GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2013 VOLUME 4 ISSUE 4 PAGES 435–445 ISSN 2078-502X

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-4-0111

A MODEL OF THE SELF-STRESS STATE OF THE SEDIMENTARY ROCK AND ITS APPLICATION TO ESTIMATION OF RESIDUAL EFFECTS

A. I. Moroz

OJSC Scientific Research Centre "Construction", Gersevanov Institute of Scientific Research, Planning & Surveying, Design & Engineering of Foundations and Underground Facilities (NIIOSP), Moscow, Russia

Abstract: Based on analysis of modern concepts describing changes in the stress-and-strain state of rocks, it is revealed that the elastic energy is not fully released and residual/own stresses occur in core samples taken out of the rock massif.

The paper describes a model aimed at explanation of causes for residual stresses of the type. The model is composed of two elastic elements that are subject to different states of stresses; it shows major previous stages of formation of the initial state of gravity stresses of the detrital sedimentary rock which were followed by cementation and changes of the state of stresses during unloading. Being an element of the history, the sequence of formation of the rock under the 'loading – cementing' pattern leads to formation of two systems of stresses in the rock elements (according to K. Terzaghi), i.e. effective stresses in the rock matrix (or groundmass) that is subject to main loading, and neutral stresses in the connate fluid that is not involved in the process. Upon hardening of the solution, the effective stresses become bound by the cementing material.

Changes of the stress-and-strain state of the model in case of induced or natural unloading are analyzed on the basis of stress–strain curves that are reconstructed for the rock elements prior to unloading and compared in the same systems of coordinates, and the process of unloading is reviewed with account of the condition of their joint deformation. By applying the method of superposition of the two fields of stresses during unloading, it is possible to reveal the cause-and consequence relationship between the initial state of stresses and the occurrence of own stresses and, subsequently, to trace the self-stress state. The proposed definition ensures a 'transparent' representation of changes of stresses between the model's elements during unloading, changes of the potential energy and distribution of its components after unloading, which provides an explanation of the incomplete release of the potential energy.

Key words: cemented sedimentary rock, state of stresses, unloading, own stresses, model, self-stress state.

Recommended by Yu.L. Rebetsky

Citation: *Moroz A.I.* 2013. A model of the self-stress state of the sedimentary rock and its application to estimation of residual effects. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (4), 435–445. doi:10.5800/GT-2013-4-4-0111.

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ САМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ II РОДА ОСАДОЧНОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

А. И. Мороз

ОАО НИЦ «Строительство» – Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова, Москва, Россия

Аннотация: Анализ современных представлений об изменении начального напряженно-деформированного состояния пород при разгрузке показывает, что в изъятых из массива кернах, как правило, не происходит полной реализации энергии упругой деформации, в образцах возникают остаточные (собственные) напряжения.

В работе представлена модель в виде двух упругих элементов, которые находятся в разных напряженных состояниях, объясняющая возникновение остаточных напряжений второго рода. Модель отражает главные стадии предыс-

тории формирования начального гравитационного напряженного состояния осадочной обломочной породы с последующей цементацией и изменение этого состояния при разгрузке. Последовательность образования породы по схеме «нагружение – цементирование» приводит к возникновению в ее элементах двух систем напряжений (по К. Терцаги): эффективных – в скелете, который воспринимает основную силовую нагрузку, и нейтральных – в жидкой фазе, в этом процессе не участвующей. После твердения жидкого раствора эффективные напряжения оказываются связанными цементирующим материалом.

Выполнен анализ изменения напряженно-деформированного состояния модели при разгрузке, носящей техногенный или природный характер, с помощью графоаналитического построения, в котором зависимости «напряжение – деформация» для элементов породы перед разгрузкой совмещены в единой системе координат, а процесс разгрузки рассмотрен из условия совместности их деформаций. Метод суперпозиции двух полей напряжений при разгрузке позволил проследить причинно-следственную связь начального напряженного состояния и образования собственных напряжений и, соответственно, самонапряженного состояния. Представленное построение делает «прозрачным» изменение напряжений между элементами модели в процессе разгрузки и потенциальной энергии и распределение ее составных частей после разгрузки, объясняющее неполную реализацию потенциальной энергии.

Ключевые слова: осадочная сцементированная горная порода, напряженное состояние, разгрузка, собственные напряжения, модель, самонапряженное состояние.

1. Введение

Природа образования и распределения напряжений в породном массиве, механизмов их формирования и поведения в различных условиях, а также происходящих при этом вариаций напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород остается до сих пор предметом дискуссий исследователей. Описание протекающих в массиве процессов выполнено на основе модельных представлений, степень адекватности которых в значительной мере определяет достоверность получаемых результатов.

Для описания НДС породных массивов применяют методы, разработанные на основе механики сплошной среды для искусственных материалов [*Ruppeneyt, 1954; Ruppeneyt, Lieberman, 1960*]. Еще А. Надаи отмечал, что граниты и базальты, сначала находившиеся в расплавленном состоянии, во многом напоминают литые металлы, имея также высокую прочность на сжатие и сходные НДС [*Nadai, 1954*]. Прочные осадочные породы возникли в процессе, в известной мере аналогичном технологии металлокерамики, когда отдельные частицы несвязных масс сначала отлагались по берегам древних морей, затем уплотнялись под тяжестью новых пластов и цементировались в плотный песчаник [*Nadai, 1954*]. Такие подходы, ставшие традиционными, предполагают, что при снятии внешних нагрузок (в результате техногенного или природного воздействия) полностью реализуется накопленная потенциальная энергия породы, т.е. после разгрузки внутренние напряжения равны нулю.

Данные предпосылки принимаются во внимание и при определении физических свойств пород, извлеченных из массива, в лабораторных условиях независимо от времени начала испытаний, с учетом того, что свойства материала породы в массиве и образцах полностью идентичны по основным информативным показателям. Такое положение объяснялось, по-видимому, отсутствием представлений, даже гипотетических, о том, что в некоторых случаях сама порода при разгрузке или после нее может проявлять «активность», связанную с ее переходом в новое напряженное состояние с собственными напряжениями. Их часто называют остаточными из-за того, что они могут существовать в равновесии внутри твердого тела после снятия внешней нагрузки с его границ. В теории упругости остаточные напряжения известны как начальные, а состояние с такими напряжениями получило название «самонапряженное» [*Timoshenko, 1972*].

Следует отметить, что в твердом теле различают остаточные напряжения I, II и III рода [*Ponomarev, 2008*], поэтому в общем случае по аналогии с остаточными напряжениями самонапряженное состояние (СНС) может быть также трех родов: I (макроскопическое), II (микроскопическое), III (субмикроскопическое). СНС I рода (локальное) уравновешивается остаточными напряжениями в отдельных областях, размеры которых велики по сравнению с размерами элементов структуры (зерен). Параметры СНС II рода (совмещенного) относятся к структурным элементам (зернам, заполнителю и др.). СНС III рода захватывает объемы, размеры которых намного меньше размеров составляющих микроструктуры (находятся в атомно-кристаллической решетке).

В научной литературе исследования, главным образом эмпирические, посвященные остаточным напряжениям в различных искусственных материалах (бетонах, металлах и др.) в основном первого рода, представлены достаточно широко. В них показана значимость собственных напряжений при построении моделей деформирования и разрушения конструкций из этих материалов, примеры которых из практики мож-

но найти в технической литературе. Например, в работе [*Ponomarev, 2008*] отмечено внезапное разрушение стальных балок и стволов орудий, мостовых ферм, сварных корпусов кораблей, хрустальных изделий, фарфора в процессе обжига и др. Таким образом, системы уравновешенных внутри тела напряжений возникают при различных механических, физических, химических и иных процессах.

Особое место в этом перечне в связи с травмами и даже гибелью людей занимают горные породы, которые до своей разгрузки подвергались практически всем известным природным процессам. На практике при вскрытии свободных поверхностей в породных массивах обнаруживаются снижение прочности пород, дезинтеграция, горные удары, саморазрушение и др. Указанные изменения пород, которые до сих пор считают аномальными, явились основанием для их изучения, особенно в последнее время [*Aitmatov, Kazakbaeva, 2012; Aitmatov, 2003; Bridgman, 1955; Vlokh et al., 1972; Gamsakhurdia, 2000; Moroz, 2004; Rebetsky, 2008; Revuzhenko et al., 2005; Stavrogin, Shirkes, 1986; Uskov, 2000; Goodman, 1989; Mitchell, Soga, 2005*].

Анализ результатов исследований показал, что в подавляющем большинстве случаев при разгрузке кернов, породы на контуре выработки и др. не происходит полной реализации энергии упругой деформации. Разработанные подходы для искусственных материалов в механике сплошной среды, автоматически перенесенные для описания НДС породных массивов и его изменения при разгрузке, требуют корректировки, уточнения или, возможно, доработки.

Следует отметить, что появление остаточных напряжений связывают в основном с техногенным вторжением в массив, при котором изменяются условия залегания породы (напряженное состояние, температура, давление и др.) и иные факторы (действие тектонических напряжений, физико-химические превращения осадочного массива при генезисе, различие свойств структурных элементов породы и т.п.). Рассмотрены и природные механизмы образования остаточных эффектов, в частности вертикальный подъем локальных областей массива породы из-за эрозии поверхности [*Rebetsky, 2008*]. В результате подъема полученные породами на глубине добавочные горизонтальные напряжения приводят к увеличению уровня горизонтального сжатия по сравнению с уровнем, ожидаемым по гравитационному типу напряженного состояния в рамках гипотезы А.Н. Динника. Следует отметить, что в работе [*Rebetsky, 2008*], как и в других известных работах, например [*Aitmatov, Kazakbaeva, 2012; Aitmatov, 2003; Bridgman, 1955; Vlokh et al., 1972; Gamsakhurdia, 2000; Rebetsky, 2008; Revuzhenko et al., 2005; Stavrogin, Shirkes, 1986; Uskov, 2000; Goodman, 1987*], рассматривается самонапряженное состояние первого рода, возникающее в отдельных областях породного массива.

2. Модель самонапряженного состояния осадочной породы

Одной из возможных причин возникновения собственных напряжений второго рода, совмещенных в каждой точке, является предыстория формирования природного НДС в условиях гравитации и связанная с ней последовательность приложения внешней нагрузки на элементы породы. Рассмотрим этот «природный способ» на примере образования осадочной обломочной породы с последующей цементацией – песчаника. Практически так же, как в [*Nadai, 1954*], в фундаментальных курсах геологии [*Bradshaw, 1977; Gorshkov, Yakushova, 1973*] изложена следующая сущность процесса образования песчаника. Отложившийся обломочный материал сначала постепенно сдавливался вышележащими, более поздними, слоями осадков с вытеснением воды из пор и заполнением их связующим раствором, который затем твердел в порах деформированного и уплотненного высоким давлением скелета (рис. 1, *а*, *б*).

Из приведенного описания следует, что перед цементацией среда состояла как минимум из двух фаз – твердой и жидкой, которые являлись носителями своих систем напряжений, известных из механики грунтов как две системы напряжений в грунтовых массах, состоящих из скелета и полностью заполненных водой пор (концепция К. Терцаги) [*Terzaghi, Peck, 1958*]. Согласно этой концепции в грунтовых массах в условиях открытой схемы (с возможностью выхода воды из пор при приложении внешнего давления) одновременно действуют две системы напряжений: эффективные ($\sigma_Э$) – в скелете, которые передают давление нижележащим слоям, воспринимая основную силовую нагрузку, и нейтральные ($\sigma_Н$), в этом процессе не участвующие. При этом полное напряжение равно:

$$\sigma = \sigma_Э + \sigma_Н. \quad (1)$$

Таким образом, на начальном этапе генезиса осадочная порода состоит из нагруженного скелета и жидкой фазы, и, по аналогии с грунтовой массой, в ней действуют две системы напряжений. При этом на поверхности фрагментов породы вне контактов действуют только нормальные напряжения при полном отсутствии касательных. После замещения воды жидким цементирующим раствором и его твердения образуется новая структура породы, особенность которой состоит в том, что в цементирующем заполнителе пор скелета действуют напряжения гидростатического давления. При снятии внешнего давления на контуре образца породы или выработки в деформации новой среды включается и система напряжений в заполнителе: по всей поверхности фрагментов породы возникает вектор усилий. Это означает, что после цементирования порода является носителем нового качества, способным сопротивляться растягивающим и касатель-

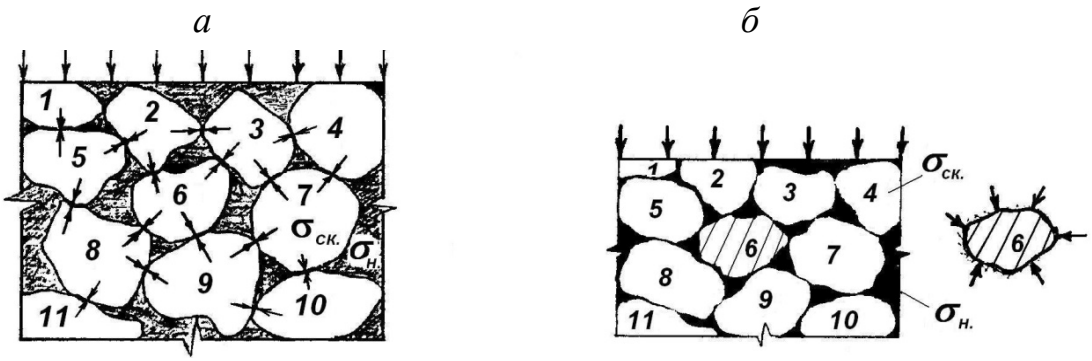

Рис. 1. Схема изображения процесса образования осадочной обломочной породы: *а* – сжатие зерен (1…11) скелета внешней нагрузкой; *б* – последующее твердение цементного раствора в порах сжатого скелета (показано темным цветом) породы.

Fig. 1. A scheme of the process of formation of the detrital sedimentary rock: *a* – compression of grains (1…11) comprising the matrix due to external load; *б* – subsequent hardening of cement in pores of the compressed (dark-coloured) matrix of the rock.

ным напряжениям. В предположении сохранения этих систем рассмотрим на модели процессы, которые начинаются при уменьшении внешнего давления (по контуру образца после изъятия его из массива или при снятии напряжений по контуру выработки), приводят к образованию собственных напряжений и представляют интерес для практики. При построении модели учитывалось: формирование двухсистемного НДС по К. Терцаги [*Terzaghi, Peck, 1958*] в результате последовательности «нагружение – цементирование», а также общепринятое положение о том, что порода, в том числе раздельно-зернистая, независимо от цикла нагружения, является накопителем упругих деформаций (рис. 2), которые реализуются при разгрузке [*Trofimov et al., 2005; Boldyrev, 2008*].

При этом факторы (фазовый переход, структурные и физико-химические изменения), влияющие на процесс набора прочности цементирующего раствора, и иные (газы, температура и т.п.), вносящие некоторый вклад в изменение НДС, в работе не рассматриваются.

Вышеперечисленным особенностям соответствует модель в виде двух упругих элементов (рис. 3, *а–г*), находящихся в разных напряженных состояниях. Она отражает главные стадии формирования НДС породы, образованной по приведенной выше схеме, и его изменения при разгрузке. Принятая для анализа упрощенная модель позволяет наглядно проследить причинно-следственную связь начального НДС и образования собственных напряжений. На ее основе в дальнейшем можно будет также исследовать более сложные случаи природного НДС породы.

Элемент $П_1$, моделирующий скелет, первоначально сжимается внешней нагрузкой P, воспринимая ее. Он показан толстой линией. Отражающий цементирующий материал несжатый элемент $П_2$ обозначен тонкой линией, причем размеры его и сжатого элемента точно совпадают. В результате твердения цементного заполнителя, что на модели отражено скреплением по всей длине элементов, образуется новая система $П_1 + П_2$, напряженное состояние которой характеризуется тем, что усилие в элементе системы $П_1$ равно P_1, а в элементе $П_2$ – нулю.

Очевидно, что теперь при уменьшении внешней нагрузки сжатый элемент $П_1$ попытается распрямиться и вернуться в исходное до нагрузки положение. При этом в силу скрепления элементов он начнет растягивать несжатый элемент, который, в свою очередь, окажет сопротивление элементу $П_1$. Процесс их взаимодействия, сопровождаемый реализацией упругих деформаций элемента $П_1$, величина которых будет зависеть от жесткостных параметров элементов $П_1$ и $П_2$, прекратится, когда усилия сжатия и растяжения в элементах станут равными по абсолютной величине. В случае, если элемент $П_2$ будет абсолютно жестким, приращений деформаций системы $П_1 + П_2$ происходить не будет, а при нулевой жесткости элемента $П_2$ произойдет полная реализации энергии упругих деформаций элемента $П_1$. В данном случае при упрощении жесткостные характеристики элементов модели одинаковы, после разгрузки из-за сопротивления элемента $П_2$ система придет в какое-то новое промежуточное положение (рис. 3, *б*), при котором усилия (разных знаков) в элементах сравняются и развитие деформаций прекратится. В силу совместности деформаций оба упругих элемента получат общее перемещение Δh, численное значение которого в общем случае может быть определено, если известны их жесткостные характеристики и величина усилия сжатия первого элемента.

Таким образом, снятие внешней нагрузки с модели с двухсистемным напряженным состоянием приводит к частичной реализации энергии упругой деформации первого элемента, обладавшего сжимающими напряжениями. И, если бы не было препятствия в виде реак-

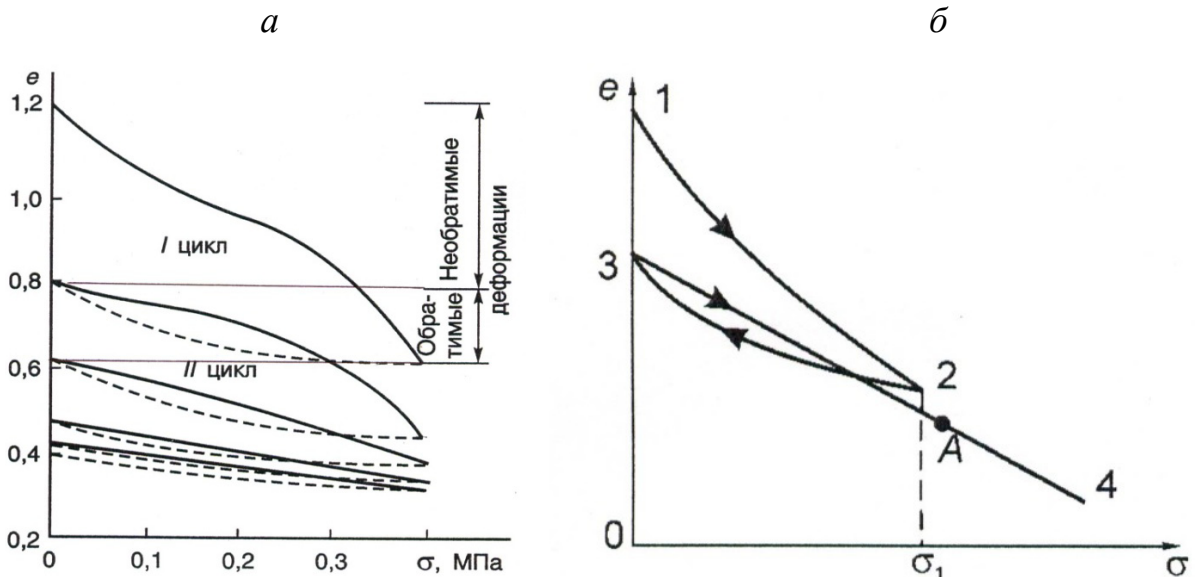

Рис. 2. Компрессионные зависимости несцементированной породы по [*Trofimov et al., 2005*] – (*а*) и [*Boldyrev, 2008*] – (*б*).

Fig. 2. Compression curves of the uncemented rock according to [*Trofimov et al., 2005*] (*a*) and [*Boldyrev, 2008*] (*б*).

ции второго элемента, он вернулся бы в соответствующее его разгрузке положение (на высоту *h*) и пришел бы в ненапряженное состояние. Однако после разгрузки элементы будут обладать остаточными напряжениями.

Очевидно, без знания предыстории формирования напряженного состояния можно сделать вывод, что после разгрузки модели внутренние напряжения отсутствуют. Однако приведенная схема демонстрирует одну из возможных причин появления остаточных совмещенных систем напряжений (сжимающих и растягивающих) в элементах модели, если рассмотреть их НДС по отдельности (рис. 3, *в*, *г*). Негативное следствие самонапряженного состояния состоит в том, что превышение предела прочности второго элемента приведет к разрушению модели со скрепленными элементами с реализацией дополнительных деформаций, при этом при разгрузке возможно и «выстреливание» этих элементов.

Следует отметить, что на последовательность нагружения породы (до цементации скелета или после нее) обращено внимание, в частности, в [*Mitchell, Soga, 2005*], где отмечается, что при разгрузке осадочной сцементированной после сжатия скелета породы в зависимости от прочности на растяжение цементирующего элемента теоретически возможно разрушение связей.

Длительность периода формирования породы не ограничивает возможности применения модели, поскольку энергия упругих деформаций не исчезает, а происходящие постоянно природные процессы в массиве генерируют ее вновь и возобновляют потенциальную энергию. Это подтверждается известными фактами поднятия подошвы карьеров и дна глубоких котлованов после выемки пород и др.

3. Эмпирические данные о «консервации» напряжений

Возможность относительной консервации эффективных напряжений нейтральными при извлечении образцов пород ниже уровня подземных вод отмечали на основе анализа грунтовой массы еще Н.М. Герсеванов и Д.Е Польшин [*Gersevanov, Pol'shin, 1948*]. Они указывали, что такое состояние является крайне неустойчивым. Впоследствии при замене воды затвердевшим заполнителем его связывающее влияние на деформации скелета при разгрузке установлено в НИИОСП им. Н.М. Герсеванова с участием автора (рис. 4). На этом рисунке для сравнения приведены экспериментальные зависимости разгрузки песка и песчано-цементных образцов, твердевших под давлением на скелет. При проведении опытов оказалось сложно насытить цементным раствором сжатый скелет, поэтому был приготовлен цементно-песчаный раствор, который помещали в форму; в ее стенках и верхней плите были сделаны отверстия, через которые «лишний» раствор при нагружении образца выдавливался наружу. Таким образом, при твердении цемента внешняя нагрузка передавалась только на скелет. Разгрузка осуществлялась ступенями с определением приращений деформаций.

Анализ полученных данных показал, что при разгрузке величина упругих деформаций сцементированного сжатого давлением скелета уменьшается до двух

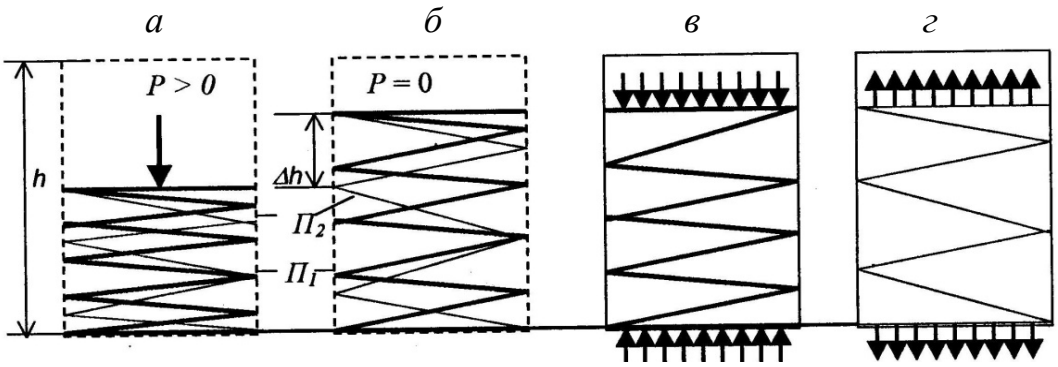

Рис. 3. Структурная модель из двух упругих элементов: *а* – сжатие элемента $П_1$ внешней силой *P* и скрепление его с несжатым элементом $П_2$; *б* – снятие силы *P; в* и *г* – остаточные механические напряжения в элементах $П_1$ и $П_2$.

Fig. 3. The structural model composed of two elastic elements: *а* – compression of element $П_1$ due to external force *P* and its cementation with uncompressed element $П_2$; *б* – release of external force *P*; *в* and *г* – residual mechanical stresses in elements $П_1$ and $П_2$.

раз по сравнению с незатвердевшим цементным раствором. Величина остаточных напряжений составляет примерно 20 % от давления сжатия (5 МПа) скелета для образцов с прочностью В30, которая определена с учетом связи напряжений и деформаций на графике построением перпендикуляра из точки разгрузки сцементированного образца (т. С) до пересечения с зависимостью разгрузки песка (т. C_1) и соответствует отрезку $0C_2$ [*Moroz, 2004*]. Таким образом, анализ результатов экспериментов показывает, что имеется связь последовательности образования материала геосреды при формировании ее начального НДС и появления остаточных напряжений после разгрузки геоматериала. Более того, как показали результаты других экспериментов, увеличение нагрузки на скелет в несколько раз приводит даже к саморазрушению образцов после разгрузки [*Moroz, 2004*].

4. Графоаналитическое описание самонапряженного состояния

При описании процесса возникновения самонапряженного состояния отметим, что образовавшуюся породу по схеме «нагружение – цементирование» можно рассматривать как сплошную, изотропную и однородную, являющуюся носителем двух совмещенных однородных полей напряжений, и для любой ее точки полное напряжение определится, как и в (1), суммой напряжений в системах I и II:

$$\sigma = \sigma^{(I)} + \sigma^{(II)}. \qquad (2)$$

Начальные и граничные условия при исследовании изменения напряженно-деформированного состояния породы в процессе разгрузки – следующие. Образец породы расположен на глубине $z = h$ в упругом полупространстве. Напряженное состояние обусловлено только гравитационными силами, гидростатическое давление в заполнителе принято атмосферным. Процесс разгрузки можно представить удалением всей толщи массива в условиях отсутствия боковых дефор-

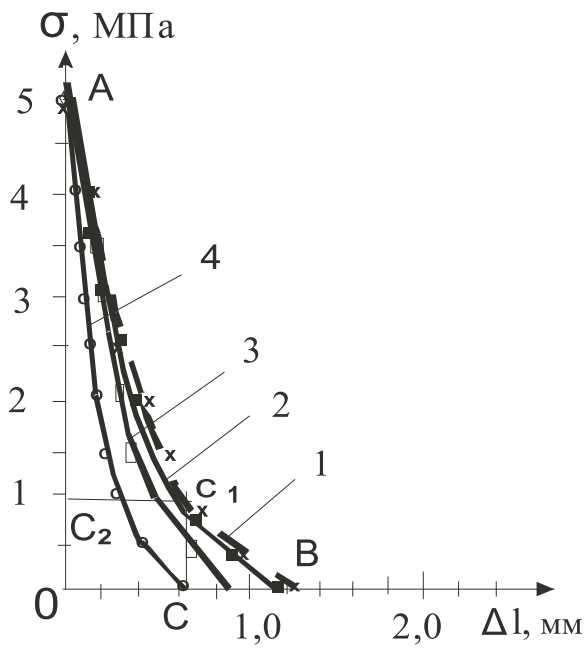

Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\sigma=f(\Delta l)$ при разгрузке песка (скелета породы) (1) и сцементированных после сжатия скелета образцов: с незатвердевшим раствором (2), с прочностью В10 (3), с прочностью В30 (4).

Fig. 4. Empirical relations $\sigma=f(\Delta l)$ for unloading of sand (rock matrix) (1) and samples with the matrix cemented due to compression with non-hardened solution (2), strength B10 (3), and strength B30 (4).

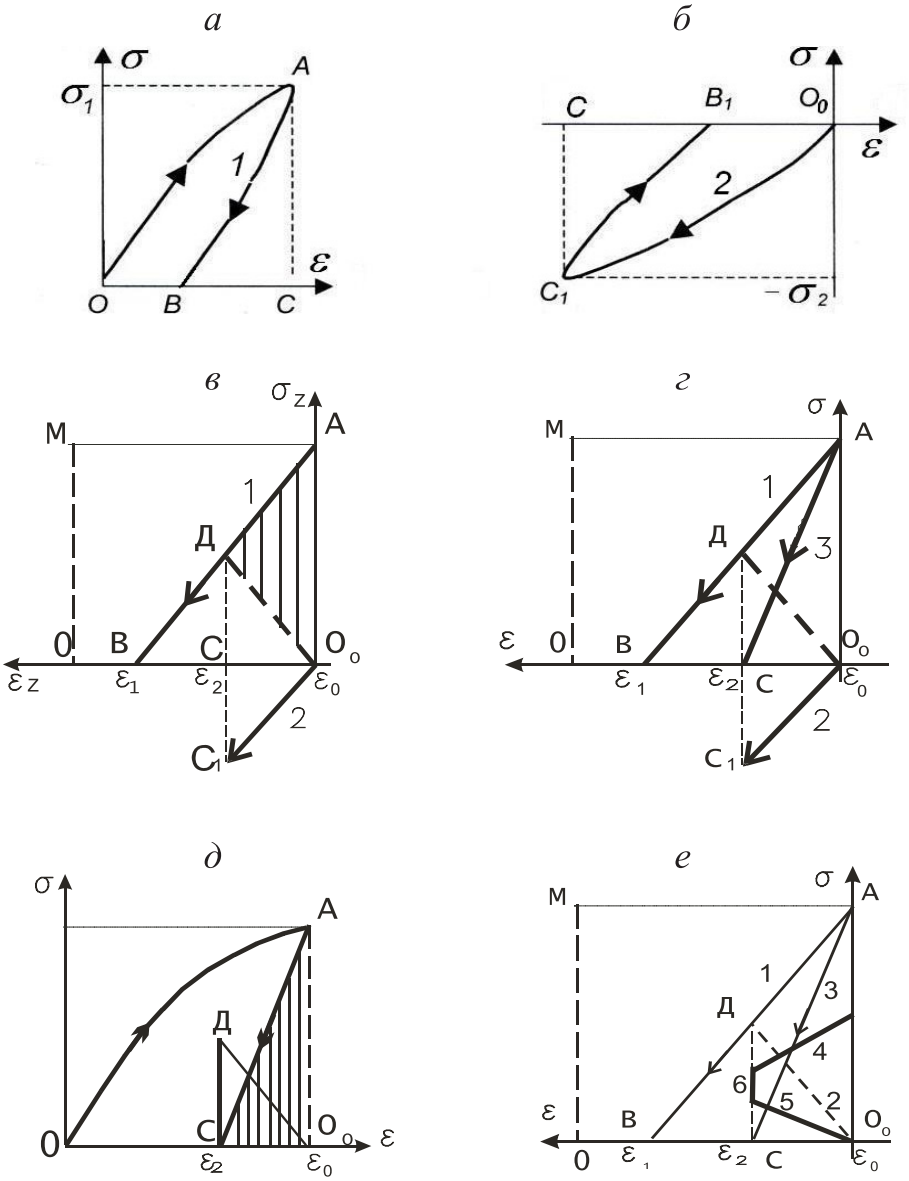

Рис. 5. Графическая интерпретация формирования самонапряженного состояния: зависимости «напряжение – деформация» для элементов породы (*а* и *б*), их совмещение в общем начале координат (*в*), получение при разгрузке результирующей зависимости *3* (*г*) и остаточных напряжений (*д*) и (*е*).

Fig. 5. Graphical interpretation of formation of the self-stress state: stress-strain curves for elements of the rock (*а* and *б*), their superposition at the common datum point (*в*), dependence *3* (*г*) and residual stresses (*д* and *е*) resulting from unloading.

маций $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ или проходкой выработки, в подошве которой находится образец породы. Распределение горизонтальных составляющих напряжений с малыми размерами сторон образца можно принять равномерным. Исследование процесса разгрузки выполним с помощью графоаналитического метода.

В общем случае деформационные параметры представленных на модели элементов породы (см. рис. 3), если рассматривать их по отдельности, отражаются экспериментально установленными для сжатия, растяжения и уменьшения нагрузки твердого тела графиками (рис. 5, *а*, *б*).

При определении зависимости между внешней нагрузкой и деформациями и перераспределением напряжений в элементах учитывалось, что в результате цементации порового пространства образуются прочные связи между элементами породы. Это позволило зависимости *1* и *2* разгрузки первого элемента и нагрузки второго совместить с общим началом координат O_0, приняв их в дальнейших построениях линейными (рис. 5, *в*), и равенство деформаций элементов породы (*х*), означающее, что при разгрузке энергия упругой деформации сжатого элемента, воздействуя на второй элемент, вовлекает его в деформации растяже-

ния, которые прекратятся, когда напряжения разных знаков в элементах сравняются:

$$x_i = x^{(I)} = x^{(II)} \quad (i = x, y, z). \tag{3}$$

Текущее значение напряжения в этом случае равно:

$$\sigma_i = \sigma^{(I)} - \sigma^{(II)}. \tag{4}$$

Далее, чтобы привести график к «привычному» виду, строим зеркальное отражение зависимости *2* на рис. 5, *в*, относительно оси ε, оно определяет точку *Д* равенства напряжений разных знаков $ДС = СС_1$ полной разгрузки. Заштрихованная область (между лучами *АД* и $O_OД$) определяет изменение внешней нагрузки при разгрузке. Проекция т. *Д* на ось ε (в т. *С*) и перенос на нее всех ординат между *АД* и $O_OД$ определяют зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ *3* (рис. 5, *г*), которую получают в «привычном» виде, если значения внешней нагрузки откладывать при разгрузке от оси деформаций. Однако без знания истории образования среды фактические ординаты внутренних напряжений (отрезок ДС на рис. 5, *д*) неизвестны. Остаточные боковые напряжения отражены на рис. 5, *е*, линией *6*.

Выполненное построение наглядно демонстрирует причину появления собственных напряжений: двухсистемное напряженное состояние перед началом уменьшения внешней нагрузки.

5. Потенциальная энергия при разгрузке

При совместной деформации элементов, слагающих горную породу, в процессе разгрузки в первой системе частично связывается ранее накопленная энергия упругих деформаций, во второй – заново аккумулируется некоторое количество энергии, обусловленное действием на нее первой системы. В результате порода в целом обладает внутренней энергией, равной сумме энергий в системах, что можно показать на графике, используя приведенные на рис. 5, *г*, построения.

При разгрузке зависимости между напряжениями и деформациями в общем случае могут быть нелинейными и представлены функциями: *1* – $f_I(\varepsilon)$ для 1-го элемента, *2* – $f_{II}(\varepsilon)$ для 2-го элемента и *3* – $f_{III}(\varepsilon)$ для результирующей зависимости (рис. 6, *а*). Площади фигур, ограниченных зависимостями *1–3*, отражают не что иное, как удельную работу деформации, а значит, потенциальную энергию, накапливаемую в среде в результате упругой деформации, вызванной действием внешних сил. Запасенная энергия, которая может быть реализована при разгрузке, отражается фигурой ABO_0, если пренебречь другими видами энергии.

Часть ее, ограниченная $\Delta ДВС$, не реализуется из-за сопротивления второго элемента. Площадь, ограничиваемая результирующей зависимостью *3* в диапазоне изменения деформаций от ε_0 до ε_2, определяется зависимостями для отдельных систем напряжений в этом интервале, поэтому

$$\int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_1(\varepsilon_0 - \varepsilon)\, d\varepsilon - \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_{II}(\varepsilon_0 - \varepsilon)\, d\varepsilon = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_{III}(\varepsilon_0 - \varepsilon)\, d\varepsilon, \tag{5}$$

где f_I, f_{II}, – зависимости между напряжениями и деформациями соответственно для скелета при разгрузке и цементирующего материала при нагружении, если бы процесс проходил независимо; f_{III} – результирующая зависимость при совместном участии компонент (порода стала единым материалом) в цикле разгрузки.

Для случая, когда эти зависимости являются линейными (что для определения фактического перераспределения внутренних усилий не вносит существенной погрешности), в допредельном состоянии диаграмма распределения потенциальной энергии после разгрузки образца имеет вид (рис. 6, *б*). Она может быть представлена в виде суммы площадей треугольников *4* (остаточная энергия первого поля) и *2* (или, что то же самое, *3* – эту часть энергии накопило в процессе разгрузки второе поле):

$$\Delta U = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} f_1(\varepsilon)\, d\varepsilon + \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_2} f_{II}(\varepsilon)\, d\varepsilon, \tag{6}$$

где ε – приращение относительных упругих деформаций при разгрузке; ε_0 – относительная упругая деформация в момент начала разгрузки, т.е. условный 0 (или деформация, которую получил скелет при нагружении); ε_1 – величина реализации относительных упругих деформаций скелета без учета цементирующего элемента при разгрузке; ε_2 – величина реализации относительных упругих деформаций сцементированного скелета.

Анализ графика показывает, что с увеличением модуля упругости второго элемента повышается восприятие больших растягивающих напряжений и возрастает доля нереализованной потенциальной энергии после разгрузки и, соответственно, величина собственных напряжений.

6. Самонапряженное состояние и упругое последействие

Кроме устойчивого допредельного состояния возможны различные случаи в зависимости от прочностных характеристик элементов породы, режима разгрузки и других факторов, которые могут быть также отражены с помощью приведенного выше построения. При этом возможно, что в процессе разгрузки среды возникающие биполярные напряжения приблизятся к прочности на растяжение цементирующего материала (отрезок OO_1 на рис. 7). Изменение зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ в случае достижения напряжениями уровня,

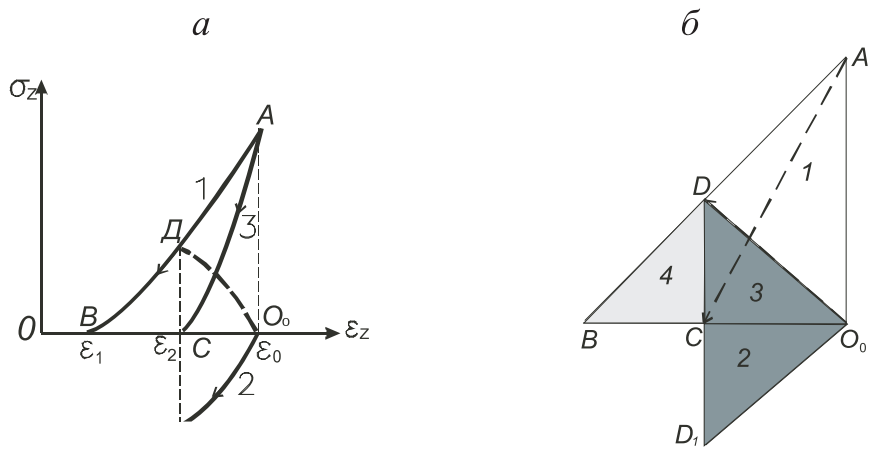

Рис. 6. Зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ при разгрузке для элементов породы (*а*) и схема распределения составных частей потенциальной энергии после разгрузки (*б*).

Fig. 6. Relations $\sigma = f(\varepsilon)$ for unloading of elements of the rock (*a*), and schematic distribution of components of the potential energy after unloading (*б*).

при котором начинается образование дефектов, приводящее к уменьшению прочности, показано на рис. 7, *а*, пунктиром. При этом полная деформация при разгрузке равна:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_i^* + \varepsilon_л, \quad (7)$$

где ε_n – полная относительная деформация до начала упругого последействия, $\varepsilon_л$ – участок линейной относительной деформации, ε^*_i – текущее значение относительной деформации после линейного участка, которая является функцией разности напряжений в системах на нелинейном участке и времени *t*:

$$\varepsilon_i^* = \Phi\ [(\sigma^I - \sigma^{II}), t\ ]. \quad (8)$$

Текущее значение полной деформации определяется формулой:

$$\varepsilon_{n,i} = \varepsilon_л + \varepsilon_i = \sigma^{II}_{пред}/E_2 + \Phi[(\sigma^I - \sigma^{II}), t]. \quad (9)$$

Результирующая зависимость разгрузки отражена ветвью *AC*.

После разгрузки возникшее состояние из-за воздействия остаточных напряжений на цементирующую структуру в дальнейшем может оказаться неустойчивым. В результате со временем начнется новый процесс образования дефектов с уменьшением прочности породы, который будет сопровождаться дополнительными приращениями деформаций, пока не наступит равновесие остаточных напряжений. На рис. 7, *б*, пунктирной линией со стрелкой в окончании показано изменение зависимости между напряжениями и деформациями для связующего материала. Общая деформация уже будет равна $\varepsilon = \varepsilon_п + \Delta\varepsilon_c$, при этом величина приращения деформаций $\Delta\varepsilon_c$, обычно трактуемая как упругое последействие, будет зависеть от уровня остаточных напряжений и прочности цементирующей составляющей на растяжение. Результирующая зависимость разгрузки в этом случае на графике отразится ветвью AB_1B_2. Для учета эффекта самонапряженного состояния традиционная формула может быть записана в общем виде:

$$\varepsilon = \sigma/E + \Delta\varepsilon_c., \quad (10)$$

где $\Delta\varepsilon_c$ – функция разности напряжений в элементах, времени и др.

Формула (10) означает, что полная реализация энергии упругих деформаций породы, образованной в последовательности, рассмотренной в работе, происходит только в частном случае, при котором $\Delta\varepsilon_c = 0$.

7. Выводы

Предложена модель НДС осадочной обломочной породы с последующей цементацией, образованной по открытой схеме «нагружение – цементирование», объясняющая причинно-следственную связь образования самонапряженного состояния породы второго рода с предысторией внешнего силового воздействия при ее генезисе. Самонапряженное состояние характеризуется возникновением остаточных (собственных) напряжений, оказывающих негативное влияние на стабильность свойств породы после разгрузки. Обоснованность модели подтверждена данными экспериментальных исследований с применением схемы формирования напряженного состояния осадочной породы,

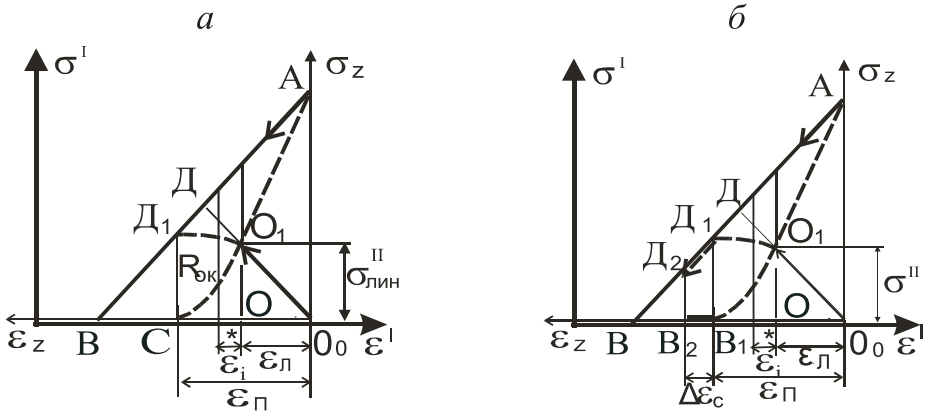

Рис. 7. Графики изменения напряженно-деформированного состояния породы, образованной по схеме «нагружение – цементирование», в случае образования дефектов в процессе разгрузки (*а*) и после разгрузки (*б*).

Fig. 7. Changes of the stress–strain state of the rock formed under the ‘loading – cementing’ pattern in case of formation of defects in the process of unloading (*a*) and after unloading (*б*).

аналогичной объективно реализуемой в природе.

Демонстрирующая одну из возможных причин возникновения собственных напряжений в осадочной породе, модель позволяет поэтапно проследить возникновение собственных напряжений при разгрузке с помощью графоаналитического построения. Принятое построение дает возможность исследовать поведение модели и в допредельном состоянии и при появлении дефектов, в том числе трещин, и объяснить с позиций самонапряженного состояния приращения деформаций после разгрузки.

Условием запуска в действие механизма сложной реализации энергии упругих деформаций является начало разгрузки вследствие техногенного воздействия на породный массив или воздействий природного характера. Относительно естественного изменения НДС следует отметить, что при различных тектонических, геохимических, сейсмических и иных процессах в некоторых областях породного массива может происходить кратковременный сброс природных напряжений, приводящий к разгрузке. В результате будут возникать собственные напряжения и, соответственно, самонапряженное состояние.

8. Литература / References

Aitmatov I.T., 2003. The role of residual stresses in rocks in the formation of the source of rock bursts and induced earthquakes. In: Geodynamics and geoenvironmental problems of high-mountain regions. Bishkek, Moscow, p. 209–221 (in Russian) [*Айтматов И.Т.* Роль остаточных напряжений в горных породах в формировании очага горных ударов и техногенных землетрясений // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.: Бишкек, 2003. С. 209–221].

Aitmatov I.T., *Kazakbaeva G.O.*, 2012. On the superposition of external and residual stresses in optically active materials. In: Tectonophysics and current issues of the Earth sciences: Proceedings of the conference held on October 8–12, 2012. IPE, Moscow, Vol. 1, p. 25–29 (in Russian) [*Айтматов И.Т.*, *Казакбаева Г.О.* О суперпозиции полей внешних и остаточных напряжений в оптически активных материалах // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов конференции 8–12 октября 2012 г. М.: ИФЗ, 2012 . Т. 1. С. 25–29].

Boldyrev G.G., 2008. Methods for determination of mechanical properties of soils. State-of-the-Art. Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 696 p. (in Russian) [*Болдырев Г.Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.].

Bradshaw M.J., 1977. A New Geology. Nedra, Leningrad, 279 p. (in Russian) [*Брэдшоу М. Дж.* Современная геология. Л.: Недра, 1977. 279 с.].

Bridgman P.W., 1955. The Study of Large Plastic Deformations and Rupture. Foreign Literature Publishing House, Moscow, 390 p. (in Russian) [*Бриджмен П.В.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во “Иностранная литература”, 1955. 390 с.].

Gamsakhurdia G.R., 2000. The System of Geophysical and Petrophysical Studies of the Oceanic Crust by Deep-Water Scientific Drilling: Synopsis of PhD Thesis (doctor of technical sciences). Tver, 35 p. (in Russian) [*Гамсахурдия Г.Р.* Система геофизических и петрофизических исследований земной коры океанического типа при глубоководном научном бурении: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Тверь, 2000. 35 с.].

Gersevanov N.M., Pol'shin D.E., 1948. The Soil Mechanics Theory and Its Practical Application. Stroyizdat, Moscow, 248 p. (in Russian) [*Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е.* Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение. М.: Стройиздат, 1948. 248 с.].

Goodman R.E., 1987. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 232 p.

Gorshkov G.P., Yakushova A.F., 1973. General Geology. Moscow State University Press, Moscow, 592 p. (in Russian) [*Горшков Г.П., Якушова А.Ф.* Общая геология. М.: МГУ, 1973. 592 с.].

Mitchell J.K., Soga K., 2005. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, New Jersey, 577 p.

Moroz A.I., 2004. The Self-Stress State of Rocks. Moscow State Mining University Press, Moscow, 288 p. [*Мороз А.И.* Самонапряженное состояние горных пород. М.: МГГУ, 2004. 288 с.].

Nadai A., 1954. Ductility and Fracture of Solids. Foreign Literature Publishing House, Moscow, 647 p. (in Russian) [*Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во “Иностранная литература”, 1954. 647 с.].

Ponomarev V.S., 2008. Energy Saturation of Geological Medium. In: Proceedings of the Geological Institute of RAS. Nauka, Moscow, Vol. 582, 379 p. (in Russian) [*Пономарев В.С.* Энергонасыщенность геологической среды // Труды Геологического института РАН. М.: Наука, 2008. Вып. 582. 379 с.].

Rebetsky Yu.L., 2008. Mechanism of generation of tectonic stresses in areas high vertical movements. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 1 (11), 66–73 (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 1, № 11. С. 66–73].

Revuzhenko A.F., Lavrikov S.V., Klishin S.V., 2005. A structurally heterogeneous rock massif as a medium with internal energy sources and sinks. In: Proceedings of International Conference «Problems and prospects of development of mining sciences» (1–5 November 2004). Vol. 1: Geomechanics. Institute of Mining Science of SB RAS, Novosibirsk, p. 214–219 (in Russian) [*Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В., Клишин С.В.* Структурно-неоднородный горный массив как среда с внутренними источниками и стоками энергии // Труды Международной конференции: «Проблемы и перспективы развития горных наук» (1–5 ноября 2004 г.) Т. 1: Геомеханика. Новосибирск: Институт горного дела СО РАН, 2005. С. 214–219].

Ruppeneyt K.V., 1954. Some Issues of Rock Mechanics. Ugletekhizdat, Moscow, 383 p. (in Russian) [*Руппенейт К.В.* Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 383 с.].

Ruppeneyt K.V., Lieberman Yu.M., 1960. Introduction to Rock Mechanics. Gosgortekhizdat, Moscow, 356 p. (in Russian) [*Руппенейт К.В., Либерман Ю.М.* Введение в механику горных пород. М.: Госгортехиздат, 1960. 356 с.].

Stavrogin A.N., Shirkes O.A., 1986. Aftereffect in rocks caused by preexisting irreversible deformations. *Journal of Mining Science* 22 (4), 235–244. http://dx.doi.org/10.1007/BF02500847.

Terzaghi K., Peck R., 1958. Soil Mechanics in Engineering Practice. Gosstroyizdat, Moscow, 608 p. (in Russian) [*Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 608 с.].

Timoshenko S.P., 1972. The Course of the Theory of Elasticity. Naukova Dumka, Kiev, 508 p. (in Russian) [*Тимошенко С.П.* Курс теории упругости. Киев: Наукова Думка, 1972. 508 с.].

Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesensky E.A., 2005. Soil Science. Moscow State University Press, Moscow, 1024 p. (in Russian) [*Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А.* Грунтоведение. М.: МГУ, 2005. 1024 с.].

Uskov V.A., 2000. Self-destruction of rocks around underground workings. *Gornyi Zhurnal* (*Mining Journal)* 10, 16 (in Russian) [*Усков В.А.* Саморазрушение пород вокруг подземных выработок // *Горный журнал*. 2000. № 10. С. 16].

Vlokh N.P., Lipin Ya.I. Sashurin A.D., 1972. The study of residual stresses in hard rock. In: Modern problems of rock mechanics. Nauka, Leningrad, p. 186–189 (in Russian) [*Влох Н.П., Липин Я.И., Сашурин А.Д.* Исследование остаточных напряжений в крепких горных породах // Современные проблемы механики горных пород. Л.: Наука, 1972. С. 186–189].

Мороз Алексей Иосифович, докт. техн. наук, заместитель начальника отдела
ОАО «НИЦ «Строительство» – Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова
109428, Москва, Рязанский просп., 59, Россия
Тел.: 89161239438; ✉ e-mail: moroz@niiosp.ru

Moroz, Aleksei I., Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of Department
OJSC Scientific Research Centre “Construction”, Gersevanov Institute of Scientific Research, Planning & Surveying, Design & Engineering of Foundations and Underground Facilities (NIIOSP)
59 Ryazansky ave., Moscow 109428, Russia
Tel.: 89161239438; ✉ e-mail: moroz@niiosp.ru