нормальные, а  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$  – касательные напряжения.

Тензоры напряжений являются симметричными, т.е.  $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ . Поэтому в общем случае тензор напряжений может быть полностью охарактеризован шестью его компонентами. Иначе говоря, чтобы вычислить значения напряжений на площадках, любым произвольным образом ориентированных в пространстве, достаточно знать составляющие нормальных и касательных напряжений, действующих на трех любых взаимно перпендикулярных площадках.

Существенно важно, что каким бы ни было поле напряжений массива в целом и напряженное состояние любой точки рассматриваемого массива, в каждой из точек существуют три таких взаимно ортогональных направления (и притом единственных), при которых все касательные компоненты тензора напряжений имеют нулевые значения. Отличными от нуля остаются только три нормальных напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$ , называемые главными значениями тензора напряжений или главными нормальными напряжениями. Матрица тензора напряжений, выраженная главными его значениями, принимает вид:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Индексы 1, 2 и 3 в матрице тензора обычно присваивают



Рис. 2. Типы складок по расположению: а) прямая; б) косая; в) опрокинутая; г) лежачая.

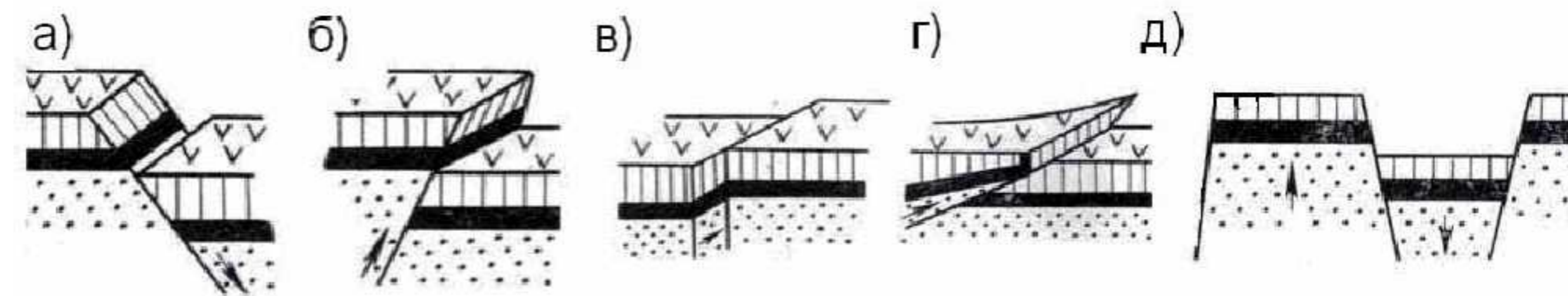


Рис.3. Типы разрывов: а) сброс, б) взброс, в)сдвиг, г) надвиг, д) грабен и горст.



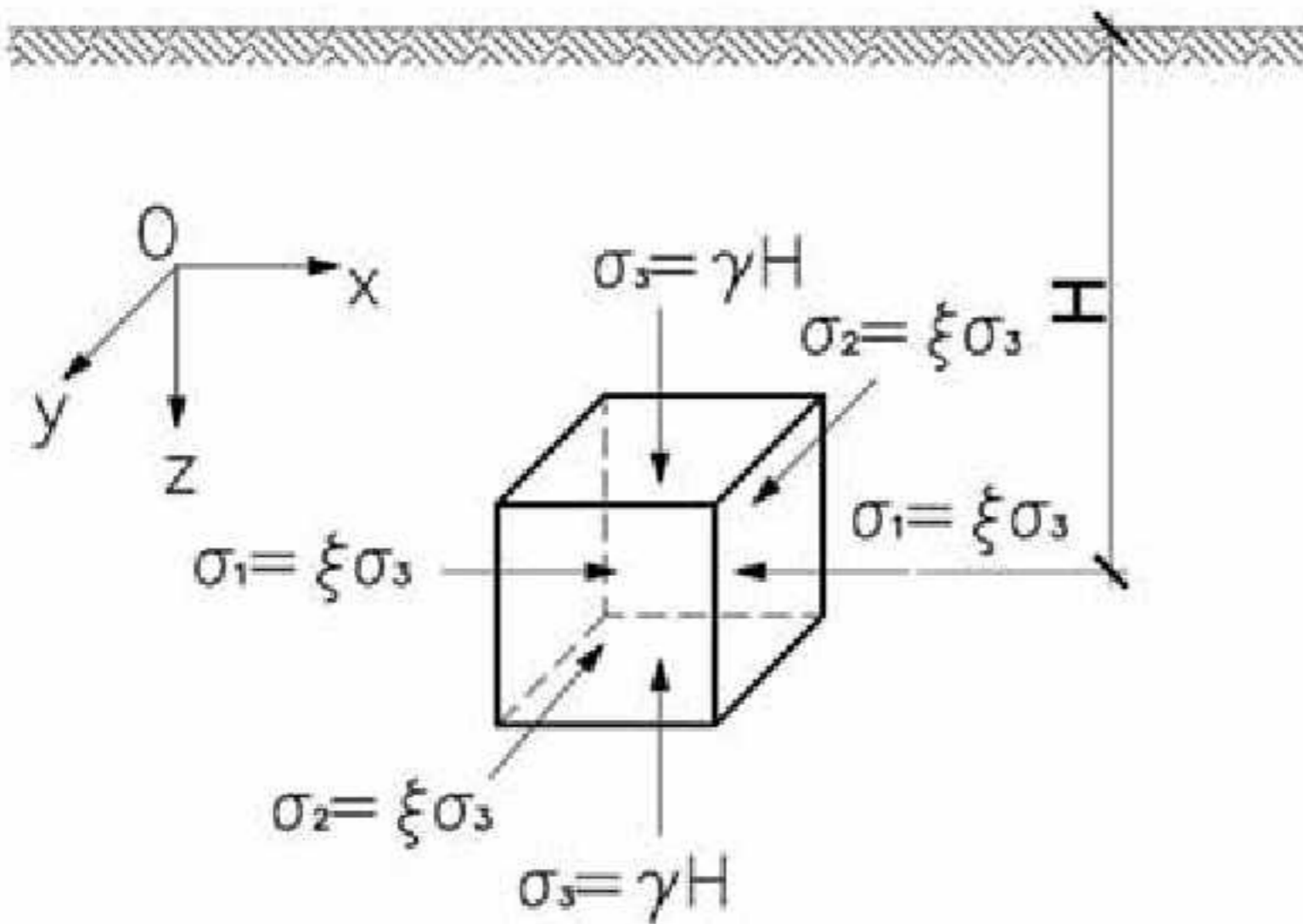


Рис. 4. Схема к расчету гравитационных напряжений в грунтовом массиве

главным напряжениям таким образом, чтобы  $\sigma_1$  – было алгебраически максимальным,  $\sigma_2$  – промежуточным значением,  $\sigma_3$  – алгебраически минимальным. Однако применительно к напряжениям в массивах пород, учитывая проявление в одних случаях только гравитационных сил, а в других – как гравитационных, так и тектонических, невозможно совместить этот принцип с принципом единообразия обозначений напряжений в вертикальном и горизонтальных направлениях. Целесообразно поэтому принять правило, согласно которому главное напряжение в вертикальном направлении всегда обозначается  $\sigma_3$ , наибольшее по модулю главное горизонтальное напряжение (в случае действия тектонических сил) –  $\sigma_1$ , другое главное горизонтальное напряжение –  $\sigma_2$ . Направления действия главных нормальных напряжений называют главными осями напряжений.

Таким образом, главное напряжение в вертикальной плоскости  $\sigma_3$  всегда определяется весом пород вышележащей толщи, и в случае различных плотностей (объемных весов) покрывающих пород имеет вид:

$$\sigma_3 = \sum_0^H \gamma_i h_i, \quad (3)$$

где,  $\gamma_i$  – объемный вес  $i$ -го слоя пород;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя;  $H$  – глубина рассматриваемой точки от дневной поверхности.

Если напряженное состояние массива пород определяется только действием гравитационных сил, то каждый элементарный объем (рис. 4) под действием вертикального гравитационного напряжения  $\sigma_3$  будет испытывать деформации сжатия – в вертикальном (по оси  $Oz$ ) и деформации растяжения – в горизонтальных направлениях (по осям  $Ox$  и  $Oy$ ). Однако последним препятствует реакция окружающих пород, в результате чего возникают горизонтальные сжимающие напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , численно равные:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \xi \gamma H = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H. \quad (4)$$

Здесь коэффициент  $\xi$  именуют коэффициентом бокового давления. Этот коэффициент показывает, какую часть вертикальной нагрузки, действующей в рассматриваемой точке массива, составляют силы или напряжения,

действующие в горизонтальной плоскости.

Для горных пород коэффициент поперечных деформаций изменяется в пределах от  $\nu = 0,08$  до  $\nu = 0,5$ . Соответственно крайние возможные пределы изменения  $\xi$  составляют от 0,1 до 1. Следует подчеркнуть, что в соответствии с физическим смыслом коэффициента  $\nu$  его значения не могут превышать 0,5, поэтому и значения коэффициента бокового давления  $\xi$  не могут быть больше 1. В противном случае среда теряет свою сплошность. Это положение имеет принципиальное значение и должно использоваться при анализе и интерпретации результатов натурных измерений.

При слоистом строении массива значения горизонтальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются конкретными значениями коэффициентов поперечных деформаций  $\mu$  для соответствующего слоя. В связи с этим, если вертикальное напряжение  $\sigma_3$  будет монотонно возрастать по мере увеличения глубины рассматриваемых слоев, то горизонтальные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  при общей тенденции возрастания могут как увеличиваться, так и уменьшаться при переходе от слоя к слою.

Главное напряжение  $\sigma_3$ , обусловленное действием гравитационных сил, может в отдельных случаях отклоняться от вертикали вследствие наклонного залегания отдельных слоев пород, их складчатости и различной мощности, а также при сложном рельефе поверхности. Отклонения эти обычно не превышают нескольких градусов, в редких случаях достигая  $10 \div 15^\circ$ .

Изменение гравитационной составляющей общего поля напряжений по глубине характеризуется градиентом гравитационных напряжений  $\Delta \sigma_3$ , который также является функцией средней плотности пород, слагающих массив, и составляет  $0,25 \div 0,32 \text{ кгс}/(\text{см}^2 \cdot \text{м})$ .

Предельные значения  $\nu = 0,5$  и  $\xi = 1$  выражают условие гидростатического распределения напряжений в массиве, т.е. такого распределения, когда:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3. \quad (5)$$

Гидростатическое напряженное состояние является частным случаем напряженного состояния массива и характерно для таких пород, как глины, слабые глинистые и песчаные сланцы, каменные соли, слабые угли, способные к вязкопластическому течению при сравнительно невысоких нагрузках. По мнению многих исследователей, весьма прочные породы по мере роста глубины и связанного с ним роста давлений и температур также постепенно переходят в пластическое состояние, так что на достаточно больших глубинах распределение напряжений приближается к гидростатическому независимо от состава пород, слагающих массив. Однако в случае весьма прочных скальных пород эти глубины исчисляются, по-видимому, десятками километров, т. е. значительно больше глубин, реально достижимых при горных разработках.

Поля тектонических напряжений гораздо менее однородны, чем поля гравитационных. Их параметры могут значительно изменяться как в пространстве, так и во времени. В частности, изменчивы ориентировка осей главных напряжений и их абсолютные значения. Изменение тектонических напряжений может быть охарактеризовано вертикальным градиентом тектонических сил, выражающим зависимость максимального главного горизонтального сжимающего напряжения от глубины.



Градиент  $\Delta\sigma_m$  в общем случае является переменной величиной, зависящей от строения массива и рельефа земной поверхности.

Рассматривая напряженное состояние какого-либо элементарного объема в массиве, подверженном действию горизонтальных тектонических сил (рис. 5), можно утверждать, что одно из главных нормальных горизонтальных напряжений численно равно:

$$\sigma_1 = T_u, \tag{6}$$

где  $T_u$  - горизонтальное тектоническое напряжение в рассматриваемом массиве [6].

Для напряжений  $\sigma_3$  и  $\sigma_2$  справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 &= \chi T_u \\ \sigma_2 &= \varphi T_u \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

причем

$$\left. \begin{aligned} \frac{\nu}{1-\nu} > \chi &\geq 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} > \varphi &\geq 0 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Таким образом, общее выражение тензора напряжений для какого-либо участка массива пород можно представлять в виде суммы двух тензоров:

$$T\sigma = T\sigma_z + T\sigma_m, \tag{9}$$

где,  $T\sigma_z$  и  $T\sigma_m$  - тензоры напряжений, обусловленные соответственно действием гравитационного и тектонического полей напряжений.

В свою очередь:

$$T\sigma_z = \begin{pmatrix} \sigma_{1z} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2z} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi \cdot \gamma \cdot H & 0 & 0 \\ 0 & \xi \cdot \gamma \cdot H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \cdot H \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} \gamma \cdot H & 0 & 0 \\ 0 & \gamma \cdot H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \cdot H \end{pmatrix}. \tag{10}$$

Тензор тектонических напряжений для какой-либо точки массива, расположенной на глубине  $H$  от дневной поверхности, имеет вид:

$$T\sigma_m = \begin{pmatrix} \sigma_{1m} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2m} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3m} \end{pmatrix} \tag{11}$$

Как следует из выражения (12), тензор тектонических напряжений может быть получен как разность экспериментально определенного полного тензора напряжений и расчетного тензора гравитационных напряжений на той же глубине. Таким образом, тектонические напряжения на любой главной площадке можно определить из разницы:

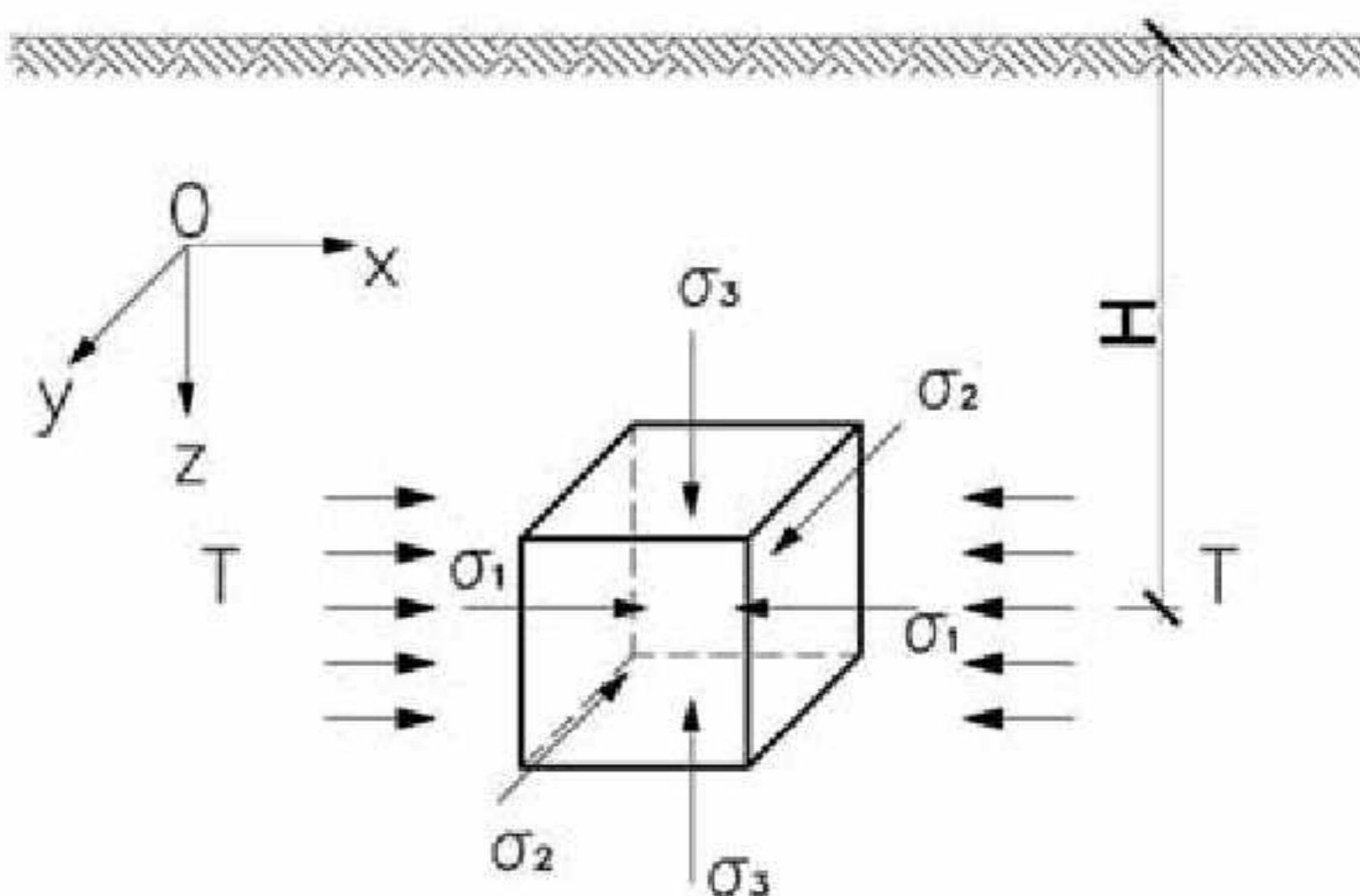


Рис. 5. Схема к расчету параметров поля напряжений при действии горизонтальных тектонических сил

$$\sigma_m = \sigma_u - \sigma_z. \tag{12}$$

**ВЫВОДЫ:**

По проведенным исследованиям с учетом выражения (12) были получены результаты величин тектонических напряжений: горизонтальные -  $\sigma_{xy}$  в 10÷16 раз больше горизонтальных нагрузок от веса грунта; вертикальные -  $\sigma_z$  в 2÷5 раз больше вертикальных нагрузок от веса грунта.

Таким образом можно достоверно определить тектонические воздействия на обделку тоннеля, опираясь на обобщенные результаты современных экспериментальных исследований, в том числе натурных.

Опыт изучения зон тектонических нарушений показывает, что для строительства в таких зонах необходимо предварительно проводить тщательные натурные измерения на площадке строительства и учитывать их результаты при проектировании.

В целом объекты строительства, расположенные в зонах тектонических нарушений, являются объектами повышенной ответственности.

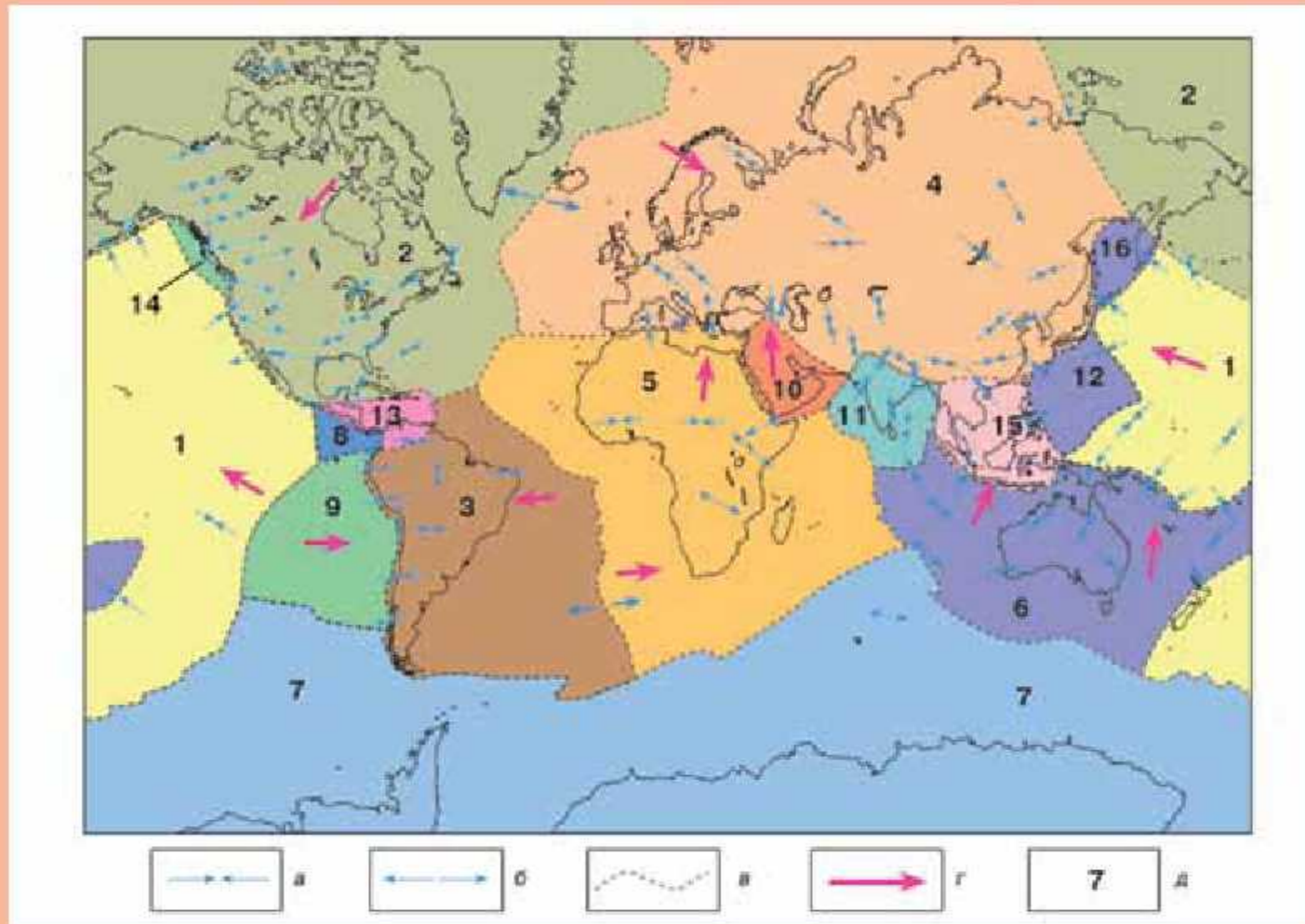
При строительстве и в процессе эксплуатации подземных сооружений в таких зонах, необходимо проводить мониторинг технического состояния грунтового массива и сооружения с целью накопления данных по напряженно-деформированному состоянию конструкции и грунта.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРИ**

1. К вопросу о коэффициентах  $K_b$  и  $K_x$  при определении напряжений методом разгрузки // Д.М. Казикаев, Г.Г. Суржин, В.К. Ищенко и др. // Изменение напряжений в массивах горных пород, Ч.1 - Новосибирск, 1974 - С.83-86.
2. Bonneohere F., Fairhurst C., "Determination of the regional stress fills from doorstopper measurements" // J.S.Arp.Inst. Min and Metall/ - 1968/ - July.-P.520-544.
3. Call E.M., Wilhoit J.S. "Stress around a well bore due to internal preasure and integral principle geostatic stress" // Soc.Petrol.Eng.J.-1956.-V2.-N2.-P.145-155.
4. Борисенко С.Г., Конский Е.И. Расчет на прочность элементов блоков при разработке рудных месторождений - Киев, 1960.-С.26-27.
5. Временные указания по проектированию строительства и эксплуатации крепи и армировки вертикальных стволов угольных шахт в условиях влияния очистных работ. - Л., 1972. - 188с.
6. Гавриленко, Ю.Н. Исследование факторов, влияющих на деформации земной поверхности, при подработке разрывных нарушений полными пластами. - Горно-металлургические проблемы Донбасса, №1, - 1995. С.91-100.

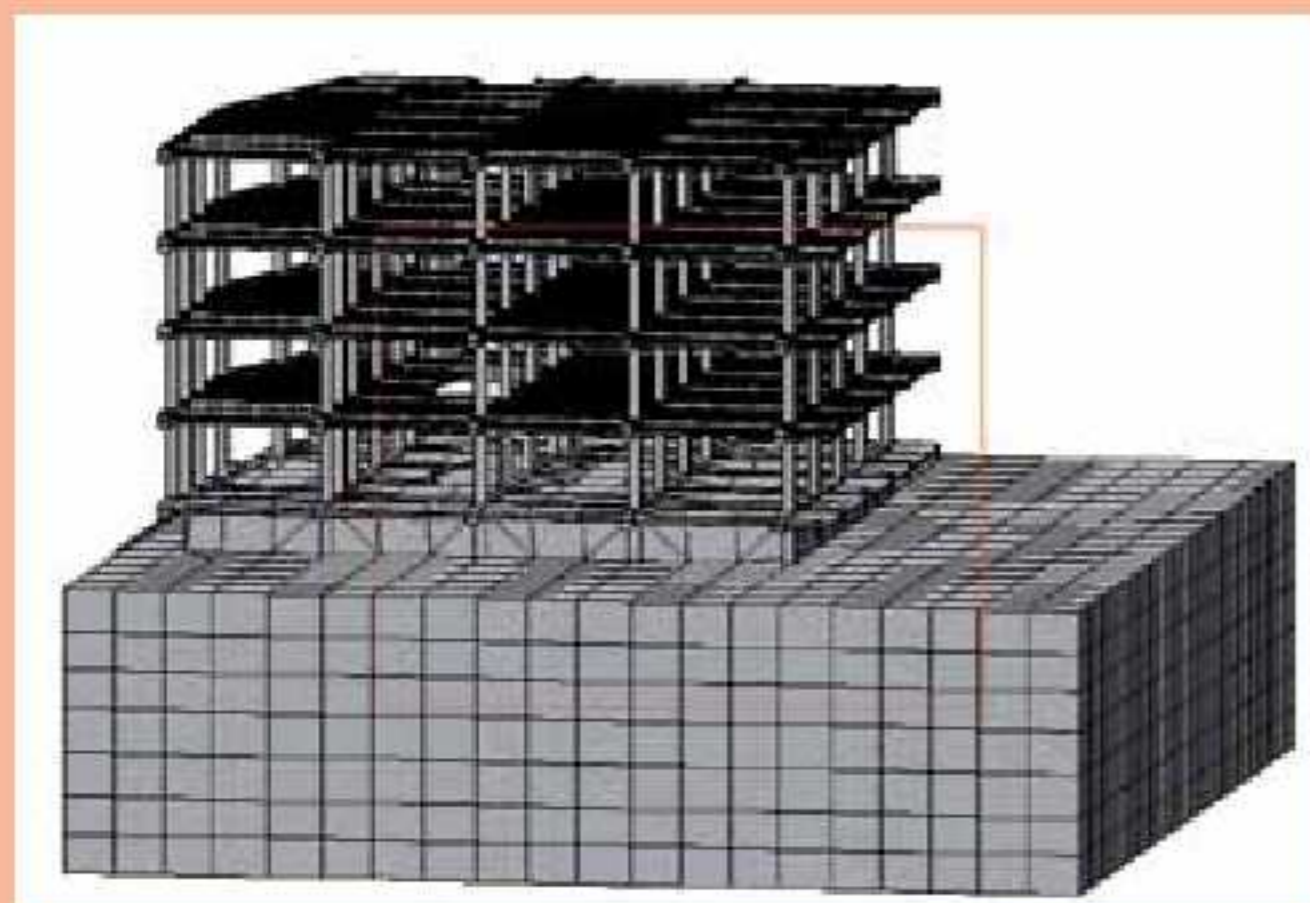


**РИСУНКИ К СТАТЬЕ ДУВАНСКОГО А.В.  
«КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРОТЯЖЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ЗАКРЫТОГО СПОСОБА РАБОТ»**



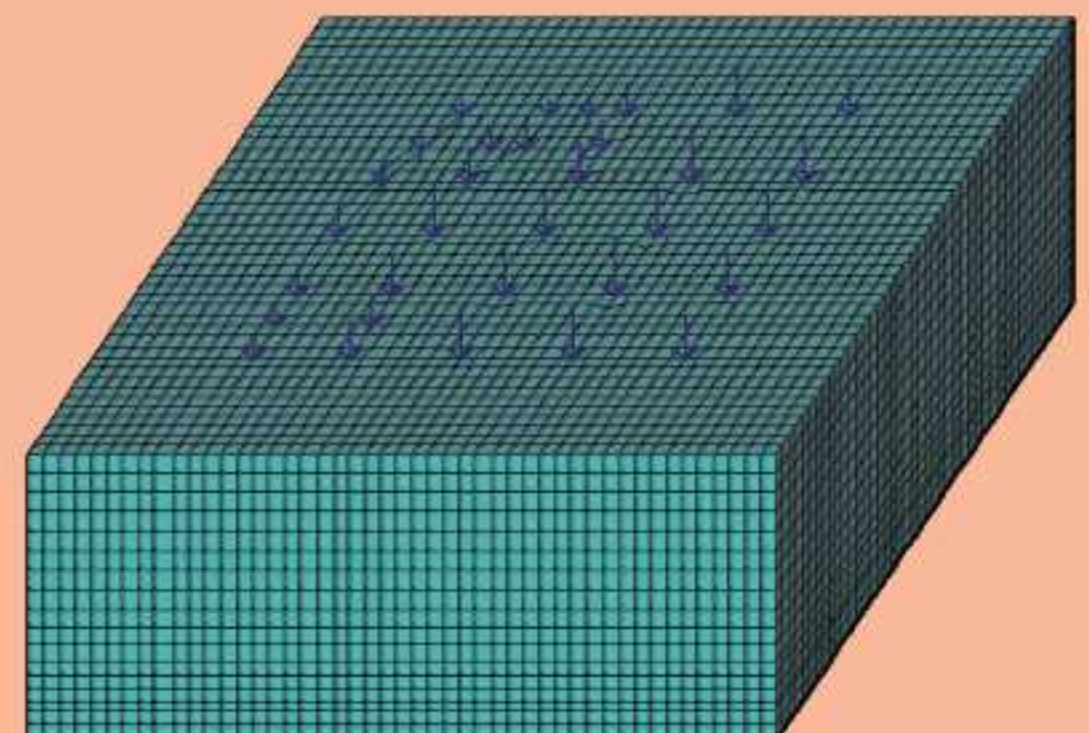
**Рис. 1.** Характер ориентировки тектонических напряжений в земной коре: а – ориентировки осей горизонтального сжатия; б – ориентировки осей горизонтального растяжения; в – границы литосферных плит; г – направление движений литосферных плит; д – номера плит: 1 - Тихоокеанская, 2 – Северо-Американская, 3 – Южно-Американская, 4 - Евразийская, 5 – Африканская, 6 – Австралийская, 7 – Антарктическая, 8 – Кокос, 9 – Наска, 10 – Аравийская, 11 – Индостанская, 12 – Филиппинская, 13 – Карибская, 14 – Хуан-де-Фука, 15 – Индокитайская, 16 – Охотская

**РИСУНКИ ДО СТАТТІ ШКОДА В.В., СЬОМЧИНА М.В., ШКОДА А.В.  
«МЕТОДИКА ВИБОРУ ТИПУ ФУНДАМЕНТІВ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ, ЯКІ ЗВОДЯТЬСЯ В СКЛАДНИХ ГРУНТОВИХ УМОВАХ ЗАПОРІЗЬКОГО РЕГІОНУ»**

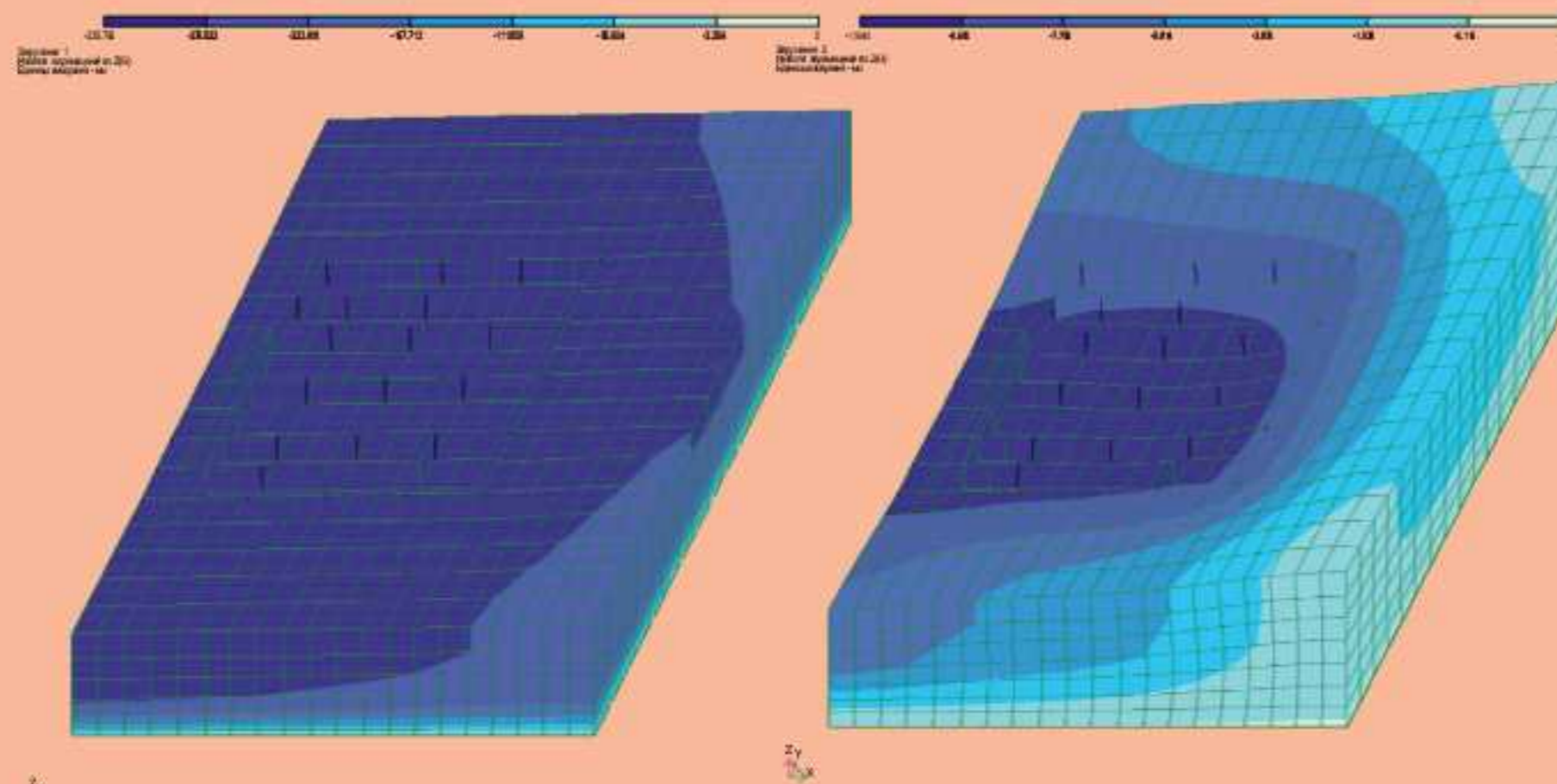


**Рис. 1.** Розрахункова модель системи «будівля-основа».

Зображення 1



**Рис. 3.** Розрахункова модель системи «пальові фундаменти-основа».



**Рис. 2.** Вертикальні деформації системи «будівля-основа» від постійного та корисного навантажень.