

УДК 551.242.3:[550.34.01 + 551.242.11]:550.8.052

**СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ
СЕВЕРНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ, ПОЛУЧЕННЫХ
НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И GPS-ДАННЫХ**

Н.А. Сычева, А.Н. Мансуров

Представлены результаты сравнения оценок деформации земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня, полученных на основе сейсмических и GPS-данных. В ходе исследований использовались данные о сейсмотектонических деформациях и скоростях, полученных по GPS-наблюдениям.

Ключевые слова: ось сжатия; угол погружения; сейсмотектонические деформации; режим СТД; тензор скорости деформации; GPS; сдвиг.

**COMPARING ESTIMATES OF EARTH CRUST DEFORMATIONS
DERIVED FROM SEISMIC AND GPS DATA**

N.A. Sycheva, A.N. Mansurov

It is presented the results of comparing estimates of North and Middle Tien-Shan earth crust deformations according to seismic and GPS data. During researches, it is used date about the seismotectonic deformations and velocities of GPS measurement points.

Keywords: pressure axis; plunge angle; seismotectonic deformation; TDS mode; strain rate tensor; GPS; shift.

Введение. Рассматриваемая территория представляет собой сложно построенное, длительно развивающееся складчато-глыбовое горное образование, которое и в настоящее время характеризуется высокой тектонической активностью. На это указывают интенсивные современные движения, амплитуды которых достигают значительных величин, а также высокая сейсмичность.

Очаги землетрясений Тянь-Шаня размещаются главным образом в верхних слоях земной коры. Здесь отмечены многочисленные землетрясения с магнитудой 7 и даже более 8.

В распределении коровых землетрясений с $K > 14$, ($M > 5,7$) можно отметить определенную закономерность. Наиболее сильные землетрясения известны на Северном Тянь-Шане, где они образуют полосу, включающую в себя северный борт поднятия Киргизского хребта и систему поднятий хребтов Заилийского Алатау и Кунгей Алатау. Здесь известны такие сильнейшие землетрясения, как Беловодское (1885, $M = 6,9$), Верненское (1887, $M = 7,3$), Чиликское (1889, $M = 8,3$), Кебинское (1911, $M = 8,2$), Кебино-Чуйское (1938,

$M = 6,9$). На Центральном Тянь-Шане известны землетрясения значительно меньшей интенсивности, за исключением района г. Каракол (Пржевальск), где в 1970 г. произошло землетрясение с $M = 6,8$. Западный Тянь-Шань характеризуется более высокой сейсмической активностью, но землетрясения такой силы, как на Северном Тянь-Шане, здесь не известны. Наиболее сильные, катастрофические Каратагское (1907 г.) и Хаитское (1949 г.) землетрясения имели магнитуду 7,4, а Чаткальское (1946 г.) – 7,5 [1].

В 1991 г. на севере Кыргызстана (Северный Тянь-Шань) была установлена сейсмическая сеть KNET [2] из 10 цифровых широкополосных станций, которая позволила накопить большой массив данных, на основе которых можно производить различные научные исследования, в том числе получать оценки хрупких деформационных процессов, протекающих на исследуемой территории. На рисунке 1 представлено расположение станций сети KNET и эпицентральное расположение сейсмических событий (более 8000), зарегистрированных этой сетью за время ее работы.

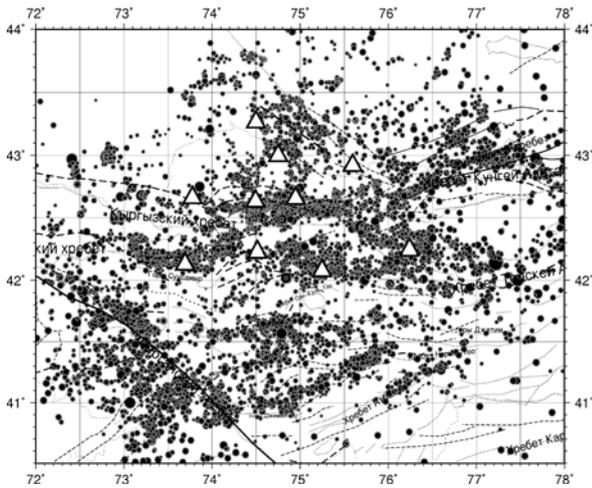


Рисунок 1 – Эпицентральное расположение сейсмических событий (круги, размер – магнитуда) и станций сети KNET (треугольники). Линиями на этом и последующих рисунках показаны разломы по [11]

Для оценки современного напряженно-деформированного состояния Северного и Центрального Тянь-Шаня на основе сейсмических данных на Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) используются различные методы и подходы. В частности, в НС РАН анализ сейсмологических данных выполнялся двумя различными методами: С.Л. Юнги [3] и Ю.Л. Ребецкого [4, 5]. В первом случае на основе СТД-метода рассчитывались параметры тензора приращений сеймотектонических деформаций, а во втором – с применением метода катакластического анализа (МКА) разрывных нарушений, кроме параметров этого тензора определялись также компоненты тензора напряжений. Оба метода основаны на анализе фокальных механизмов очагов. Результаты этих исследований представлены в работах [2–10].

Применение этих методов к сейсмическим данным позволяет получать оценки направления главных осей деформаций, определение вида деформации (коэффициент Лодде-Надаи) и выделять области с различными режимами деформации.

Наличие в Тянь-Шане сильных современных движений и деформаций земной коры было показано методами классической геодезии во второй половине XX в., однако использовавшиеся тогда технологии не могли дать надежной количественной оценки этих движений. Для получения таких оценок в 1992 г. была образована Центральноазиатская GPS-сеть [12], геодезические измерения на которой проводятся с использованием технологии GPS. Для обработки GPS-данных с целью получения оценок скоростей пунктов используется раз-

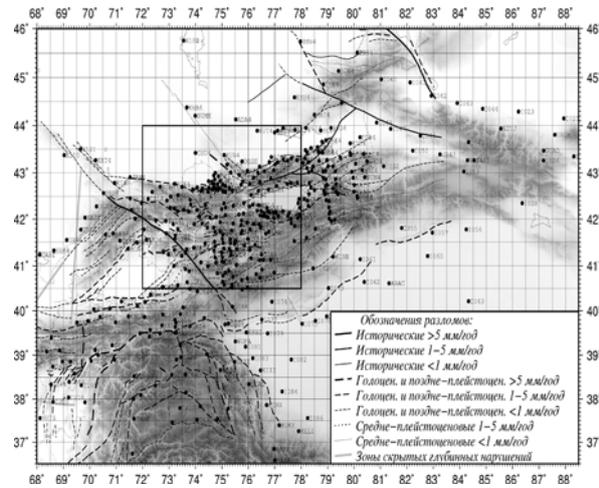


Рисунок 2 – Расположение пунктов наблюдений ЦА GPS-сети, для которых получена оценка вектора скорости современного движения. Прямоугольником выделена зона, рассматриваемая в данной работе

работанный в MIT программный пакет GAMIT/GLOBK [13]. На настоящее время ЦА GPS-сеть содержит более 600 пунктов, для большинства из которых получена надежная оценка скорости движения (рисунок 2).

Для моделирования деформационных процессов в земной коре Тянь-Шаня на основе каталога скоростей пунктов ЦА GPS-сети разными исследователями применялись различные подходы. В частности, в [12] была рассчитана дивергенция поля скоростей, в [14] была использована блочная модель, основанная на положении важнейших региональных разломов, в [15] использован метод статистического выделения малодеформируемых блоков, в [16] использован подход, основанный на вычислении тензора градиента скорости поверхности земной коры.

В данной работе использован подход, подобный [16], позволяющий получить тензор скорости деформации в окрестности любой точки земной коры, что дает информацию о направлении главных осей деформации, ее скорости (относительное изменение площади) и максимально возможных величинах сдвиговых деформаций.

Целью данной работы является сравнение оценок деформационных процессов, протекающих на территории Северного и Центрального Тянь-Шаня, на основе сейсмических и GPS-данных.

Исходные данные и методы. Сейсмические данные и методы. В качестве исходных данных использовали каталог фокальных механизмов очагов 157 землетрясений, произошедших на исследуемой территории с 1996 по 2013 г. с $K > 10.5$. Для определения типа фокального механизма исполь-

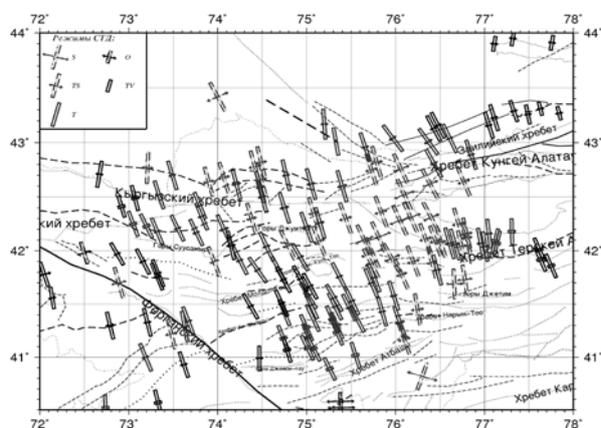


Рисунок 3 – Карта сейсотектонических деформаций. Прямоугольником обозначено направление оси сжатия, стрелочками – направление оси растяжения. Длина прямоугольника и стрелочек определяется проекцией оси сжатия и растяжения на горизонтальную плоскость

зовали метод волновой инверсии [8, 9, 17], а для построения карт СТД-метод сейсотектонической деформации [3, 18].

GPS-данные и методы. В качестве исходных данных использовали каталог скоростей 454 пунктов Центральноазиатской сети GPS-наблюдений. Данный каталог не содержит пунктов, для которых ошибки оценки скорости превосходят 4 мм/год по горизонтальным и 8 мм/год – по вертикальной компоненте.

Для расчета поля тензора скорости деформации использовали метод, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов, предложенный в [19]. Аспекты применения этого метода к использованным в данной работе данным подробно изложены в [20]. Расчет производили с использованием программного комплекса SUR_GPS_STRAINS, который описан в [21].

Сравнение результатов, полученных двумя методами. На рисунке 3 представлена карта СТД, построенная на основе классификации режимов СТД [18], и в левом углу карты представлена легенда, обозначающая режимы деформации, проявляющиеся на исследуемой территории. Согласно представленной карте основная часть осей сжатия имеет северо-северо-западное направление, но имеются небольшие области, в которых направление осей сжатия близко к северному или даже к северо-северо-восточному (Терскей-Алатау и восточная часть Заилийского хребта). Режимом сжатия (Trust) характеризуются области расположения Заилийского хребта, Центральная часть Терскей-Алатау, Восточная часть Киргизского хребта

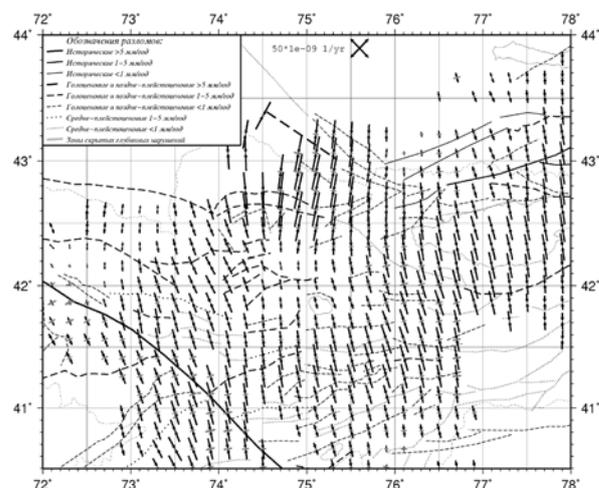


Рисунок 4 – Поле значений тензора скорости деформации земной коры, рассчитанное по данным GPS-наблюдений. Черный цвет показывает сжатие, серый – растяжение

и зона, расположенная параллельно Талассо-Ферганскому разлому, и восточнее от него. В последней зоне в отдельных областях проявляется режим Vertical Trust. Западная часть Иссыкульской впадины и Кочкорская зона характеризуются режимом транспрессии (Transpresion) и Oblique (переходный режим от сжатия к сдвигу) и режимом горизонтальный сдвиг, т. е. для этой области характерно в той или иной степени наличие сдвиговой составляющей.

Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, использовали коэффициент Лодэ-Надаи, который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как инвариант. На рисунке 5, б представлена карта распределения коэффициента Лодэ-Надаи, построенная на основе определения усредненных тензоров деформации. Анализ значений этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией простого сжатия.

Схема классификации режимов СТД [18] основана на параметризации угловых параметров, одним из которых является угол вида напряженного состояния ω [22]. Значение этого угла может меняться от 0 до 180°. Площадное распределение значений угла ω представлено на рисунке 5, в, где его значение по территории меняется от 15 до 75°. Минимальное значение этого угла характерно для зоны, которая расположена восточнее Талассо-Ферганского разлома и параллельно ему. Минимум угла омега может свидетельствовать о преобладающих горизонтальных усилиях в этой области.

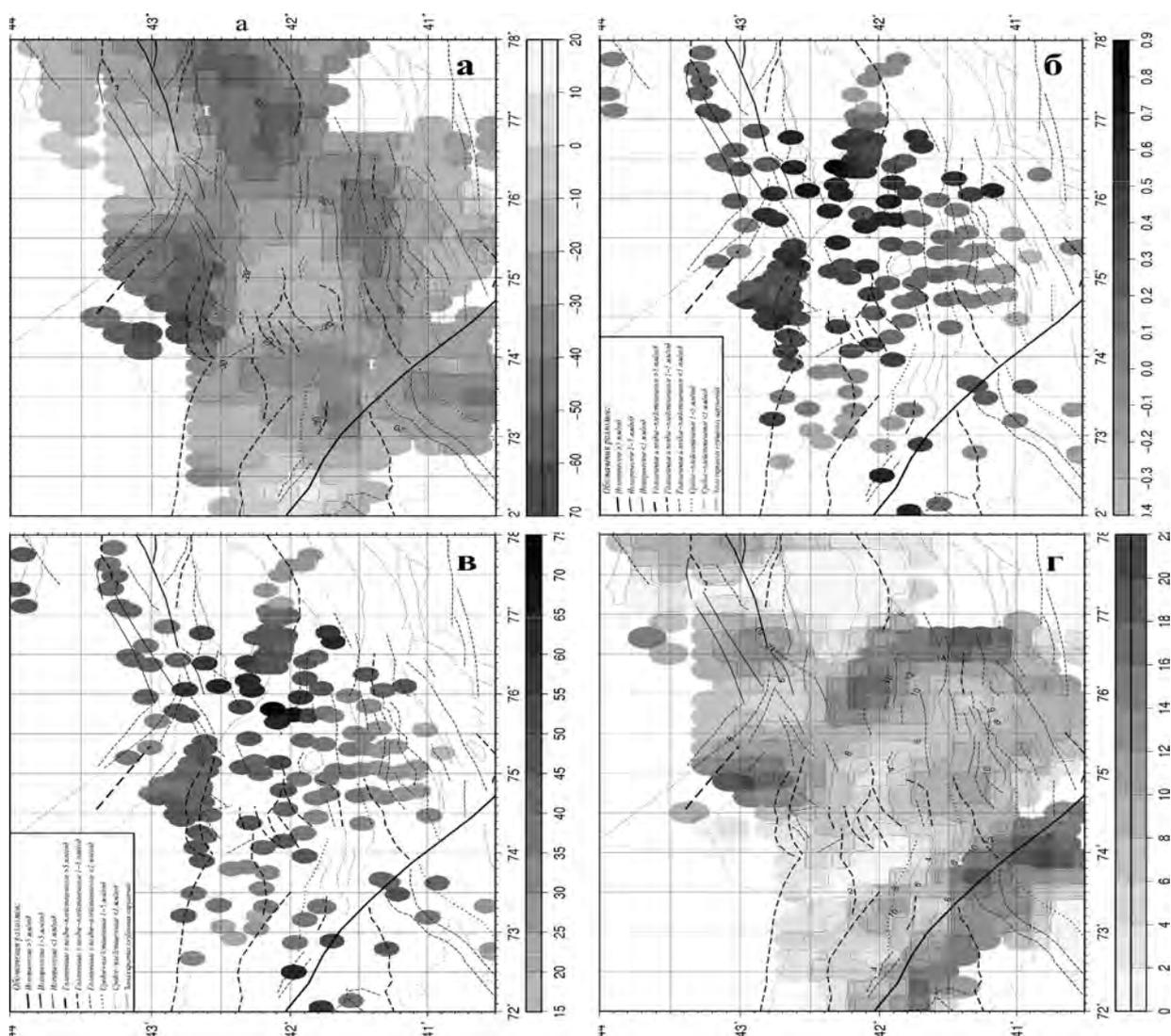


Рисунок 5 – Поля двумерной дилатансии (в масштабе $10^{-9}/\text{год}$) (GPS) (а), коэффициента Лоде-Надаи (сейсмика) (б), угла (сейсмика) (в) и кажущегося двумерного сдвига (в масштабе $10^{-9}/\text{год}$) (GPS) (г)

На рисунке 4 показано поле тензора скорости деформации, полученное по данным GPS. Видно, что доминирующим типом деформации является сжатие по направлению северо-северо-запад. Наибольшие значения сжатия наблюдаются в Чуйской впадине по северо-северо-восточному направлению и в Исык-Кульской впадине по северо-северо-западному направлению. Также на общем фоне выделяются повышенные значения сжатия в Суусамырской, Кетмень-Тюбинской и Нарынской впадинах (езде по северо-северо-западному направлению).

Распределения скалярных характеристик деформации по данным GPS показаны на рисунках

5, а (дилатансия – изменение площади) и 5, г – кажущийся сдвиг. На поле значений кажущегося сдвига отчетливо выделяются две полосы с максимальным уровнем сдвига, простирающиеся в северо-западном направлении, одна из которых проходит по Таласо-Ферганскому разлому, другая – от востока Чуйской впадины, через Кочкорскую и далее на юг или юго-восток. В зоне между этими полосами значения кажущегося сдвига малы.

Сравнение поля дилатансии и распределения коэффициента Лоде-Надаи позволяет отметить, что метод GPS и сейсмический метод выделяют одни и те же зоны с повышенным значением сжатия (рисунок 5, а, б), а зоны максимального значе-

ния поля кажущегося сдвига совпадают с областями проявления режимов СТД, имеющих сдвиговую составляющую.

Заключение. Проведены сравнения оценок напряженно-деформированного состояния Северного и Центрального Тянь-Шаня, полученных на основе сейсмологического (СТД) и геодезического (GPS) методов. В качестве сейсмических данных использовались карты СТД, полученные на основе фокальных механизмов очагов за 1996–2013 гг. и геодезические данные о скоростях GPS-пунктов за период наблюдений 1994–2012 гг. Сравнение оценок двух методов показало, что в целом результаты их хорошо согласуются. Некоторые отличия можно обосновать тем, что сейсмичность содержит данные о хрупкой деформации, а GPS-данные включают в себя все виды деформации, происходящие в земной коре.

Работа выполнялась при частичной поддержке по гранту РФФИ № 15-05-06857а.

Литература

1. Кальметьева З.А. Атлас землетрясений Кыргызстана / З.А. Кальметьева, А.В. Миколайчук, Молдобек Б.Д., М.М. Жанатаев, А.В. Зубович; отв. ред. Н.Н. Михайлова. Бишкек: ЦФИЗ, 2009. 232 с.
2. Сычева Н.А. Сеймотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, В.А. Мухамедиева // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62–78.
3. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций / С.Л. Юнга. М.: Наука, 1990. 191 с.
4. Ребецкий Ю.Л. Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов / Ю.Л. Ребецкий // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 2. С. 93–106.
5. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов / Ю.Л. Ребецкий. М.: Наука. 2007. 406 с.
6. Сычева Н.А. Сеймотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, С.Л. Юнга, В.И. Макаров // Физика Земли. 2008. № 5. С. 3–15.
7. Сычева Н.А. Применение метода волновой инверсии и сеймотектонических деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния территории Центрального Тянь-Шаня / Н.А. Сычева. Настоящий сборник.
8. Костюк А.Д. Механизмы очагов землетрясений средней силы на Северном Тянь-Шане / А.Д. Костюк // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 1. С. 100–105.
9. Костюк А.Д. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костюк, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева, Ю. Яги (Y. Yagi) // Физика Земли. 2010. № 3. С. 52–65.
10. Rebetscy Yu. L. Development of inversion methods on fault slip data Stress state in orogenes of Central Asia / Yu. L. Rebetscy, O.A. Kuchai, N.A. Sycheva, R.A. Tatevossian // Tectonophysics. 2012. Vol. 581. P. 114–131.
11. Современная геодинамика областей внутриматерикового коллизийного горообразования (Центральная Азия) / под ред. В.И. Макарова. М.: Научный мир, 2005. 400 с.
12. Зубович А.В. Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии / А.В. Зубович: дис... канд. физ.-мат. наук. М., 2001. 95 с.
13. Herring T.A. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.35 / T.A. Herring, B.W. King, S.C. McClusky // EAPS. MIT. 2009. 45 p. (English).
14. Миди Б. Дж. Современное распределение деформации в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геодезических данных / Б. Дж. Миди, Б.Х. Хагер // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1622–1633.
15. Кузиков С.И. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центральноазиатской GPS-сети / С.И. Кузиков Ш.А. Мухамедиев // Физика Земли. 2010. № 7. С. 33–51.
16. Костюк А.Д. Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии / А.Д. Костюк // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 3. С. 140–144.
17. Yagi Y. Determination of focal mechanism by moment tensor inversion / Y. Yagi // Tsukuba: IISSE Lecture Note. 2004. 51 p.
18. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу / С.Л. Юнга // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.
19. Shen Z.-K. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements / Z.-K. Shen, D.D. Jackson, B.X. Ge // Journal of Geophysical Research. 1996. № 101. P. 27957–27980.
20. Мансуров А.Н. Поле скорости современной деформации земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня по данным наблюдений ЦА GPS-сети / А.Н. Мансуров. Настоящий сборник.
21. Мансуров А.Н. Структурное проектирование автоматизированной системы расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS-наблюдений / А.Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек. 2012. № 2.
22. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.