

ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI  
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

# SEYSMOLOGIYA MUAMMOLARI

1

---

2019

# ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

*Jurnal 2019 yildan yiliga ikki marta nashr etiladi*

*Журнал издается с июля 2019 г. по 2 номеров в год*

TOSHKENT – 2019

TAHRIRIYAT A'ZOLARI:

K.N.ABDULLABEKOV (bosch muharrir)  
L.A.KHAMIDOV (mas`ul kotib)  
X.A.AKBAROV  
T.U.ARTIKOV  
D.Kh.ATABAEV  
T.L.IBRAGIMOVA  
V.A.ISMOILOV  
S.X. MAKSUDOV  
B.S. NURTAEV  
B.Yu.QURBONOV  
Sh.S.RAJABOV

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

К.Н.АБДУЛЛАБЕКОВ (главный редактор)  
Л.А.ХАМИДОВ (ответственный секретарь)  
Х.А.АКБАРОВ  
Т.У. АРТИКОВ  
Д.Х.АТАБАЕВ  
Т.Л.ИБРАГИМОВА  
В.А.ИСМАИЛОВ  
С.Х.МАКСУДОВ  
Б.С.НУРТАЕВ  
Б.Ю.КУРБАНОВ  
Ш.С.РАДЖАБОВ

Manzil: Toshkent shahri, Shayxontoxur tumanida, Zulfiyaxonim k., 3-uy.  
Tel.: +99871- 241-51-70, 241-32-22; Fax: +99871- 241-74-98.  
E-mail: [seismologiya@mail.ru](mailto:seismologiya@mail.ru);

Jurnal sayti: [www.seismos.uz](http://www.seismos.uz);

Адрес: г.Ташкент, Шайхантахурский район, ул.Зулфияхоним, 3.  
Тел.: +99871- 241-51-70, 241-32-22; Fax: +99871- 241-74-98.  
E-mail: [seismologiya@mail.ru](mailto:seismologiya@mail.ru);

Сайт журнала: [www.seismos.uz](http://www.seismos.uz);

Jurnal O`zbekiston respublikasi Matbuot va axborot agentligida 08.04.2019 yil  
1013 raqami bilan ro`uxatdan o`tgan.

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации  
Республики Узбекистан 08.04.2019  
Регистрационный номер 1013.

## **Seismik havfni baholash va seismik rayonlashtirish**

УДК 550.34

**Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.**

*Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова АН РУз,г.Ташкент,Республика Узбекистан, [ibrroma@yandex.ru](mailto:ibrroma@yandex.ru)*

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

**Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.**

*O`zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G`O. Mavlonov nomli Seismologiya instituti, Toshkent shaxri., O`zbekiston Respublikasi, [ibrroma@yandex.ru](mailto:ibrroma@yandex.ru)*

### **MARKAZIY OSIYO ZILZILALARI MAKROSEYSMIK INTENSIVLIGINING O`ZGARISH QONUNIYATLARI VA ULARNING SEYSMIK XAVFINI BAXOLASHDA FOYDALANISN**

**Аннотация.** Seismik ta'sir intensivligini makroseysmik ballarda baxolash tarixiy seysmiklikni o'rganish va zamonaviy turli masshtabdagi seymik rayonlashtirish xaritalarini yaratish muhim ahamiyatga ega. Tadqiqotning asosiy maqsadi – Markaziy Osiyo xududi zilzilarining makroseysmik maydoni modelini yaratish. Maqolada, nodir makroseysmik ma'lumotlar asosida Bleyk – Shebalin va Kovessheti tenglamalarining koeffitsientini yanada aniqroq aniqlash bilan birga, makroseysmik so'nishni ifodalovchi umumlashgan modeli taklif etilgan. Model makrosesmik intensivlikning so'nishini zilzila masofasi, o'chog'ini chuqurligiga, magnitudasi va boshqa parametrlarga bog'liqligini umumlashgan holda ifodalaydi. Zilzilalarning aylanma izoseystlarini kichik o'q uzunligini katta o'q uzunligiga nisbatini zilzila intensivligiga, magnitudasi va zilzila o'chog'ining chuqurligiga bog'liqligini ifodalovchi emperik bog'lanish ilk bor olingan. Seymik intensivlikning so'nishini ifodalovchi turli qonunlar seymik xavfni baholashga ta'sirini Sharqiy O'zbekiston misolida birinchi marta tadqiq qilingan.

**Тayanch so'zlar:** makroseysmik intensivlik, zilzila o'chog'i, seymik xavf, seymik rayonlashtirish, makroseysmik intensivlikning so'nish qonunlari

**Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.**

*Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова АН РУз, г.Ташкент,Республика Узбекистан, [ibrroma@yandex.ru](mailto:ibrroma@yandex.ru)*

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

**Аннотация.** Оценки интенсивности сейсмических воздействий в баллах макросейсмической шкалы играют важную роль, как для исследования исторической сейсмичности сейсмоактивных территорий, так и для составления и уточнения разномасштабных карт сейсмического районирования, поскольку СНИПы большинства стран постсоветского пространства опираются именно на эту характеристику сейсмических воздействий. Целью исследования является построение адекватной модели макросейсмического поля землетрясений Центральной Азии. В статье, на основе большого объема макросейсмических данных, наряду с уточнением коэффициентов в уравнениях типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети для территории Центральной Азии, предложена обобщенная зависимость затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием с учетом особенностей сейсмических воздействий, обусловленных различной глубиной происходящих землетрясений. Получены соотношения между малой и большой осями эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты, в зависимости от балльности сотрясения, глубины и магнитуды землетрясения. На примере территории Восточного Узбекистана исследован вопрос о влиянии выбора закона затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием на результирующие оценки сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** макросейсмическая интенсивность, изосейсты, законы затухания макросейсмической интенсивности, очаг землетрясения, сейсмическая опасность, сейсмическое районирование/

**Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.**

*Institute of Seismology, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan, [ibrroma@yandex.ru](mailto:ibrroma@yandex.ru)*

### **REGULARITIES OF CHANGES IN MACROSEISMIC INTENSITY OF CENTRAL ASIA EARTHQUAKES AND THEIR USEING FOR SEISMIC HAZARD ASSESSMENT**

**Annotation.** Assessment of intensity of seismic loads in points of a macroseismic scale plays an important role, both for research of historical seismicity of seismic areas and for drawing and specification non-uniformly scaled seismic zoning maps. Research objective is construction of adequate model of a macroseismic field of earthquakes of the Central Asia. In this article on the basis of large volume of the macroseismic data, along with align-

ment of coefficients in Black-Shebalin and Kovesligeti equations for of the Central Asia, it is presented the generalized dependence model of macroseismic intensity attenuation on distance taking into account features of the seismic loads determined by various depth of occurring earthquakes. Interrelations between small and big axes of the ellipse approximating real isoseists, depending on shake's scale point, depths and earthquake magnitudes are obtained. On an example of East Uzbekistan area the issue of influence of a chosen law of seismic influence intensity attenuation with distance on resultants of seismic hazard assessment has been researched.

**Key words:** Macro seismic intensity, isoseists, laws of macro seismic intensity attenuation, seismic source, seismic hazard, seismic zoning

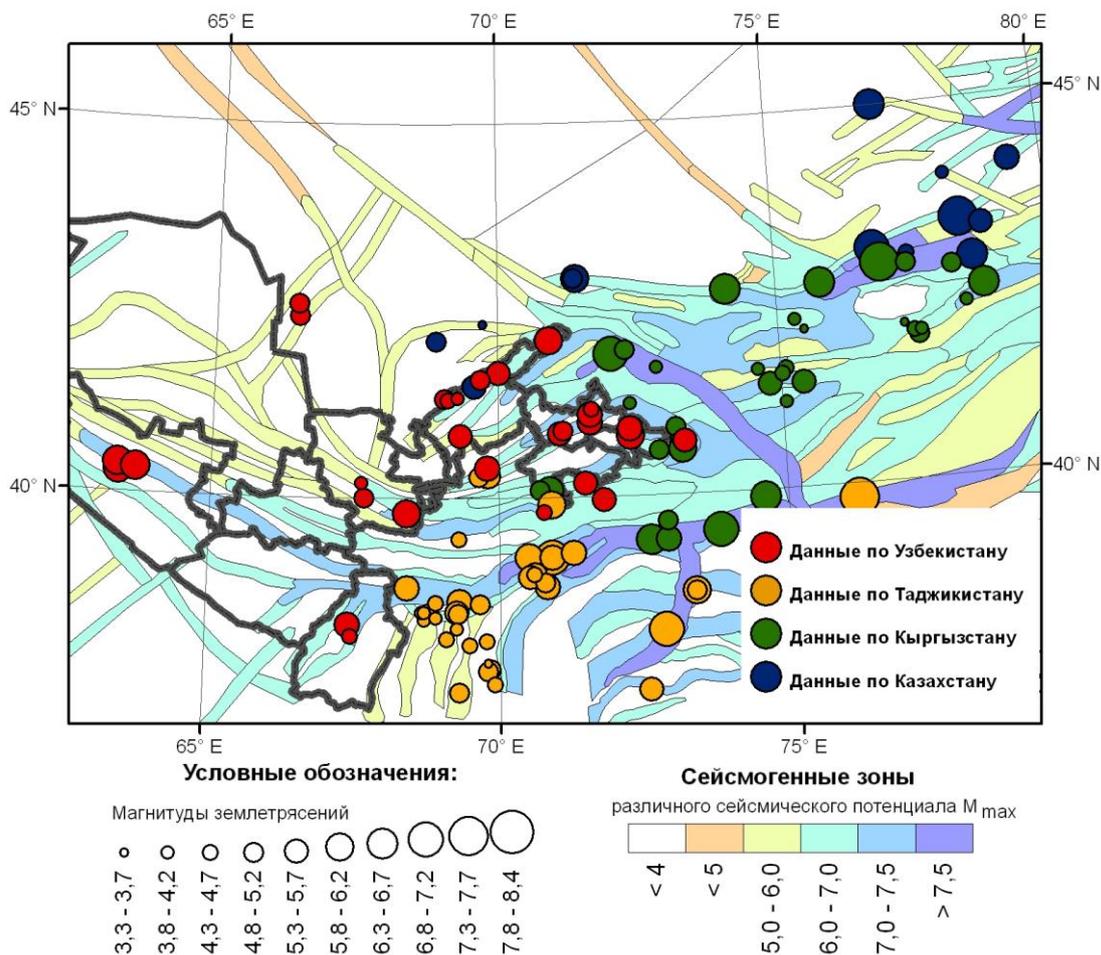
**Введение.** Несмотря на очевидные преимущества оценок сейсмической опасности, представляемых в инженерных показателях колебаний грунта при землетрясениях (смещения, скорости, ускорения и спектральные амплитуды этих параметров), оценки интенсивности сейсмических воздействий в баллах макросейсмической шкалы все еще играют важную роль как для исследования исторической сейсмичности сейсмоактивных территорий [1,2,3 и др], так и для составления и уточнения разномасштабных карт сейсмического районирования, поскольку действующие строительные нормы большинства стран постсоветского пространства существенно опираются именно на эту характеристику сейсмических воздействий [4,5 и др].

К настоящему времени для всей территории Центральной Азии и различных ее регионов предложен ряд уравнений макросейсмического поля, построенных на основе анализа макросейсмических данных последствий ощутимых и сильных землетрясений [6-10]. Наиболее распространенными типами зависимостей затухания макросейсмической балльности  $I$  с ростом гипоцентрального расстояния  $R$  от землетрясения с магнитудой  $M$  являются зависимости вида Блейка-Шебалина [2]  $I=a \cdot M \cdot b \cdot \lg R + c$  и Ковеслигети [11]  $I=a \cdot M \cdot b \cdot \lg R - dR + c$  в виду их простоты и устойчивости решения обратной задачи по нахождению входящих в них коэффициентов. Эти формулы имеют достаточно простой физический смысл. В первой из них предполагается, что уменьшение балльности с удалением от источника происходит за счет расхождения энергии сейсмических волн, во второй учитывается также эффект поглощения средней части выделившейся сейсмической энергии [12]. Вместе с тем, каждая из этих зависимостей в недостаточной степени учитывает особенности проявления макросейсмических воздействий, вызванных различной глубиной заложения очага землетрясения. В частности, эмпирический факт, состоящий в более быстром затухании интенсивности сейсмических воздействий с удалением от источника для землетрясений с малой глубиной очага, по сравнению с землетрясениями, происходящими на больших глубинах, не находит отражение в формулах типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети, в которых коэффициент  $b$ , характеризующий уменьшение балльности с расстоянием, является величиной постоянной.

В данной статье, на основе большого объема макросейсмических данных, наряду с уточнением коэффициентов в уравнениях типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети для территории Центральной Азии, обсуждается обобщенная зависимость затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием с учетом особенностей сейсмических воздействий, обусловленных различной глубиной происходящих землетрясений, а также исследуются соотношения между малой и большой осями эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты, в зависимости от балльности сотрясения, глубины и магнитуды землетрясения. На примере территории Восточного Узбекистана изучен вопрос о влиянии выбора закона затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием на результирующие оценки сейсмической опасности.

**Исходные макросейсмические данные и методика их анализа.** Информационной основой проведенного исследования являлась созданная в Институте сейсмологии АН РУз база макросейсмических данных, включающая схемы изосейст сильных землетрясений Центральной Азии и таблицы «пункты-баллы» изучаемых землетрясений. Электронная версия базы макросейсмических данных начала формироваться с конца 80 - начала 90-х годов прошлого столетия, когда усилиями специалистов из сейсмологических центров республик Средней Азии были унифицированы макросейсмические материалы по каждой территории для построения новой карты сейсмического районирования Среднеазиатской части Советского Союза. Эта карта должна была заменить карту ОСР-78. Имевшаяся по территории Центральной Азии база макросейсмических данных была дополнена схемами изосейст сильных землетрясений, произошедших на территории Узбекистана и в приграничным с ним областях за последние 25 лет (Избаскентское 1992 г.,  $M=5.9$ ; Канское 2011 г.,  $M=6.2$ ; Туябугузское 2013 г.,  $M=5.6$ ; Марджанбулакское 2013 г.,  $M=6.1$ ; Бахмальское 2017 г.,  $M=5.1$  и др.). В итоге, общее число землетрясений, для которых имелись сведения о макросейсми-

ческом обследовании, составило 171 событие. На рисунке 1 представлена карта эпицентров сильных землетрясений территории Центральной Азии, по которым имелись макросейсмические данные, а на рисунке 2 – сводная карта изосейст сильных землетрясений территории Узбекистана и прилегающих к нему территорий, где показаны изосейсты с балльностью  $I \geq 6$  по шкале MSK-64.

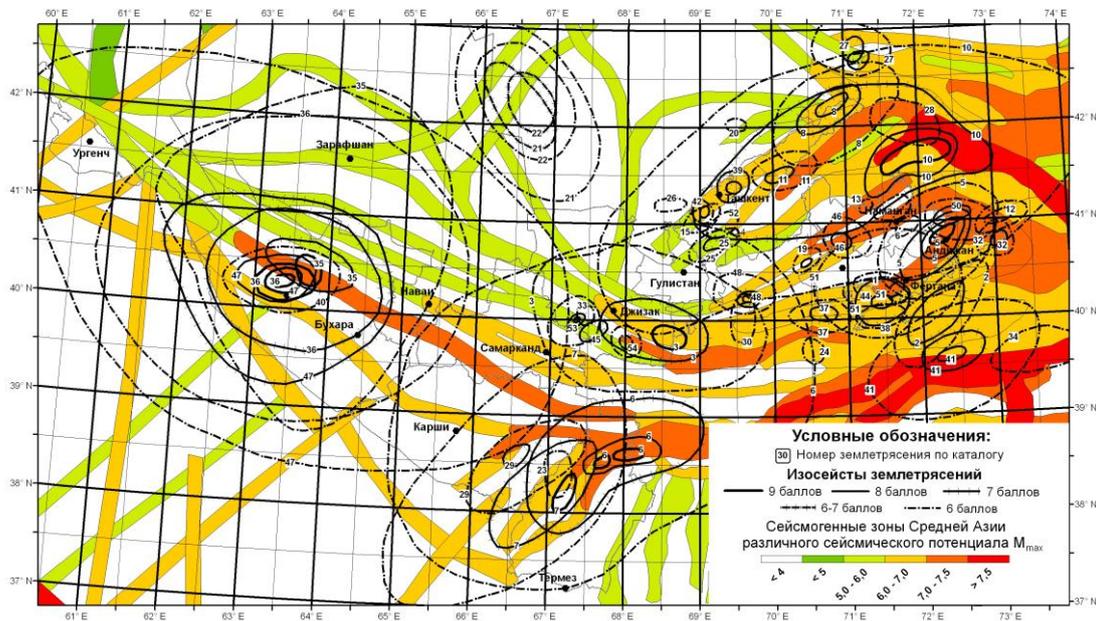


**Рис. 1.** Карта эпицентров землетрясений территории Центральной Азии, для которых имелись данные по макросейсмическому обследованию.

В качестве основной характеристики для классификации землетрясений по величине в региональном каталоге Узбекистана длительное время использовался энергетический класс землетрясений  $K$ , введенный в работах Т.Г. Раутиан [13], который связан с высвобожденной сейсмической энергией зависимостью  $K = \lg E$  (дж). Для различных землетрясений, содержащихся в каталоге, кроме энергетического класса землетрясения  $K$  использовались различные типы магнитуд  $M_s$ ,  $m_b$ ,  $M_{LH}$ . Поэтому, в целях гомогенизации каталога, для последующих построений был проведен пересчет исходных энергетических характеристик всех сейсмических событий к единой магнитуде. Поскольку в зависимости Н.В. Шебалина затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием, полученной по большому массиву макросейсмических данных из различных регионов земного шара, с которой в последствии сопоставлялись полученные в данной работе зависимости, рассматривается магнитуда  $M_s$ , определяемая по поверхностным волнам, был проведен пересчет каждого землетрясения из каталога к этому типу магнитуды по зависимостям Н.Н. Михайловой для Центральной Азии [14].

Изосейсты отдельного землетрясения, как правило, имеют эллипсовидную форму, что связано с различным характером распространения возмущения вдоль и вкrest тектонических структур. Поэтому для каждого исследуемого землетрясения снимались размеры изосейст различной балльности по большой и малой оси эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты, а также размеры центрального радиуса. Вместе с тем, для ряда землетрясений (Каратагское 1907 г.  $M=7.3$ ;

Чаткальское 1946 г.  $M=7.5$  и др.), форма изосейст, в особенности младших, существенно отличалась от эллипсовидной. Для таких изосейст измерялись максимальный и минимальный размер замкнутой кривой, ограничивающей зоны различной макросейсмической балльности.



**Рис. 2.** Сводная схема изосейст сильных землетрясений территории Узбекистана и прилегающих территорий.

Экспериментальные данные о балльности сотрясений в эпицентре  $I_0$  имелись для 122 сейсмических событий с магнитудами от  $M=3.7$  до  $M=8.4$ . Исследовались различные формы связи между параметрами землетрясения и значением  $I_0$ . Значение балльности в эпицентре рассматривалось в виде функции магнитуды землетрясения  $I_0=f(M)$ , а также в виде функции магнитуды и глубины очага землетрясения  $I_0=f(M, H)$ . Зависимости затухания макросейсмической балльности с расстоянием для землетрясений различного энергетического уровня искались в виде уравнений Блейка-Шебалина и Ковеслигети, приведенных выше. Коэффициенты этих зависимостей находились методом наименьших квадратов.

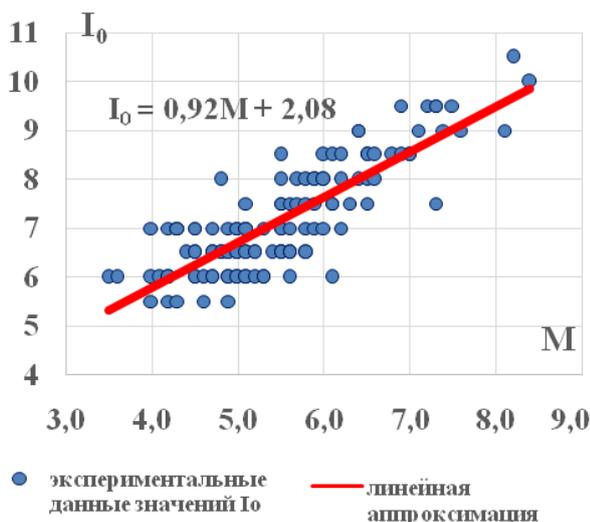
#### Результаты и их обсуждение.

Балльность сотрясений в эпицентре землетрясения  $I_0$ . На рисунке 3 приведены экспериментальные значения балльности сотрясений в эпицентре для землетрясений с различной магнитудой. В результате линейной аппроксимации получена следующая зависимость:  $I_0=0.92M+2.08$ . Значение среднеквадратического отклонения такой аппроксимации составляет  $\sigma = 0.62$ . На рисунке 4 приведены зависимости  $I_0=f(M)$ , построенные по экспериментальным значениям  $I_0$  для различных диапазонов глубин очагов землетрясений  $H$ . Видно, что эти прямые практически параллельны. Это показывает, что скорость нарастания значения  $I_0$  с увеличением магнитуды практически не зависит от выбранного диапазона глубин очагов землетрясений. Вместе с тем, уровень этих графиков для различных диапазонов глубин очагов землетрясений разный. С увеличением глубины очага землетрясения уровень графиков понижается. Т.е. для сейсмических событий с одинаковой магнитудой больший макросейсмический эффект в очаговой области наблюдается у землетрясений с меньшей глубиной очага. По всей совокупности экспериментальных данных получена следующая зависимость, связывающая балльность в эпицентре с магнитудой землетрясения и глубиной гипоцентра:  $I_0=1.14M-1.28lgH+2.28$  ( $\sigma = 0.57$ ).

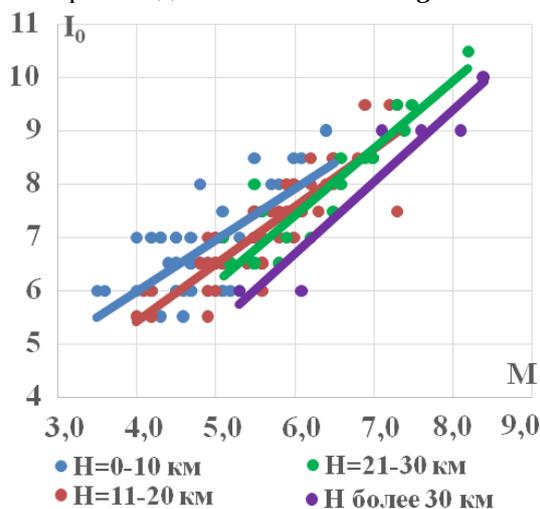
Особенности затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием. Для всей территории Центральной Азии зависимость типа Блейка-Шебалина для распространения возмущения по среднему радиусу имеет вид:  $I=1.32M-3.01lgR+3.55$  ( $\sigma=0.7$ );

Зависимость типа Ковеслигети, построенная по той же совокупности экспериментальных данных, дается выражением:  $I=1.33M-2.37lgR-0.00205R+2.24$  ( $\sigma=0.73$ ).

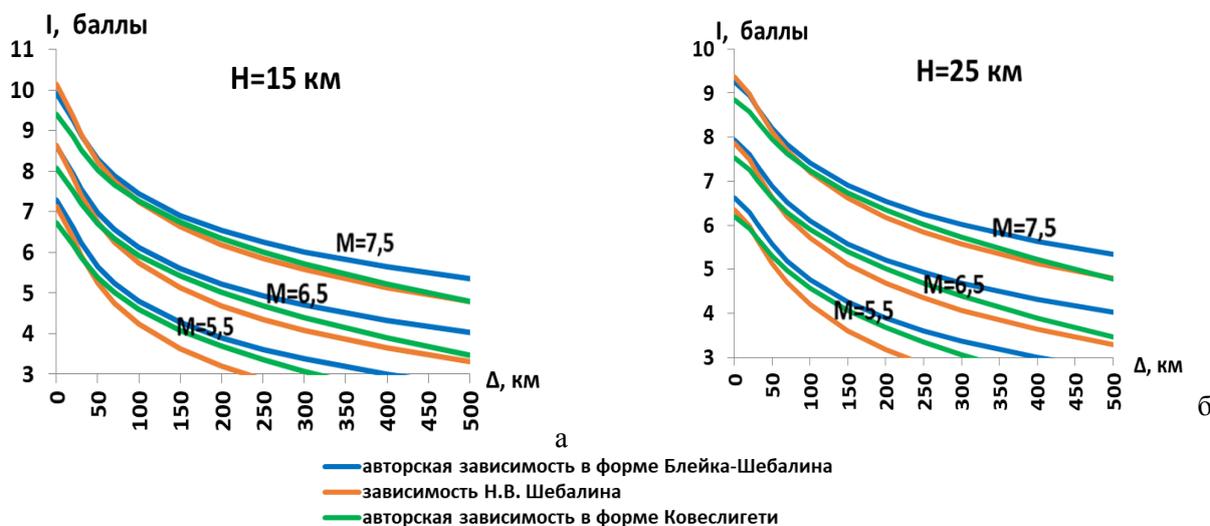
На рисунке 5 приведены кривые затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием для землетрясений Центральной Азии с магнитудами  $M=5.5-7.5$  по приведенным выше зависимостям типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети. Построения сделаны для глубин очагов землетрясений  $H=15$  км и  $H=25$  км. Для сравнения на этом же рисунке показан характер затухания кривых по зависимости Н.В.Шебалина [2], построенной по мировым данным:  $I=1.5M-3.5\lg R+3$ .



**Рис. 3.** Зависимость балльности сотрясения в эпицентре землетрясения  $I_0$  от магнитуды землетрясения  $M$ .



**Рис. 4.** Зависимость балльности сотрясения в эпицентре землетрясения  $I_0$  от магнитуды землетрясения  $M$  для различных глубин очагов землетрясений  $H$ .

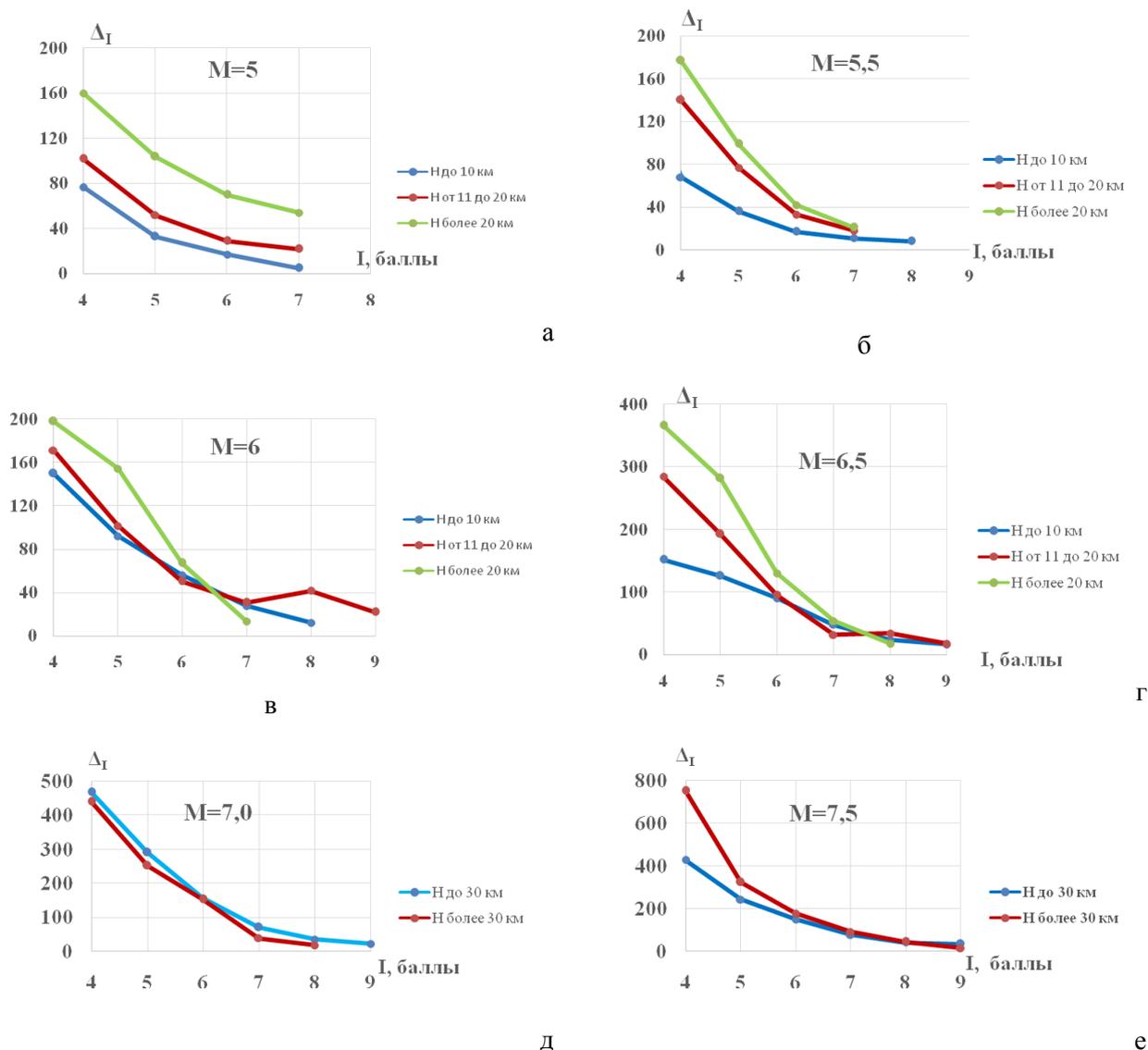


**Рис. 5.** Сопоставление различных зависимостей затухания макросейсмической балльности с расстоянием для землетрясений Центральной Азии.

Как это следует из рисунка, для рассматриваемого диапазона магнитуд и глубин очагов землетрясений, зависимость типа Ковеслигети дает наименьшую интенсивность в ближней зоне, а авторская зависимость в форме уравнения Блейка-Шебалина дает наиболее высокие значения в дальней зоне. Расхождения в значениях макросейсмической интенсивности при различных законах затухания составляют порядка 0.5 балла в ближней зоне и порядка 1 балла вдали от эпицентра землетрясения.

Обобщенная зависимость затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием с учетом глубин происходящих землетрясений. Анализ экспериментальных данных показывает, что коэффициент затухания макросейсмической балльности с расстоянием существенно зависит от глубин очагов происходящих землетрясений. На рисунке 6 (а-е) приведены средние значения длин наблюдаемых изосейст различной макросейсмической балльности от землетрясений

каждого магнитудного уровня (от M=5.0 до M=7.5 с градацией в пол магнитуды) для различных диапазонов глубин очагов землетрясений.



**Рис. 6.** Средние значения длин наблюдаемых изосейст различной макросейсмической балльности для различных диапазонов глубин землетрясений.

Практически во всем магнитудном диапазоне (кроме  $M=7.0$ , где статистика событий не очень большая) длины младших изосейст ( $I=4-6$  баллов) для землетрясений с большей глубиной очага имеют большую протяженность, чем для землетрясений, очаг которых располагался ближе к дневной поверхности. Это означает, что затухание макросейсмической балльности с расстоянием у землетрясений с малой глубиной очага более быстрое, чем у глубоких землетрясений. Зависимости затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети данное обстоятельство не учитывают, поскольку входящий в них коэффициент затухания  $b$  является величиной постоянной.

Попытки учета особенностей проявления сейсмических воздействий, обусловленных различной глубиной заложения очага землетрясения, изложены в ряде работ. Так, например, в работе D. Bindi [15] по территории Центральной Азии зависимость затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием ищется в виде:

$$I = a_1 M + a_2 - a_3 \lg \frac{R}{H} - a_4 (R - H), \text{ где } R = (\Delta^2 + H^2)^{1/2}$$

Для коэффициентов данной зависимости на основе макросейсмических данных по Центрально-Азиатскому региону методом наименьших квадратов получены следующие числовые значения:  $a_1=0.898$ ;  $a_2=1.215$ ;  $a_3=1.809$ ;  $a_4=3.447 \cdot 10^{-3}$ . Величина среднеквадратического отклонения в полученной зависимости составляет значение  $\sigma=0.737$ .

В данной работе связь между значением балльности в эпицентре и на различных гипоцентральных расстояниях  $R$  от него рассматривалась в следующем виде:

$$\frac{I - I_0}{\lg R - \lg H} = -(dM - e \lg H + f), \text{ где } I_0 = aM - b \lg H + c, \quad R = (\Delta^2 + H^2)^{1/2}$$

С левой стороны данного равенства стоит отношение приращения балльности к приращению гипоцентрального расстояния, с правой – коэффициент затухания. То есть предполагалось, что коэффициент затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием зависит от магнитуды происходящего землетрясения  $M$  и от его глубины  $H$ . Находя в данном выражении значение  $I$ , получаем:

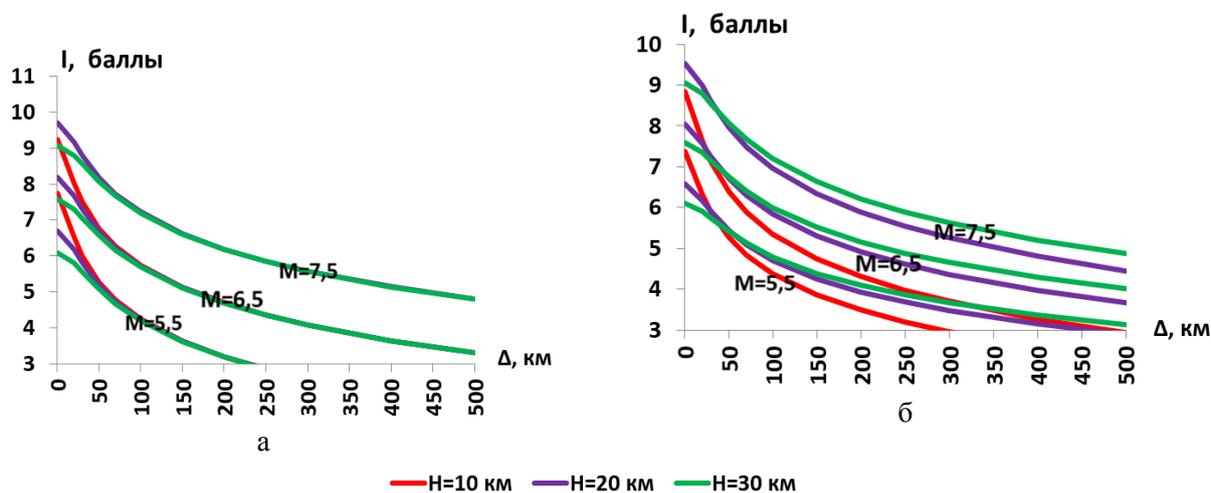
$$I = aM - b \lg H + c - dM \lg \frac{R}{H} + e \lg H \lg \frac{R}{H} - f \lg \frac{R}{H}.$$

Коэффициенты зависимости определялись методом наименьших квадратов по макросейсмическим данным Центрально-Азиатского региона. В результате решения системы 6-ти линейных уравнений с 6-ю неизвестными, получена следующая зависимость затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием по центральному радиусу:

$$I = 1.475M - 2.646 \lg H + 1.905 - 0.498M \lg(R/H) + 1.159 \lg H \lg(R/H) - 1.401 \lg(R/H)$$

Величина среднеквадратического отклонения в полученной зависимости составляет значение  $\sigma=0.565$ .

На рисунке 7 показаны построенные по приведенной выше зависимости графики затухания макросейсмической балльности с расстоянием для землетрясений с магнитудами  $M=5.5$ ,  $M=6.5$  и  $M=7.5$ , происходящими на различных глубинах, и аналогичные графики, полученные по зависимости Н.В.Шебалина.



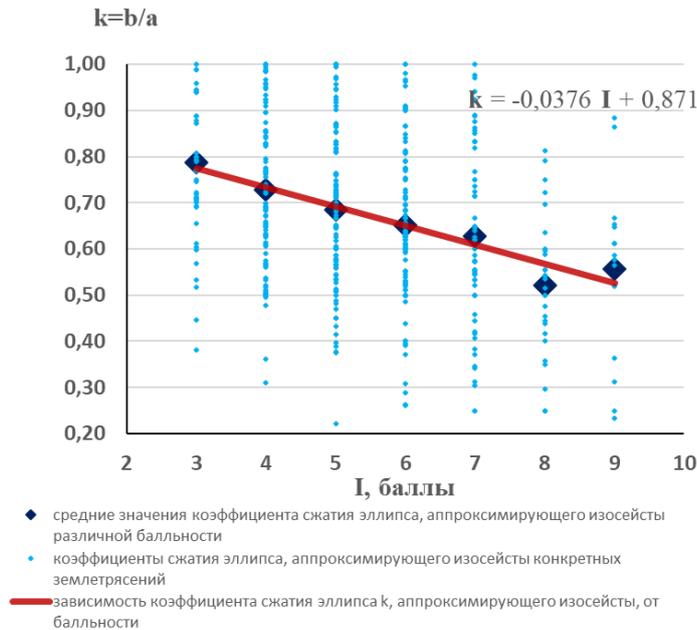
**Рис. 7.** Сопоставление характера затухания макросейсмической балльности с расстоянием по различным зависимостям: а) по зависимости Н.В.Шебалина; б) по авторской зависимости, с учетом зависимости коэффициента затухания от глубины очага.

Из приведенных рисунков видно, что как по авторской зависимости затухания, так и по зависимости Н.В.Шебалина, построенной по мировым данным, большой макросейсмический эффект в ближней зоне отмечается для землетрясений с малой глубиной очага, по сравнению с землетрясениями, происходящими на больших глубинах. Однако с удалением от источника характер затухания интенсивности сейсмических воздействий для сравниваемых зависимостей различен. В зависимости Н.В.Шебалина затухание макросейсмической балльности с расстоянием одинаковое для землетрясений с различной глубиной очага. По авторской зависимости уменьшение сейсмиче-

ского эффекта с расстоянием для землетрясений с малой глубиной очага землетрясения происходит быстрее, чем у землетрясений с большей глубиной, что лучше согласуется с реальными эмпирическими фактами.

Учет эллиптичности изосейст. В качестве параметра, характеризующего степень эллиптичности наблюдаемых изосейст, следуя [7], рассматривался коэффициент сжатия эллипса  $k$ , равный отношению длины малой оси эллипса  $b$  к длине большой оси  $a$  ( $k=b/a$ ). Были исследованы зависимости коэффициента сжатия эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты, от значения макросейсмического балла  $I$ , глубины очага  $H$  и магнитуды  $M$  землетрясения.

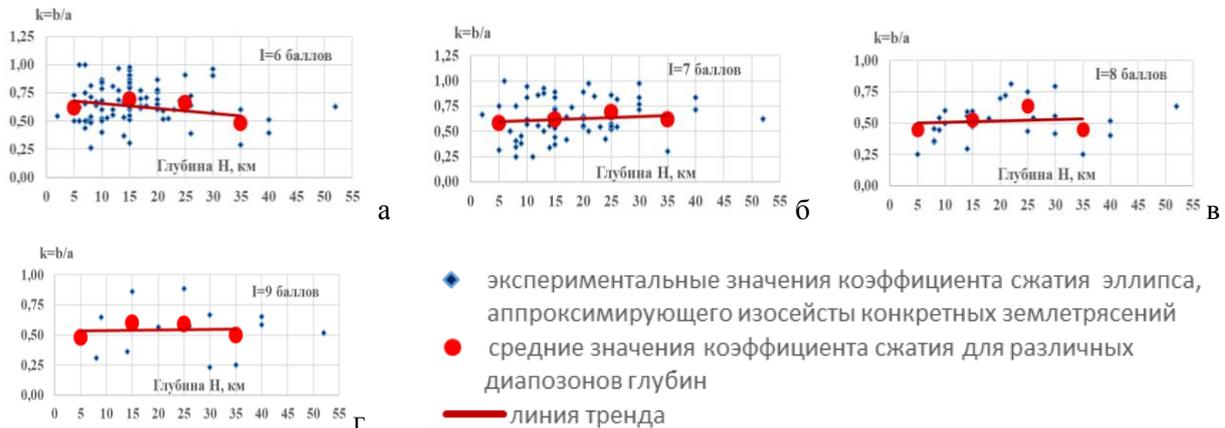
На рисунке 8 приведена зависимость коэффициента сжатия эллипса  $k$ , аппроксимирующего изосейсты, от значения макросейсмического балла  $I$ .



**Рис. 8.** Зависимость коэффициента сжатия эллипса  $k$ , аппроксимирующего изосейсты, от значения макросейсмического балла  $I$ .

Здесь же показаны экспериментальные данные, по которым она построена. Видно, что разброс значений  $k$  в пределах каждого значения балла достаточно велик ( $\sigma=0.15-0.20$ ). Вместе с тем, для средних значений  $k$  по каждому баллу уверенно выдерживается линейная зависимость:  $k=-0.0376I+0.871$ .

На рисунке 9 (а-г) показаны зависимости коэффициента сжатия эллипса  $k$  от глубины  $H$  очага землетрясения при фиксированном значении макросейсмического балла  $I$ . В отличие от работы [7], где рассматривались данные только по территории Таджикистана, в нашем случае связь между этими параметрами оказалась не высокой.

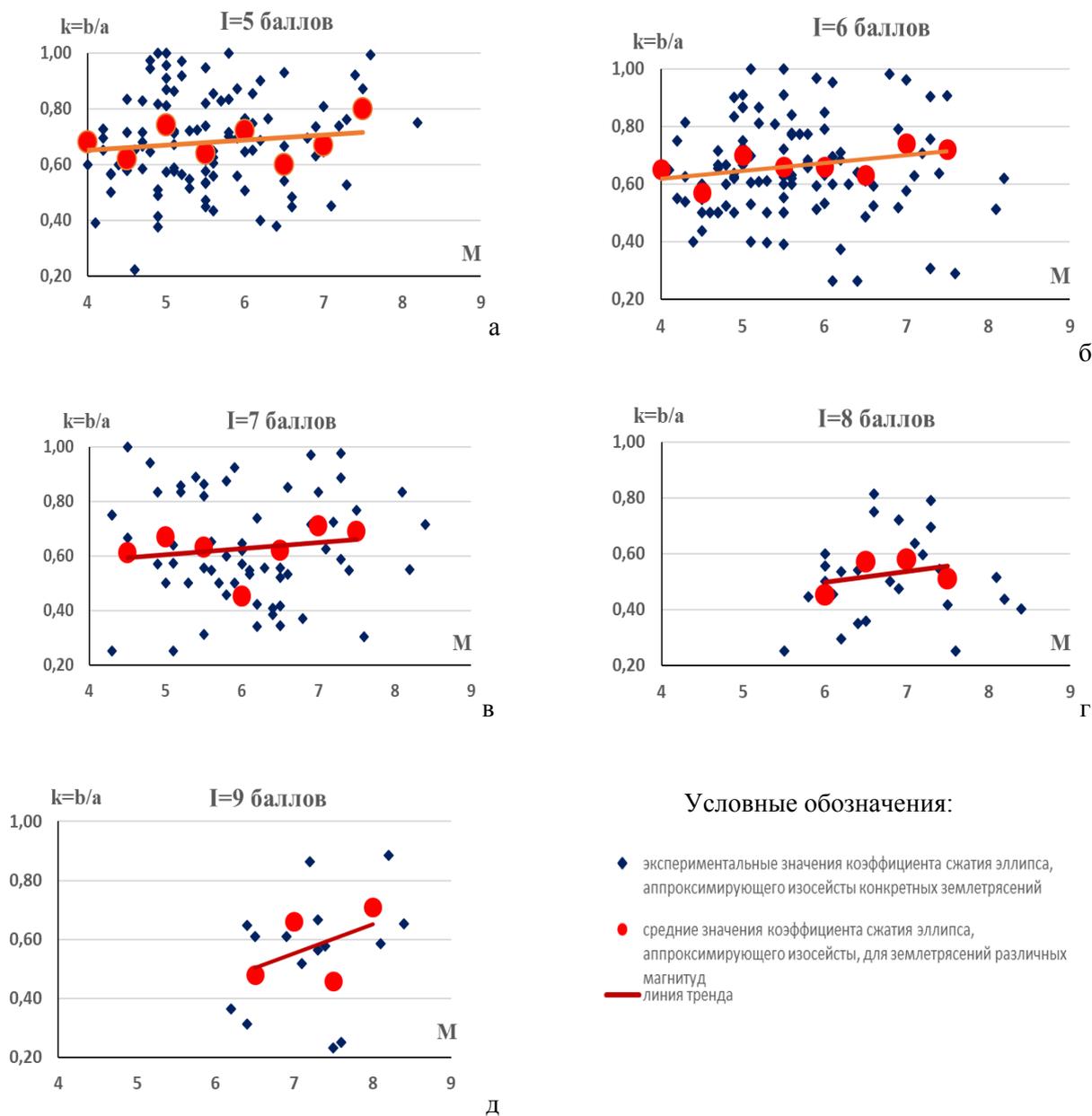


**Рис. 9.** Зависимость коэффициента сжатия эллипса  $k$ , аппроксимирующего изосейсты, от глубины очага землетрясения  $H$  при фиксированном значении макросейсмического балла  $I$ .

Несколько лучший результат показывает связь между значением коэффициента сжатия  $k$  и магнитудой землетрясения  $M$  (рис.10). При достаточно большом разбросе данных, для каждого значения макросейсмического балла наблюдается положительная корреляция между этими параметрами.

Методом наименьших квадратов получено следующее уравнение связи между коэффициентом сжатия эллипса  $k$  и параметрами  $I$ ,  $M$  и  $H$ :  $k=-0.05I-0.002H+0.04M+0.73$  ( $\sigma=0.17$ ).

В таблице 1 приведены размеры круговых и эллиптических изосейст от землетрясений различного энергетического уровня.



**Рис. 10.** Зависимость коэффициента сжатия эллипса  $k$ , аппроксимирующего изосейсты, от магнитуды землетрясения  $M$  при фиксированном значении макросейсмического балла  $I$ .

Они происходили на различных глубинах, рассчитаны на основе авторской зависимости затухания макросейсмической балльности с расстоянием (по центральному радиусу), и получены выше соотношениями между малой и большой осью эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты.

Влияние выбора закона затухания на результирующие оценки сейсмической опасности.

Для оценки влияния выбора закона затухания макросейсмической балльности с расстоянием на результирующие оценки сейсмической опасности, была построена серия карт сейсмического районирования территории Восточного Узбекистана, в которых при прочих равных входных параметрах, необходимых для расчета опасности, варьировался только закон затухания интенсивности сейсмических воздействий.

На рисунке 11 приведена карта ощутимых и сильных землетрясений ( $M \geq 4.3$ ) территории Восточного Узбекистана с исторических времен. На этой же карте показаны активные разломы земной коры и выделенные на их основе сейсмогенерирующие зоны [16].

**Таблица 1.** Размеры круговых ( $\Delta_c$ , км) и эллиптических ( $\Delta_a$ ,  $\Delta_b$ , км) изосейст при землетрясениях различного магнитудного уровня  $M$  и различной глубины  $H$  заложения гипоцентра.

		M=5			M=5.5			M=6.0		
		$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$
H=5	I=7	4.8	6.8	3.9						
	I=6	13.7	18.4	11.4						
	I=5	30.3	38.6	25.8						
	I=4	64.7	78.3	56.4						
H=10	I=8							4.1	6.0	3.3
	I=7				8.8	12.4	7.2	19.7	27.0	16.2
	I=6	13.8	18.8	11.5	27.1	35.9	22.6	43.9	56.9	37.0
	I=5	38.4	49.2	32.5	61.7	77.5	52.7	91.2	112.4	78.7
	I=4	91.5	111.8	79.4	134.8	161.7	118.0	186.9	220.2	165.2
H=15	I=7							19.3	26.9	15.9
	I=6	9.0	12.3	7.4	28.0	37.6	23.3	50.2	65.8	42.1
	I=5	40.8	52.9	34.4	71.3	90.5	60.7	111.1	138.3	95.4
	I=4	107.0	132.0	92.4	166.2	201.1	144.8	239.4	284.6	210.6
H=20	I=7							16.1	22.7	13.2
	I=6				26.3	35.8	21.8	53.5	70.9	44.7
	I=5	40.2	52.8	33.8	76.8	98.5	65.0	125.4	157.7	107.2
	I=4	116.4	144.9	100.0	189.2	231.1	164.1	281.6	337.7	246.6
H=25	I=7							7.8	11.2	6.4
	I=6				22.2	30.5	18.3	54.7	73.4	45.5
	I=5	37.5	49.7	31.3	79.6	103.3	67.1	135.9	172.7	115.7
	I=4	121.7	153.0	104.1	206.5	254.6	178.2	316.5	383.0	275.8
H=30	I=6				14.4	20.0	11.8	54.4	73.9	45.1
	I=5	32.8	44.0	27.3	80.5	105.6	67.6	143.8	184.5	121.8
	I=4	124.2	157.8	105.7	219.7	273.5	188.7	345.8	422.4	299.9

Продолжение Таблицы 1.

		M=6.5			M=7.0			M=7.5		
		$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$
H=10	I=8	14.4	20.5	11.7						
	I=7	32.4	43.5	27.0						
	I=6	65.0	82.6	55.4						
	I=5	127.1	153.9	110.8						
	I=4	247.0	286.3	220.4						
H=15	I=9				6.1	9.3	4.9	20.4	29.9	16.4
	I=8	12.6	18.3	10.2	27.3	38.5	22.3	44.1	60.6	36.3
	I=7	36.6	49.8	30.4	58.0	76.9	48.4	84.4	109.5	71.2

	I=6	78.6	100.9	66.6	114.1	143.5	97.6	157.1	193.6	135.6
	I=5	160.9	196.5	139.5	220.7	264.6	193.2	290.1	341.8	256.4
	I=4	326.0	381.0	289.6	424.8	488.4	381.0	534.5	605.0	484.0
		$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	$\Delta_a$	$\Delta_b$
H=20	I=9							19.5	29.0	15.6
	I=8	5.5	8.1	4.5	27.8	39.6	22.6	48.7	67.8	40.0
	I=7	38.4	52.8	31.7	64.6	86.7	53.7	97.3	127.6	81.7
	I=6	88.1	114.3	74.3	132.1	167.9	112.5	186.3	231.9	160.0
	I=5	187.5	231.2	161.8	263.4	318.8	229.5	352.8	419.4	310.4
	I=4	393.0	463.1	347.3	521.8	604.8	465.7	666.3	760.0	600.4
H=25	I=9							16.2	24.5	13.0
	I=8				26.4	38.2	21.4	51.7	72.8	42.2
	I=7	38.4	53.4	31.5	69.2	93.9	57.3	107.6	142.7	89.9
	I=6	95.0	124.6	79.8	146.7	188.4	124.3	211.2	265.5	180.6
	I=5	209.2	260.5	179.7	300.2	366.6	260.3	408.5	490.0	357.7
	I=4	451.2	536.3	396.9	609.0	711.6	540.8	787.5	905.4	706.2
H=30	I=9							8.6	13.2	6.9
	I=8				23.1	33.9	18.7	53.3	76.1	43.4
	I=7	36.8	51.9	30.1	72.2	99.3	59.6	116.0	155.6	96.5
	I=6	99.9	132.6	83.5	158.7	206.0	133.9	232.8	295.7	198.1
	I=5	227.2	285.8	194.3	332.3	409.7	286.8	458.8	555.3	399.8
	I=4	502.6	602.8	440.0	688.4	811.2	608.4	900.3	1043.5	803.5

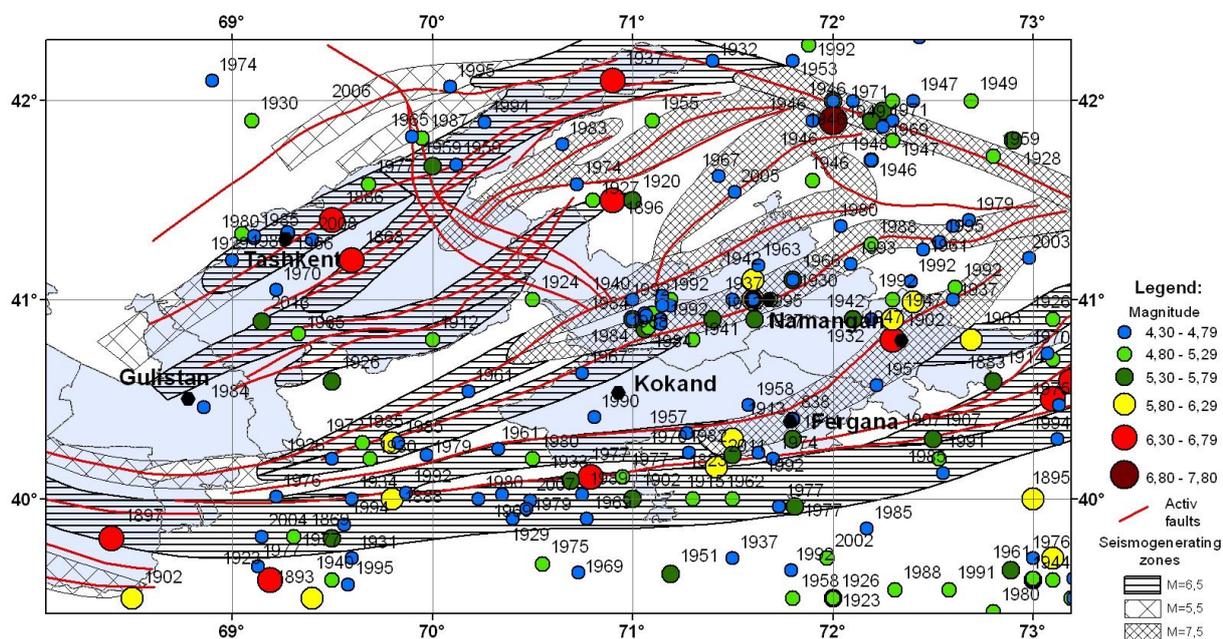


Рис. 11. Карта эпицентров ощутимых и сильных ( $M \geq 4,3$ ) землетрясений территории Восточного Узбекистана с исторических времен.

В качестве базовых карт, которые сопоставлялись между собой, рассматривались карты сейсмического районирования исследуемой территории, в которых сейсмическая опасность выражалась в баллах макросейсмической шкалы MSK-64, для вероятности  $P=0,98$  не превышения уровня сейсмического воздействия в течение 50 лет (период повторяемости сотрясений  $T=2500$  лет). Эти карты были рассчитаны при следующих условиях:

– в качестве модели сейсмических источников рассматривались сейсмогенирующие зоны территории Восточного Узбекистана и сопредельных с ним областей, выделение которых базируется на сеймотектонических исследованиях разломов земной коры, активизированных на современном этапе геологического развития [16];

– сейсмический потенциал  $M_{max}$  сейсмогенирующих зон оценивался комплексом сеймотектонических [16] и сейсмологических методов [16, 10];

– параметры повторяемости землетрясений (сейсмическая активность  $A_{10}$  и угловой коэффициент прямой  $\gamma$ ) в зависимости Гутенберга-Рихтера в распределении сейсмических событий по энергетическим классам определены для каждой сейсмоактивной зоны [10];

– в качестве глубин очагов землетрясений принималась наиболее вероятная для заданной магнитуды землетрясений глубина [5];

– расчеты опасности проведены для землетрясений со взбросовым типом подвижки в очаге, поскольку именно он преобладает на исследуемой территории [17].

В качестве законов затухания макросейсмической балльности с расстоянием были рассмотрены четыре различные зависимости, обсуждавшиеся выше:

- зависимость Н.В.Шебалина по мировым данным, включая территорию Центральной Азии (а);

- зависимость типа Блейка-Шебалина, полученная по макросейсмическим данным Центральной Азии в рамках данного исследования (б);

- полученная по тем же данным зависимость типа Ковеслигети (в);

- авторская зависимость, в которой коэффициент затухания зависит от глубин очагов происходящих землетрясений (г).

Карты сейсмического районирования территории Восточного Узбекистана при приведенных выше законах затухания приведены на рисунке 12.

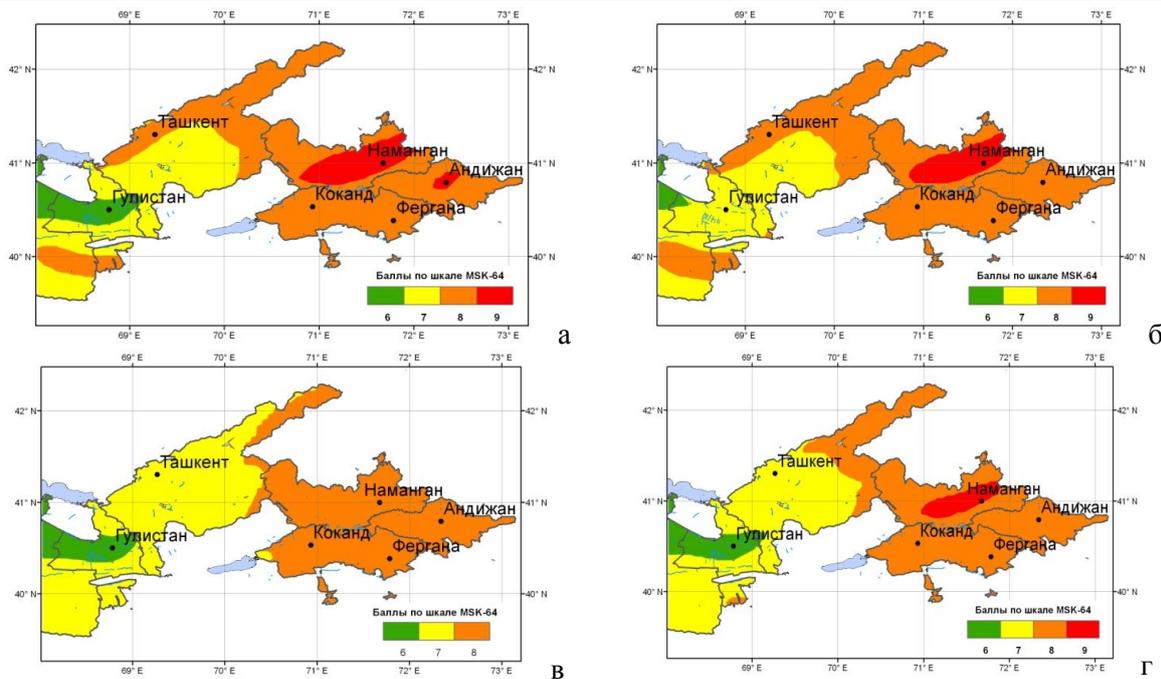
Из рисунка видно, что области различной макросейсмической балльности на построенных картах существенно отличаются между собой. Вместе с тем, поскольку балл является величиной целочисленной, и выделение зон различной макросейсмической балльности связано с округлением рассчитанных значений интенсивности до целого числа, то для сопоставляемых карт, в которых балльность отличается на единицу, реальные расхождения в оценках сейсмической опасности, могут оказаться не столь значительными. Кроме того, равные приращения интенсивности сейсмических воздействий в различных диапазонах макросейсмической балльности могут давать существенную разницу в значениях максимальных ускорений колебаний грунта. Приращения макросейсмической интенсивности в областях с высокой балльностью дают большие приращения в значениях ускорений, чем те же самые приращения макросейсмической интенсивности в областях с низкой балльностью.

На рисунке 13 приведены карты сейсмической опасности территории Восточного Узбекистана в значениях максимальных ускорений колебаний грунта, которые пересчитывались из карт макросейсмической балльности по зависимости Ф.Ф. Аптикаева [18]:

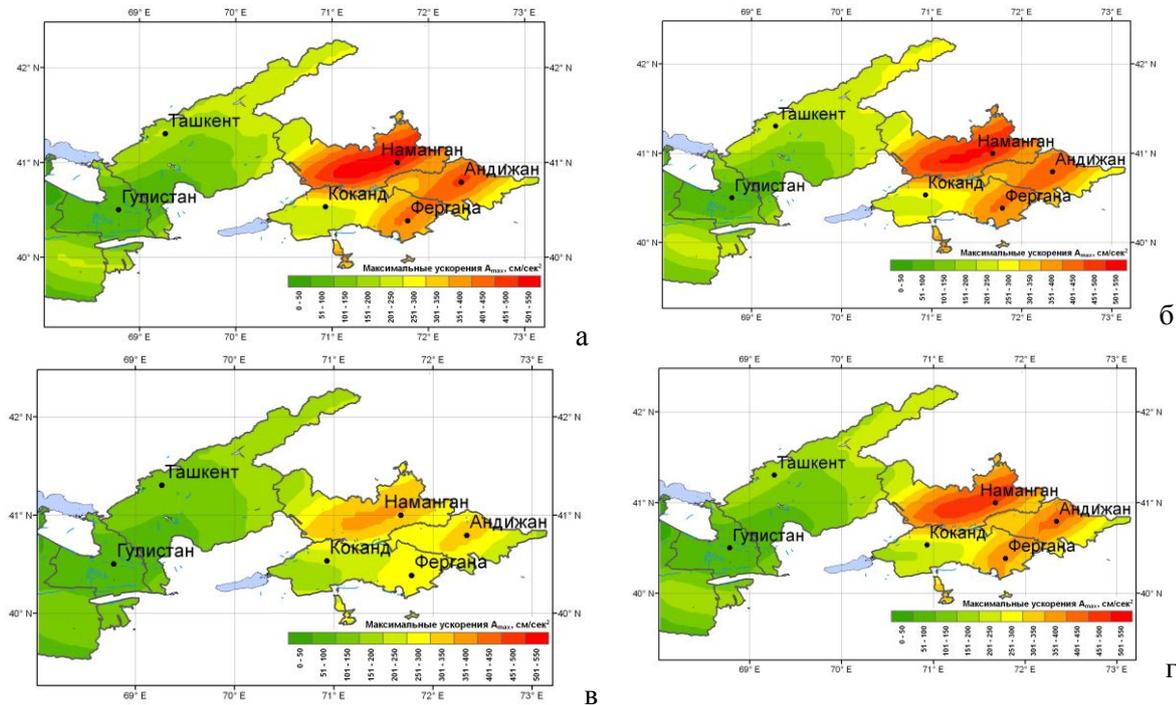
$$\lg a_{max} = 0.4I - 0.755 \pm 0.08.$$

Примем в качестве меры различия оценок опасности, вызванного выбором закона затухания, максимальную по площади разность  $\Delta I$  для каждой пары из сопоставляемых карт, представленных на рисунке 12. Чтобы отследить, в каком диапазоне макросейсмической балльности проявляются наибольшие отличия в сопоставляемых картах, наряду со значением  $\Delta I$ , при сопоставлении будем рассматривать разность в значениях максимальных ускорений  $\Delta a_{max}$ . Результаты количественного сопоставления карт сейсмической опасности, построенных при различных законах затухания, сведены в таблицу 2.

Максимальная разность в оценках опасности на картах с различными законами затухания составляет  $\Delta I=0.7$  балла, а значения максимальных ускорений разнятся на  $\Delta a_{max}=180$  см/сек<sup>2</sup>.



**Рис.12.** Карты сейсмической опасности территории Восточного Узбекистана в баллах макросейсмической шкалы для вероятности  $P=0,98$  не превышения уровня сейсмического воздействия в течение 50 лет при различных законах затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием: а) зависимость Н.В.Шебалина по мировым данным; б) зависимость типа Блейка-Шебалина, полученная в данной работе; в) зависимость типа Ковеслигети; г) авторская зависимость, в которой коэффициент затухания зависит от глубин очагов происходящих землетрясений.



**Рис.13.** Карты сейсмической опасности территории Восточного Узбекистана в значениях максимальных ускорений колебаний грунта для вероятности  $P=0,98$  не превышения уровня сейсмического воздействия в течение 50 лет при различных законах затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием: а) зависимость Н.В.Шебалина по мировым данным; б) зависимость типа Блейка-Шебалина, полученная в данной работе; в) зависимость типа Ковеслигети; г) авторская зависимость, в которой коэффициент затухания зависит от глубин очагов происходящих землетрясений.

Наибольшие значения оценок сейсмической опасности на территории Восточного Узбекистана получаются при выборе в качестве закона затухания зависимости Н.В. Шебалина, полученной на основе мировых данных, наименьшие – когда принимается зависимость типа Ковеслигети, построенная по макросейсмическим данным землетрясений Центральной Азии.

По авторской зависимости затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием, построенной с учетом глубин происходящих землетрясений, показатели сейсмической опасности оказались ниже, чем по зависимости типа Блейка-Шебалина на  $\Delta I=0.7$  балла.

А разница в значениях максимальных ускорений составила всего  $\Delta a_{max}=54$  см/сек<sup>2</sup>, что говорит о том, что эти зависимости существенно различаются при не высоких значениях макросейсмического балла.

**Таблица 2.** Значения максимальных по площади разностей в оценках сейсмической опасности территории Восточного Узбекистана при различных законах затухания интенсивности сейсмических воздействий.

Зависимость Н.В. Шебалина по мировым данным		+0.4 балла +30 см/сек <sup>2</sup>	+0.5 балла +180 см/сек <sup>2</sup>	+0.4 балла +65 см/сек <sup>2</sup>
Зависимость типа Блейка-Шебалина по Центральной Азии	-0.4 балла -30 см/сек <sup>2</sup>		+0.7 балла +156 см/сек <sup>2</sup>	+0.7 балла +54 см/сек <sup>2</sup>
Зависимость типа Ковеслигети по Центральной Азии	-0.5 балла -180 см/сек <sup>2</sup>	-0.7 балла -156 см/сек <sup>2</sup>		-0.3 балла -133 см/сек <sup>2</sup>
Авторская зависимость с учетом глубин	-0.4 балла -65 см/сек <sup>2</sup>	-0.7 балла -54 см/сек <sup>2</sup>	+0.3 балла +133 см/сек <sup>2</sup>	

Оценки опасности, полученные по этой же зависимости и зависимости затухания в форме уравнения Ковеслигети отличаются на  $\Delta I=0.3$  балла, но значительная разность в величинах максимальных ускорений колебаний грунта  $\Delta a_{max}=133$  см/сек<sup>2</sup> свидетельствует о том, что эти различия, напротив, наблюдаются при высоких значениях макросейсмической балльности.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований сводятся к следующему.

На основе анализа макросейсмических данных землетрясений Центральной Азии получена региональная зависимость балльности сотрясений в эпицентре землетрясения от магнитуды и глубины очага. Построены зависимости затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием для землетрясений различного энергетического уровня в форме уравнений Блейка-Шебалина и Ковеслигети.

На экспериментальных данных показано, что коэффициент затухания макросейсмической интенсивности с расстоянием зависит от глубин происходящих землетрясений. Предложен новый тип зависимости затухания, учитывающий данный эффект, и методом наименьших квадратов определены ее коэффициенты. При единых экспериментальных данных величина среднеквадратического отклонения в полученной зависимости меньше, чем в зависимостях типа Блейка-Шебалина и Ковеслигети.

Исследовано соотношение между малой и большой осью эллипса, аппроксимирующего реальные изосейсты, в зависимости от значения макросейсмического балла, магнитуды землетрясения и его глубины. Рассчитаны теоретические размеры круговых и эллиптических изосейст от землетрясений различного энергетического уровня и происходящих на различных глубинах.

На примере территории Восточного Узбекистана показано, что оценки сейсмической опасности существенно зависят от выбора вида закона затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстоянием. Даже зависимости, построенные на одних и тех же экспериментальных данных, дают весьма значимые различия в результирующих оценках сейсмической опасности ( $\Delta I=0.7$  балла).

## Литература

1. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (под ред.). Новый каталог сильных землетрясений СССР с древнейших времен до 1975 года - М.: Наука, 1977. - 506 с.
2. Шебалин Н.В., Хромецкая Е.А. Методические аспекты получения и интерпретации макросейсмических данных-М.:Наука,1988.-С.1-29.
3. Татевосян Р.Э. Макросейсмические исследования-М.:Наука и образование, 2013.- 384с.
4. Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Пояснительная записка к комплексу крат общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания, 2016. - №7. - С. 49-122.
5. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Кучкаров К.И., Мирзаев М.А. Методология построения нового комплекса карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана ОСР-2017 // Геориск, 2018.- №2. - С. 6-24.
6. Джанузатов К.Д., Ильясов Б.И., Кнауф В.И. Сейсмическое районирование территории СССР. Киргизия //М.: Наука, 1980. - С. 183-193.
7. Мирзоев К.М., Джурсаев Р.У. Основные закономерности затухания балльности землетрясений на территории Таджикистана // Землетрясения Средней Азии и Казахстана. 1983. Душанбе: Издательство Дониш, 1985.- С. 99-128.
8. Сейдузова С.С. Математическое моделирование поля макросейсмической интенсивности. // Сейсмичность территории Узбекистана. Ташкент: Фан, 1990. - С. 154-183.
9. Садыков А. Сейсмический режим территории Казахстана. Алматы: Изд.Гылым, 2004. - 270 с.
10. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. Ташкент: Фан, 2012. - 254 с.
11. Kovesligethy R. Seismischer Starkegrad und Intehsitat der Beben //Gerlands Beiträgezur Geophysik, 1907. - Bd. 8. - S. 22-29.
12. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М: Наука, 1985. - 408 с.
13. Раутиан Т.Г. Проблема определения энергии землетрясений. В кн. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Москва: ИФЗ АН СССР, 1974. - С. 107-112.
14. Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зондированию территории Республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК, 2014. - Вып. 4. - С. 86-92.
15. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A, Zschau J. Intensity Prediction Equations for Central Asia // Geophysical Journal International, 2011.187(1), 327-337; doi:10.1111/j.1365-246X.2011.051142.x.
16. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сеймотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Ташкент: Гидроингео, 2002. - С. 59-74.
17. Eksrom G., Nettles M. Global CMT web page; <http://www.globalcmt.org/> (accessed April 17, 2014).
18. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. - 176 с.

## **ZILZILALARNI PROGNOZLASH**

УДК 550.34

**Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Туйчиев А.И.**

*Институт сейсмологии АН РУз., г. Ташкент, Республика Узбекистан*

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Abdullabekov K.N., Maksudov S.X., Tuychiev A.I.**

*O'zR FA Seismologiya instituti, Toshkent sh., O'zbekiston Respublikasi*

### **ZILZILALARNI PROGNOZ QILISH BO'YICHA TADQIQOTLARNING ZAMONAVIY XOLATI**

**Annotatsiya.** Zilzilalarni prognoz qilish bo'yicha tadqiqotlarning shu kundagi xolati keltirilgan. Erishilgan yutuqlar qayd qilingan. O'tkazilgan tadqiqotlarning ilmiy – uslubiy kamchiliklari ko'rsatib o'tilgan. Zilzilalarni prognoz qilish bo'yicha izlanishlarning saviyasini oshirish yo'lida ilmiy, tashkiliy – uslubiy tavsiyalar berilgan.

**Kalitli so'zlar:** Erning elektromagnit maydonlari, anomal variatsiyalar, zilzilalar darakchilari, zilzilalar, modellar, magnituda, texnogen jarayonlar, seysmogeodinamika.

**Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Туйчиев А.И.**

*Институт сейсмологии АН РУз., г. Ташкент, Республика Узбекистан*

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Аннотация.** Рассмотрены современное состояние исследований по проблеме прогнозирования. Охарактеризованы достигнутые успехи. Указаны научно- методические недостатки проведенных исследований. Предлагаются научные, организационно – методические рекомендации по повышению уровня исследований по проблеме прогнозирования землетрясений.

**Ключевые слова:** электромагнитные поля земли, аномальные вариации, предвестники землетрясений, землетрясения, модели, магнитуда, техногенные процессы, сейсмогеодинамика.

**Abdullabekov K.N., Maksudov S.Kh., Tuychiev A.I.**

*Institute Seismology Academy of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan*

### **MODERN CONDITION OF RESEARCH ON THE PROBLEM OF FORECASTING OF EARTHQUAKES**

**Annotation.** The current state of research on the problem of forecasting is considered. Characterized by the progress achieved. Scientific and methodological shortcomings of the conducted research are indicated. Scientific, organizational and methodological recommendations are proposed for increasing the level of research on the problem of earthquake prediction

**Keywords:** electromagnetic fields of the earth, anomalous variations, earthquake precursors, earthquakes, models, magnitude, man-made processes, seismic geodynamics.

**Введение.** Среди стихийных бедствий по масштабам людских потерь, материального ущерба и других негативных последствий землетрясения занимают первое место. Ежегодно в различных регионах земного шара гибнут десятки-сотни тысяч людей. Несмотря на усилия многотысячного коллектива ученых в различных странах мира проблема прогнозирования землетрясений еще не решена полностью. Зачастую, не анализируя реальное состояние исследования проблемы, делаются скороспелые поспешные выводы: «Проблема прогнозирования землетрясений еще не решена, никто в мире не способен прогнозировать землетрясения. Поэтому решением этой проблемы не нужно заниматься и т. д.». Тут же на первый план выходят пессимисты и начинают доказывать бессмысленность проведения научно- исследовательских работ по решению проблемы прогнозирования землетрясений. Если вернуться к хронологии событий последних десятилетий приблизительно также было после землетрясений в Спитаке 7 декабря 1988г., Суматре 26 декабря 2004г., Японии 11 марта 2011г. и т.д.

Однако в течение последнего пятидесятилетия в решении проблемы прогнозирования землетрясения сделано очень много: найдены надежные предвестники, установлены пространствен-

но-временные закономерности их проявления, найдены эмпирические зависимости между временами проявления предвестников и магнитудой землетрясений, между линейными размерами и магнитудой, разработаны модели процессов подготовки землетрясений, установлены физико-механические и химические основания предвестников и т.д. и т.п.

Очень много фактов, доказывающих реальную возможность прогнозирования землетрясений, к которым относятся наличие: комплекса надежных предвестников; реальных физических параметров (амплитуда, время, линейные размеры); физико-химических и механических основ проявления различных предвестников; выявленных зависимостей между пространственно-временными параметрами и магнитудой землетрясений; конкретных случаев прогноза землетрясений в различных регионах земного шара; методических инструкций и указаний; высокоточных измерительных приборов; специалистов высокого уровня; средства связи и методов обработки данных и т.д.

**Цель исследований.** Целью настоящей статьи является оценка современного состояния исследований по проблеме прогнозирования землетрясений, указание недостатков и путей их преодоления. Задачами являются описание научно- методических основ существующих методов поиска предвестников, успехов, упущений и путей преодоления назревших вопросов проблемы прогнозирования землетрясений.

**Обсуждение современного состояния исследований.** Проблемой прогнозирования землетрясений исследователи занимаются начиная со второй половины 18-го столетия. За прошедшее время найдены около сотни методов прогнозирования землетрясений, установлены пространственно- временные особенности проявления предвестников, предложены физико-механические, химические и другие основания поиска предвестников, установлены характерные времена и пространственные размеры, установлены эмпирические зависимости между пространственно-временными параметрами и магнитудой землетрясений, разработаны инструкции по выявлению различных предвестников, составлены каталоги аномальных проявлений различных предвестников, предложены десятки моделей очага и процессов подготовки землетрясений, выполнены теоретические расчеты ожидаемых величин различных предвестников, проведены сотни экспериментов по исследованию изменения физических свойств горных пород под давлением и температурой, содержатся результаты экспериментов на территориях техногенных объектов и многие другие. На первый взгляд все ясно и известно. Организация мониторинга комплексом сейсмопрогностических методов и обработка данных должна обеспечить прогнозирование землетрясений.

Всего 40-50 лет тому назад в научной литературе сильно дискутировалось наличие или отсутствие надежных предвестников землетрясений. Начиная с 1965-70-х годов в различных сейсмоактивных регионах земного шара обнаружены сотни случаев аномальных изменений различных полей, связанных с землетрясениями. Наряду с ранее известными (локальные вариации магнитного поля, атмосферного электричества, теллурических токов, уровня воды в колодцах и скважинах, современных движений земной коры, наклонов и деформаций земной поверхности, необычное поведение животных и т.д.), появились новые, ранее неизвестные науке изменения газового и химического состава подземных вод [1], электрического сопротивления горных пород, появление мощных электромагнитных излучений, возмущения ионосферы и т.д. [2]. Выделенные аномальные изменения были достоверными и не вызывали сомнений. Дискуссии о наличии или отсутствии надежных предвестников завершились. Однако это не означало окончательное решение проблемы прогнозирования землетрясений. Появилась масса новых не решенных проблем.

Выделенные аномальные изменения в различных полях имели конкретные физические параметры: амплитуду, характерные времена и линейные размеры. Это все позволило установить пространственно- временные особенности проявления комплекса предвестников [3].

Каждый предвестник имеет реальную физическую природу. Например, электрические и магнитные предвестники имеют электрокинетическую, пьезомагнитную и пьезоэлектрическую природу. Деформометрические предвестники связаны с упругими напряжениями в земной коре, возникающими вследствие сложных физико-химических и механических процессов внутреннего и внешнего происхождения. Физическая природа каждого предвестника достаточно подробно описана в специальной литературе по каждому направлению [3].

Разработаны модели процессов подготовки землетрясений. Наиболее известными моделями процессов подготовки землетрясений являются дилатантно- диффузионная модель американских ученых [5] и модель лавинно- неустойчивого трещинообразования и консолидационная мо-

дель российских ученых [6,7]. К.Н. Абдуллабековым [8] разработана также геофизическая модель процессов подготовки землетрясений, отличающаяся от известных наличием временного фактора. Как известно, в ранних моделях временной фактор учитывался не достаточно. Авторы опираясь на результаты лабораторных экспериментов, писали что землетрясения готовятся в течение длительного времени – десятки, сотни лет. В модели К.Н. Абдуллабекова [8] суммарное время подготовки землетрясений, найдено исходя из выявленных зависимостей между временами долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных предвестников и магнитудой землетрясений. Разработана также технология прогнозирования землетрясений [9].

К настоящему времени в различных регионах земного шара известны многочисленные примеры реального прогноза места, времени и силы землетрясений. Наиболее яркими являются прогнозы китайских сейсмологов Хайченского, 1976г, узбекских Алайского, 1978г. и Папского, 1984 г. и других землетрясений. Помимо этих в Узбекистане комплексом методов спрогнозированы Газлийское 17 мая 1976г., Чимионское 6 мая 1982г, Дараут-Курганское 1984г., Кайраккумское 1985г., Джиргатальское 1984г., Камашинское 18 января 2001 года и другие землетрясения. Начиная с 1976 года спрогнозированы более 10-ти сильных землетрясений. Имеются также примеры не предсказанных землетрясений- 1-го Газлийского 8 апреля 1976г., Таваксайского 1977г., Назарбекского 1980г. и т.д.

К настоящему времени по каждому из вышеуказанных методов составлены методические инструкции, содержащие обоснования выбора района исследований, применяемой аппаратуры, способа измерений, оценку точности измерений, выделение аномальных изменений, интерпретация полученных результатов, учет фоновых и других типов вариаций и т.д.

Интенсивности предвестниковых аномалий не очень большие. Порою интенсивность предвестника не превышает величину вариаций поля, связанного с другими процессами в земной коре. Поэтому успех работы по выделению предвестника ожидаемого землетрясения зависит от типа применяемой аппаратуры. К настоящему времени по каждому методу содержатся высокоточные измерительные приборы. Точность измерительной аппаратуры на порядок выше интенсивности выделяемых предвестников. Поэтому применяемая аппаратура вполне отвечает методическим требованиям к точности измерительной аппаратуры.

В настоящее время все станции и объекты мониторинга оснащены современными средствами связи и вычислительной техники.

Имеется множество причин, препятствующих решению проблемы прогнозирования землетрясений. Ниже остановимся на фактах, препятствующих к успешному прогнозированию землетрясений. Попытаемся ответить на причины отсутствия прогнозирования. Проводимые почти во всех сейсмоактивных регионах работы носят научно- исследовательский характер. Они направлены на выяснение отдельных вопросов проблемы, таких как: временной спектр и морфология вариаций исследуемых полей, физические основания предвестников, теоретические расчеты ожидаемых аномальных изменений различных полей, геолого-тектонические причины возникновения землетрясений, разработка моделей процессов подготовки землетрясений и т.д. Единственная близкая к службе прогноза землетрясений структура организована в Китае. В центре анализа и прогноза землетрясений собирается информация от всех провинций и делаются пробные прогнозы научного характера. В Узбекистане по инициативе Г.А. Мавлянова во второй половине 70-х годов была организована прогнозная комиссия, которая еженедельно даёт пробные прогнозные заключения. За прошедшее время удалось спрогнозировать около 10 сильных землетрясений. Однако есть и не предсказанные: первое Газлийское 8 апреля 1976г., Таваксайское 6 декабря 1977г., Назарбекское 11 декабря 1980г. и другие. Все эти работы носят научный характер.

**Обсуждение.** В Узбекистане специалисты по сейсмологии - сейсмологи долгое время нигде не готовились. В штате Института сейсмологии работали геофизики, геологи, инженеры геологи, гидрогеологи, математики, механики, физики, специалисты по информатике и т.д. После прихода в Институт они переквалифицировались. Для этого требуется несколько лет. В 1970 годах в Геолого-разведочном факультете Ташкентского государственного университета (ныне Национальный университет Узбекистана) была открыта кафедра геофизики с целью подготовки сейсмологов. Однако с течением времени эта кафедра стала готовить специалистов по сейсморазведке. Учитывая это обстоятельство в Постановлении КМ РУ от 19.07.2011 года №208 «Об утверждении Комплексной программы по подготовке населения к действиям при землетрясениях» Минвузу и Академии наук поручено (мероприятие № 14) «Разработка программы курсов по углубленной

подготовке специалистов (магистров) сейсмологов-геофизиков». Начиная с 2017 сейсмологи готовятся на кафедре «Геофизические методы исследований» Национального университета Узбекистана.

Подготовка землетрясения очень длительный и сложный процесс в литосфере. При этом чередуются фазы долгопериодных, среднепериодных и короткопериодных процессов. Для исследования полного процесса нужны длительные режимные наблюдения в одних и тех же местах в течение десятков, сотен лет. Во многих геодинамических полигонах режимные наблюдения проводятся в течение короткого времени и поэтому не могут охватить процесс подготовки землетрясений целиком.

В подтверждение остановимся о результатах наших исследований. На основании анализа 130-150 летних среднегодовых данных мировой сети геомагнитных обсерваторий, аналогичных данных японских исследователей по современным движениям земной коры и мореографических измерений, а также результатов многолетних измерений вариаций магнитного поля на геодинамических полигонах Узбекистана нам удалось выделить долгопериодные предвестники землетрясений, найти зависимости между параметрами комплекса предвестников и землетрясений [4]. На основании данных, полученных на геодинамических полигонах Узбекистана разработана геофизическая модель процессов подготовки землетрясений [8].

Часто в средствах массовой информации пишут «...американцы прогнозом землетрясений не занимаются» или «...японцы прогнозом не занимаются». Эти фразы имеют двоякий смысл. Люди далекие от сейсмологии думают, что американцы и японцы не занимаются проблемой прогнозирования землетрясений вообще, потому что проблема еще не имеет решения и поэтому бесполезно им заниматься и тратить государственные средства впустую. На самом деле основной смысл несколько другой. Американские, японские и другие исследователи многих стран проводят обширные эксперименты по изучению различных вопросов проблемы прогнозирования землетрясений. Эксперименты проводятся в больших объемах и в течение многих десятилетий, другими словами они проблемой занимаются, но прогнозные заключения в различные органы не выдают, т. е. как писали выше, отсутствует служба прогнозирования землетрясений.

Есть категория людей, которые после крупных катастрофических землетрясений выходят к главам государств с предложением нового оригинального способа прогнозирования с помощью сверхчувствительных приборов. Например, после Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года группа тульских ученых вышли с аналогичным предложением к главам государств бывшего союза и Казахстана. Были выделены огромные средства. Однако ни в России, ни в Казахстане никакие положительные результаты так и не были получены. Они так и не показали ни результатов измерений, ни своих приборов.

В точных науках, таких как математика, физика, механика, химия, астрономия и т. д. различные эксперименты можно повторить многократно и получить один и тот же результат. В сейсмологии каждый раз меняются места землетрясений, расположение пунктов наблюдений по отношению к эпицентру, геолого-геофизические условия и другие параметры.

Во многих регионах проводится сейсмопрогностический мониторинг комплекса предвестников. Однако вопросы своевременной передачи информации в центры сбора, обработки и анализа данных организованы не везде одинаково. В одних местах регистрация вариаций исследуемых полей, передача их в центры обработки и анализа организованы очень хорошо. В таких местах вероятность прогноза велика. В других местах измерения не автоматизированы, результаты измерений передаются очень поздно. Они своевременно не обрабатываются. В таких местах прогнозирование землетрясений не возможно.

Главными требованиями к мониторингу сейсмопрогностических наблюдений к настоящему времени являются соблюдение комплексности и жесткая оптимизация сети наблюдательных пунктов. Не соблюдение этих требований может привести к необоснованным заключениям и выдаче ошибочных прогнозов.

Обычно режимные наблюдения проводятся в большом объеме разными методами и разными ведомствами. Каждое ведомство работает по своей программе и проводит автономные исследования. Например, в Узбекистане основные сейсмопрогностические наблюдения до 2018г. были сосредоточены в Институте сейсмологии. Начиная с 2018г. мониторинг комплексных сейсмопрогностических наблюдений проводится Республиканским центром сейсмопрогностических наблюдений при МЧС РУз. Здесь проводятся комплексные сейсмические, деформометрические, гидро-

геосейсмологические и геофизические наблюдения. На основании анализа этих данных Прогнозная комиссия, состоящая из ведущих специалистов Института сейсмологии и Республиканского центра сейсмопрогностических наблюдений при МЧС РУз, выдает прогнозные заключения в соответствующие инстанции. Однако данные геодезических, гидрорежимных и гидрометеорологических наблюдений сосредоточены в Узгеодезкадастре, Госкомгеологии и Главгидромете при МЧС РУз и они не передаются в Прогнозную комиссию, естественно не участвуют в прогнозировании землетрясений в Узбекистане. Это в свою очередь снижает достоверность и качество прогноза в Республике.

Поэтому крайне важным является координация научных исследований, проводимых в различных ведомствах через общественные межведомственные советы. Например, межведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству мог бы координировать научные исследования по проблемам оценки сейсмической опасности, сейсмостойкого строительства и прогнозированию землетрясений.

В многих развитых странах существует закон о землетрясениях, где четко написано права и обязанности каждого ведомства. Принятие такого закона на много облегчит работу различных научно- производственных организаций. Правда, по многим методам прогнозирования землетрясений имеются инструкции и методические указания по выбору района исследований, приборов и оборудования, способам обработки и оценки точности результатов наблюдений и т. д., касающихся, в основном, производства работ. Однако, этого не достаточно, нужен закон о землетрясении.

По нашему мнению важным и определяющим звеном в работах по проблеме прогнозирования землетрясений является также человеческий фактор. Возможно, в недалеком будущем информация о сейсмопрогностических наблюдениях из оптимальной сети стационарных станций автоматически будет передана в центры сбора и обработки данных, будет осуществлена экспертная оценка сейсмопрогностической ситуации и выданы оперативные прогнозы в соответствующие ячейки службы прогноза землетрясений. К сожалению, до настоящего времени многие измерения, особенно в рядовых пунктах, выполняются вручную, материалы отправляются в центры обработки с большим опозданием нарочно или даже по почте. Спектр времен краткосрочных предвестников находится в пределах от нескольких часов до единиц суток, а иногда единиц недель. Поэтому для оперативного краткосрочного прогноза информация от пунктов слежения должна поступать незамедлительно. Отсутствие при разработке моделей реальной геолого- тектонической среды, данных о петрографическом составе пород очаговой области, а также отсутствие проявления физико-химических процессов в микроуровнях. Этот фактор требует дальнейших углубленных научных исследований.

В практике сейсмопрогностических наблюдений часто сталкиваемся с появлением ложных аномалий в геолого- геофизических полях или же наоборот, отсутствием аномальных изменений, связанных с землетрясениями. Каждый случай требует тщательного и также длительного исследования причин появления ложных аномалий или наоборот.

**Выводы.** Как видно из выше изложенного, на данном этапе исследований, прогнозировать место, силу и времени землетрясений теоретически вполне возможно. Для этого нужно организовать службу прогнозирования землетрясений, правильно и целенаправленно организовать работы, создать оптимальную сеть комплексных сейсмопрогностических наблюдений, своевременно передавать результаты комплексного мониторинга в центр анализа и прогноза землетрясений и выдавать прогнозные заключения в специальные органы. Преодоление многих фактов, препятствующих успешному прогнозированию, таких как: отсутствие службы прогноза землетрясений; отсутствие в ВУЗах специальностей, направленных на подготовку сейсмологов и специалистов, занимающихся геологическими, геохимическими, геофизическими и другими аспектами процесса подготовки землетрясений; отсутствие длительных целенаправленных режимных наблюдений, неполное использование результатов мониторинга; разобщенность ведомств, отсутствие межведомственного органа, координирующего проблемы сейсмологии; отсутствие закона о землетрясении; учет человеческого и других факторов, на данном этапе исследований, в наших силах. Остальные факторы, связанные со сложностью геолого- тектонического строения, отсутствием проявления физико-химических процессов в микроуровнях, проявлением ложных аномалий в геолого- геофизических параметрах, сопоставимых с прогностическими или отсутствие прогностических аномалий для некоторых произошедших сильных землетрясений и т. д. требуют дальнейших углубленных научно- методических и теоретических исследований.

### Литература

1. Мавлянов Г.А., Уломов В.И., Султанходжаев А.Н., и др. «Явление изменения химического состава подземных вод при землетрясении». Научное открытие, зарегистрированное 12 июня 1973 г. в Государственном реестре под №129.
2. Мавлянов Г.А., Уломов В.И., Абдуллабеков К.Н., Хусомидинов С.С. Исследование вариаций параметров электромагнитных полей в целях прогноза землетрясений. // Узб. геол. журн., 1979, №5, С.11-15.
3. Абдуллабеков К.Н., Артыков Т.У. Ибрагимов Р.Н. и др. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Монография. Изд. Гидроингео, Ташкент, 2002г. 132с.
4. Абдуллабеков К.Н. Долгопериодные магнитные предвестники землетрясений. ДАН РУз, 2007. №3, С.33-35
5. Sholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. *Earthquake Prediction a Physical Basis* // Science, 1973, v.181, № 4102, 803.
6. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процесса подготовки землетрясений. –Изв. АН СССР. Физика Земли, 1974, № 10, С. 107
7. Добровольский И.П. Распределение деформаций и напряжений при подготовке тектонического землетрясения. Физика земли, 2003, №10, С.33-40
8. Абдуллабеков К.Н. Геофизическая модель процессов подготовки землетрясений. ДАН РУз, 2008 №2, С.49-52
9. Абдуллабеков К.Н., Муминов М.Ю., Туйчиев А.И. Технология прогнозирования землетрясений в Узбекистане. Проблемы сейсмологии в Узбекистане-Ташкент, ИС АН РУз, №6 , 2009. С..3-9

## **SEYSMOTEKTONIKA VA GEODINAMIKA**

УДК 550.34

**Атабеков И.У.**

*Институт сейсмологии АН РУз, Республика Узбекистан, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)*

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ЛИТОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

**Atabekov I.U.**

*O'zR FA Seismologiya instituti, Toshkent sh., O'zbekiston Respublikasi, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)*

#### **Markaziy Osiyo litosferasidagi tektonik oqimlarining matematik modeli**

**Annotatsiya.** Stoks tenglamalari yordamida Markaziy Osiyo litosferasidagi tog jinslarining oqimlarining matematik modeli yaratilgan bo'lib, u yer qobig'idagi haqiqiy vaziyat va ma'lum geologik, strukturaviy va seysmologik rekonstruksiya qilingan ma'lumotlar o'rtasida ko'prik vazifasini bajaradi. Tenglamalarning chegaraviy shartlari sifatida GPS geodeziyadan olingan ma'lumotlar ishlatilgan. Uch o'lchamli uzluksiz mexanika tenglamalari geodinamik xususiyatlarga asoslanib chuqurlik bo'yicha o'rtacha baholanadi. Tog' jinslari oqimining o'rtacha tenglamalarining o'ng tomoni litosferaning zamonaviy tektonik zo'riqishlari va yer sathining reliefi koordinatalarini o'z ichiga oladi. Tektonik zo'riqishni xisoblash uchun orogenez davrda litosferani modellash tiruvchi elastik prizmaning deformatsiyalarini topish uchun teskari masala echildi va litosfera chegaralarida Markaziy Osiyo rel'efini zamonaviy tuzilishini yuzaga keltiradigan zo'riqishlar aniqlandi. Topilgan tektonik zo'riqishlar va harakatlanish tezligining qiymatlari ushbu hududga taaluqli GPS geodeziya ma'lumotlariga qoniqarli ravishda to'g'ru keladi.

**Tayanch so'zlar:** O'rta Osiyo; tektonik zo'riqish; seysmotektonik oqim; er qimirlash mexanizmlari; chegaraviy integral tenglamalar.

**Атабеков И.У.**

*Институт сейсмологии АН РУз, Республика Узбекистан, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)*

#### **Математическая модель тектонических течений в литосфере Центральной Азии**

**Аннотация.** С помощью уравнений Стокса создана математическая модель тектонического течения горных масс в литосфере Центральной Азии, которая служит связующим мостом между реальной ситуацией в земной коре и известными геолого-структурными и сейсмологическими реконструированными данными. В качестве граничных условий использованы данные GPS геодезии. Трехмерные уравнения сплошных сред усреднены по толщине литосферы, с использованием свойств геодинамической постановки задачи. Правая часть усредненных уравнений течения горных масс содержит современные тектонические напряжения литосферы и координаты рельефа земной коры. Для получения тектонических напряжений, решена обратная задача упругости для призматического тела, моделирующего литосферу в период орогенеза и таким образом, найдены напряжения на границах литосферы, которые создают современный рельеф Центральной Азии. Полученные числовые значения тектонических напряжений и скоростей перемещений находятся в удовлетворительном согласии с данными GPS геодезии для рассматриваемой территории.

**Ключевые слова:** Центральная Азия, тектонические напряжения; сейсотектоническое течение, механизм землетрясения, граничные интегральные уравнения.

**Atabekov I.U.**

*Institute Seismology Academy of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)*

#### **Mathematical model of tectonic flow in the lithosphere of Central Asia**

**Annotation.** With the help of the Stokes equations, a mathematical model of the tectonic flow of mountain masses in the lithosphere of Central Asia has been created, which serves as a bridge between the actual situation in the earth's crust and known geological, structural and seismological reconstructed data. The GPS geodesy data are used as boundary conditions. The three-dimensional equations of continuum mechanics are averaged over the depth, using the properties of the geodynamic formulation of the problem. The right side of the averaged equations of the flow of rock mass contain modern tectonic stresses of the lithosphere and the coordinates of the relief of the earth's crust. To obtain tectonic stresses, the inverse problem of elasticity for a prismatic body simulating the lithosphere during the orogenic period was solved, and thus, such stresses were found at the boundaries of the lithosphere which create the modern relief of Central Asia. The obtained numerical values of tectonic stresses and movement velocities are in satisfactory agreement with the GPS geodesy data for the territory.

**Key words:** Central Asia; tectonic stresses; seismotectonic flow; mechanism of earthquakes; boundary integral equations.

**Введение.** Тектонические напряжения и деформации горных масс, происходящее за относительно короткое время, может дать важную информацию для обсуждения подготовки землетрясения. Более того, развитая в настоящее время регулярная возможность мониторинга движения земной коры с помощью GPS само собой ставит вопрос о построении математической модели тектонического течения согласующаяся с получаемыми геодезическими данными. Ещё Ризниченко Ю.В. [1] предлагал для задач сеймотектонических течений горных масс привлечь уравнения Стокса, где в качестве граничных условий берутся реальные скорости перемещений. При выводе уравнения Стокса относительно скоростей перемещения земной коры необходимо учитывать начальных напряжений, которые образовались за современный период. Эти напряжения являются результатом деформации рассматриваемого региона, которые напрямую выражены в формировании рельефа местности. Известно множество попыток выяснить причину образования рельефа, т.е. обнаружить в Земле действие некоторого механизма, который был бы в состоянии вызвать силы достаточной величины, чтобы произвести сжатие, прогиб и утолщение земной коры. Основным источником движения считается неравномерное во времени и в пространстве тепло глубоких недр, которое создает конвективное (тепловое, плотностное) движение в мантии. При определении напряженного состояния литосферы многое зависит от принятой модели движущего литосферную плиту энергетического источника. Не вдаваясь в подробности обзора имеющихся многочисленных схематических и гипотетических механизмов, отметим, что одной из правдоподобных версий напряженного состояния литосферы Центральной Азии является действия Индийской и Аравийской плит с одной стороны и Евразийской плиты с другой.

В данной работе для граничных условий задачи Стокса использованы современные данные GPS геодезии. Трехмерные уравнения сплошных сред усреднены по толщине, с использованием свойств геодинамической постановки задачи. Правые части усредненных уравнений Стокса содержат значения тектонических напряжений литосферы в качестве начальных напряжений и современного рельефа. Поскольку вес процесс формирования земной коры математически моделировать невозможно, то попытаемся получить усредненные современные тектонические напряжения Центральной Азии из решения упругой задачи. Определим методом проб и ошибок комбинацию граничных напряжений для упругого призматического тела покоящегося на жидком основании (модель литосферы плавающая на астеносфере, в исходном состоянии) боковые края которой подвергаются латеральным сжатиям (действия перечисленных плит), вследствие чего призма приобретает соответствующее современному рельефу вертикальные перемещения.

**Методы решения.** Напряженное состояние тяжелой сплошной среды определяется уравнениями равновесия:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad i,j=1,2,3 \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений, запятая  $j$  означает дифференцирование по декартовым координатам  $x_j$ ,  $F$  ( $0,0,\rho g$ ) – массовая сила. Решение трехмерных уравнений (1) довольно проблематично, поэтому предлагаем один способ упрощения этих систем с учетом специфики геодинамической постановки задач. А именно: размеры рассматриваемой территории в плане намного больше по сравнению толщины литосферы; на поверхности земли напряжения отсутствуют; на контакте плит с астеносферой касательные напряжения являются силами трения, и литосфера там находится в изостатическом равновесии. Эти особенности задачи дают возможность усреднять уравнения (1) по методу «мелкой воды» принятой в гидромеханике:

$$\bar{w}(x_1, x_2) = \frac{1}{(h-H)} \int_H^h w(x_1, x_2, x_3) dx_3 \quad (2)$$

где черта означает усреднение по  $x_3$  (принята географическая система координат и третья ось направлена вертикально вниз),  $h(x_1, x_2)$  – нижняя граница литосферы,  $-H(x_1, x_2)$  – высота поверхности земли от нулевой отметки, которая образует рельеф земной коры. Распишем систему (1):

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{12}}{\partial x_2} = k_a \rho g - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \bar{\sigma}_{12} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \bar{\sigma}_{22}$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{22}}{\partial x_2} = k_a \rho g - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \bar{\sigma}_{12} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \bar{\sigma}_{22} \quad (3)$$

$$\sigma_{33}(x_1, x_2, h) = \left( -\rho g + \frac{\partial \bar{\sigma}_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{32}}{\partial x_2} \right) (h-H)$$

При выводе уравнений (3) учтены следующие соотношения на поверхности Земли и на астеносфере:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}|_H &= 0, \quad \sigma_{13}|_H = 0, \\ \sigma_{23}|_H &= 0, \quad \sigma_{33}|_h = -\rho g (h-H), \\ \sigma_{13}|_h &= -k_a \rho g (h-H), \quad \sigma_{23}|_h = -k_a \rho g (h-H) \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $k_a$  – коэффициент трения на астеносфере.

Используя соотношений между напряжениями, деформациями и перемещениями, безразмерная относительно  $G$  – модуль сдвига, и  $L=111.111$  км (географический 1 градус) уравнения (3) преобразуем для осредненных перемещений:

$$\Delta \bar{U} + \frac{1}{1-2\nu} \text{grad div } \bar{U} = \bar{F}, \quad (5)$$

$$F_1 = -\frac{\rho k g}{G} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \bar{\sigma}_{12} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \bar{\sigma}_{22} + \frac{\nu}{(1+\nu)(1+2\nu)} \frac{\partial (u_3^h - u_3^H)}{\partial x_1},$$

$$F_2 = -\frac{\rho k g}{G} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \bar{\sigma}_{12} - \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \bar{\sigma}_{22} + \frac{\nu}{(1+\nu)(1+2\nu)} \frac{\partial (u_3^h - u_3^H)}{\partial x_2}$$

Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\bar{U}$  – двумерный вектор с компонентами усредненных перемещений  $\bar{u}_1, \bar{u}_2$ . При выводе уравнений (5) использовано следующие предположения для  $i=1,2$ :

$$\bar{\sigma}_{i3} = \frac{1}{2} (\sigma_{i3}|_h + \sigma_{i3}|_H) = \frac{1}{2} \sigma_{i3}|_h = \frac{k_a}{2} \sigma_{33} = \frac{1}{2} \rho k_a g h \quad (9)$$

Уравнения (5) решаются методом последовательных приближений. За нулевое приближение принято решения  $u_3^h - u_3^H = 0$ .

Решим обратную задачу, т.е. найдем таких граничных напряжений, при которых вертикальное перемещение поверхности земли  $u_3(x_1, x_2, H)$  выражаемое из следующей формулы (связывающей осредненных величин вертикального напряжения и перемещений,  $\lambda, \mu$  – упругие константы)

$$\bar{\sigma}_{33}(x_1, x_2) = \frac{\rho g h(x_1, x_2)}{2} = \lambda \left( \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} \right) - (\lambda + 2\mu) u_3(x_1, x_2, 0) \quad (6)$$

дает современный рельеф. В каждой итерации уравнения (5) решаются методом граничных интегральных уравнений [2] относительно  $u_j$  и  $p_j = \sigma_{ij} n_i$  ( $n_i$  – компоненты вектора нормали к границе). На границах блоков касательное  $\sigma_\tau$  и нормальное  $\sigma_n$  напряжения находятся по формулам:

$$\sigma_n = p_1 n_1 + p_2 n_2, \quad \sigma_\tau = -p_1 n_2 + p_2 n_1. \quad (7)$$

Напряжения на границах и упругие константы задачи варьировались методом проб и ошибок до достижения приемлемой формы современных высот рельефа, без учета денудационных процессов. Далее найденные  $\bar{\sigma}_{ij}$  и  $H(x_1, x_2)$  использовались для решения уравнения Стокса. Эти уравнения в терминах усредненных скоростей перемещения  $\bar{v}_i(x_1, x_2)$  имеют следующий вид:

$$-\text{grad } \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} = \bar{F} \quad (8)$$

$$F_1 = k_a \rho g + \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \sigma_{11} + \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \sigma_{12} - \frac{\mu}{(h-H)} \left( \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{1}{2} \frac{\partial H}{\partial x_2} \right) v_1 - \frac{\mu}{2(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} v_2$$

$$F_2 = k_a \rho g + \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} \sigma_{12} + \frac{1}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} \sigma_{22} - \frac{\mu}{2(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} v_1 - \frac{\mu}{(h-H)} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \right) v_2$$

Уравнение несжимаемости в усредненном виде принимает вид:

$$v_3(x_1, x_2, H) = (h-H) \left( \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} v_1 - \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} v_2 \quad (9)$$

Уравнения (8) также решаются методом последовательных приближений. За нулевое приближение принято  $\bar{v}_i = 0$ . В каждой итерации они решаются методом граничных интегральных уравнений относительно усредненных  $v_j$  и  $f_j = \sigma_{ij} n_i$ .

**Результаты и их обсуждение.** Литосфера Центральной Азии состоит из 19 горизонтально-слоистых блоков, разделенные наклонными и субвертикальными разрывными нарушениями [3]. Каждый блок содержит мезозой-кайназойского осадочного чехла, палеозойского покровно-складчатого комплекса, верхнюю кору включая кристаллический фундамент, слоя дилатансии, слоя частичного плавления, нижнюю кору, верхнюю мантию и астеносферу. В данной работе блоки показанные на рисунке 1 приняты зонально-однородными. Стрелками указаны предполагаемые направления действий взаимодействующих плит, с указанием их скорости.

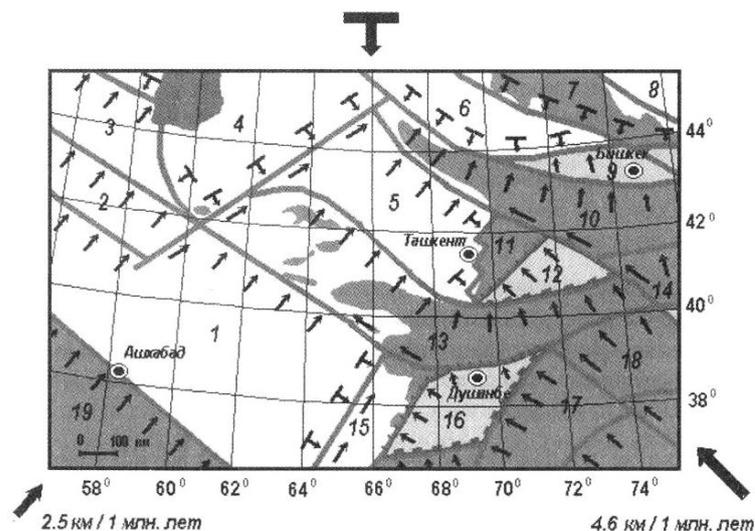
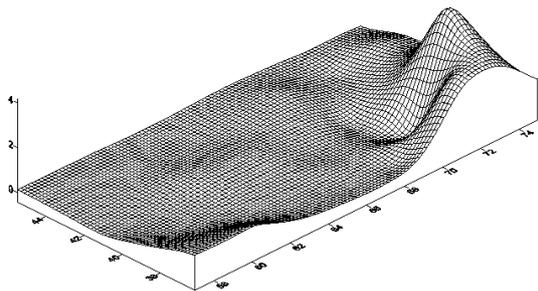


Рис.1 Литосферные блоки Центральной Азии.

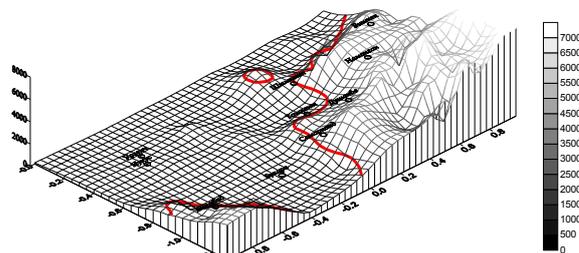
На рис. 2 приводятся рельеф, построенный из численного решения обратной задачи упругости, который получился в результате численного эксперимента методом проб и ошибок, т.е. последовательным уточнением граничных условий уравнений (1). Для начала численного эксперимента напряжения на нижних границах были приняты пропорционально скоростям движения Индийской и Аравийской плит, а направления такими, как указаны стрелками на рис.1. На верхней границе, соответствующая Евразийской плите перемещения приняты нулевые (Т образная стрелка). По ходу вычислительного эксперимента выяснилось, что эти боковые сжатия региона немного отличается от предполагаемого. В качестве верификации модели служила картина рельефа, построенная по современной геологической карте Казахстана и Средней Азии (рис.3).

Для близкого совпадения перечисленных рельефов приходилось последовательно корректировать значения и направления граничных напряжений и упругих констант со средними их значениями  $G=0.31 \cdot 10^5$  МПа и  $\nu=0.25$ . Максимальная высота выбранного участка равной 7500-8000

метрам получилась при значениях напряжений  $(-0.0025G, 0.00625G)$ , с азимутом  $338^\circ$  на правом нижнем углу рассматриваемого прямоугольника.

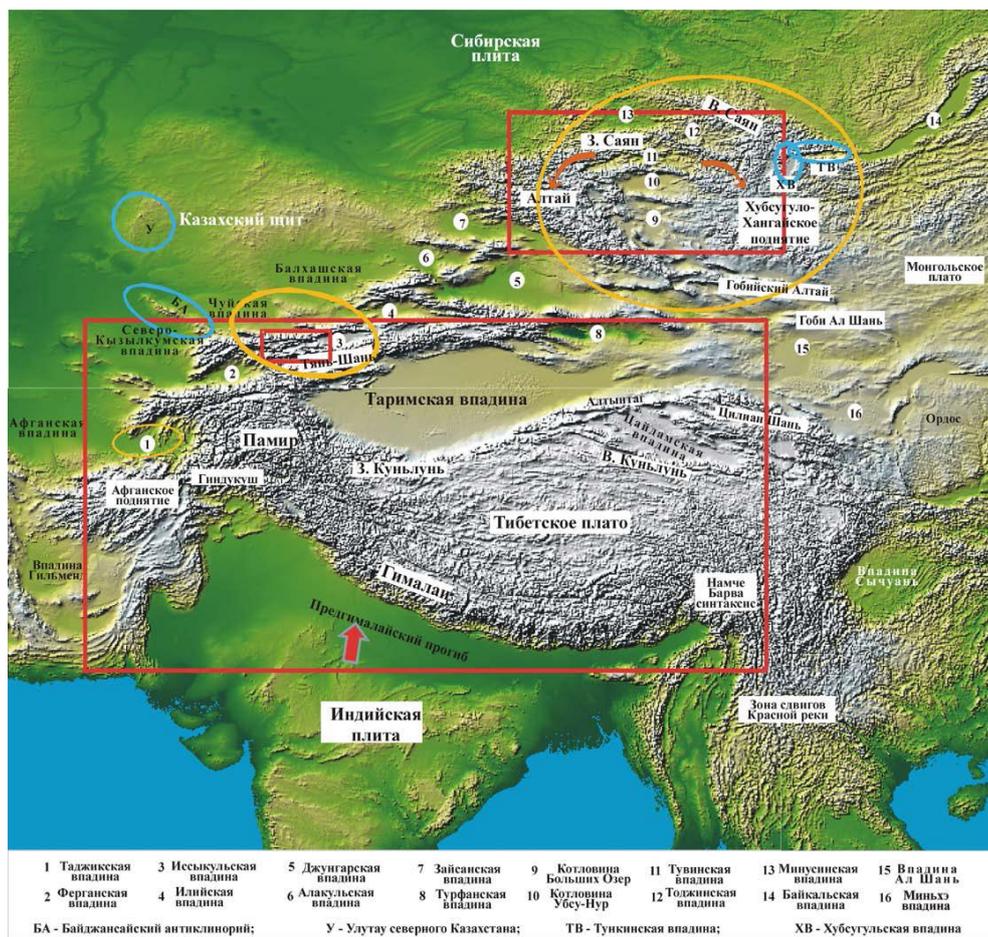


**Рис. 2.** Рельеф, полученный из вычислительного эксперимента.



**Рис. 3.** Рельеф, построенный по геологической карте.

Таким образом, Индостанская плита давит почти вертикально на стороны четырехугольника, что на первый взгляд кажется не согласовывается с направлениями движения Индийской плиты, построенные на основе GPS данных в работе [4]. Но, в данном случае надо иметь в виду, что Индийская плита при своем движении на север оказывает еще боковые сжимающие давления на выбранный прямоугольник, которые выражаются с направлениями сил, в отличия от направления движения.



**Рис. 4.** Стрелкой указано направление движения Индийской плиты, полученное по GPS данным с работы [4].

Поле перемещения (рис.5), хорошо согласуется с результатами полученные методом редукции [5], а вращение с центром в северо-восточной части Ферганской долине подтверждает предположения В.И. Уломова высказанные еще в 1973 году.

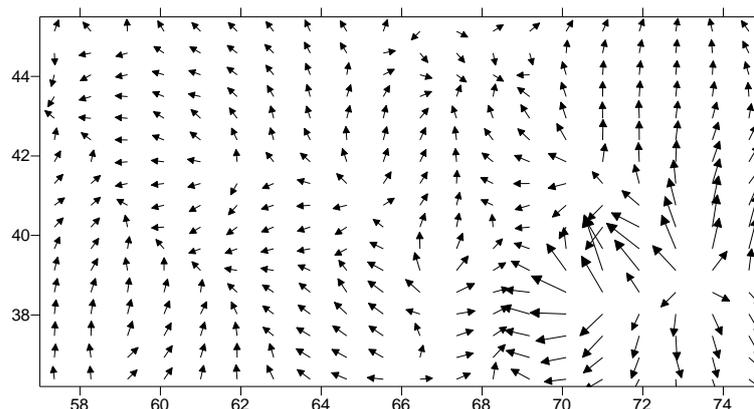


Рис.5 Поле перемещений в Центральной Азии.

На рисунке 6 приведены изолинии максимальных касательных напряжений (для удобства сравнения с результатами других работ в килобарах) для глубин 20 км, которые полностью совпадают с оценками напряжений для территории СССР полученные разными авторами [6,7].

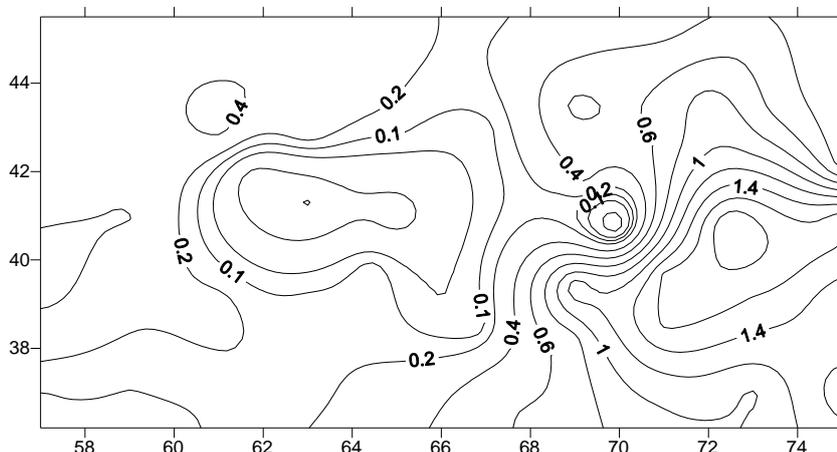


Рис.6 Распределение максимальных касательных напряжений (кбар) для глубин 20 км.

При решении задачи о тектоническом течении вязкость принята равной  $10^{22}$  МПа. Масштаб времени  $t=10^4$  лет выбирается из равенства безразмерных касательных напряжений в уравнениях Ламе и Стокса:

$$\frac{\overline{\sigma}_{ij}^{visco}}{\frac{\mu}{t}} = \frac{\overline{\sigma}_{ij}^{elastic}}{G} \quad (9)$$

Это вполне согласуется с тем фактом, что максимальное время релаксации напряжений горных пород измеряется отрезком  $10^4$  лет. Скорость перемещения Индийской плиты задается равным 10 мм/год установленные методами GPS [8-10].

Евразийская плита считается относительно неподвижной по вертикали. На остальной части внешних границ  $S$  их значения скоростей задаются пропорционально их напряжений полученные при решении вышеописанной упругой задачи. Рассчитанные скорости перемещений в виде вектора и изолинии приведены на рисунках 7 и 8. Сравнение векторного поля скоростей с данными GPS геодезии для отдельных территорий [8-10] дает удовлетворительные результаты.

При оценке тектонической обстановки важными параметрами являются отдельные составляющие скорости по меридианам и широтам (рис.9-10), а также дивергенция (тектоническое течение) и скорость вращения, которые определяются по следующим формулам:

$$\overline{\text{div}v}_{12} = \frac{\partial \overline{v}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{v}_2}{\partial x_2} \quad (10)$$

$$\overline{\text{rot}v}_{12} = \frac{\partial \overline{v}_1}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{v}_2}{\partial x_1} \quad (11)$$

Вектор скоростей перемещения (рис. 7) и изолинии скоростей вращения (рис. 9) показывают, что Ферганская долина сжимается со всех сторон и вращается с центром вращения около (41 с.ш.; 70 в.д) со скоростью угла вращения равной 0.5 нанорад/год. В работах [8-11] приведены картины скоростей современных движений по данным GPS для соседних территорий, включающие Ферганской впадины (40-41.5 с.ш.; 70-72 в.д.), а в работе [9] дополнительно сделаны расчеты дивергенции и скорости угла вращения и установлена скорость вращения около 15 нанорад/год для Ферганской впадины. Для того чтобы наши модельные значения совпали с измеренными геодезическими современными данными нам следует выбирать константу времени  $t=1/3 \cdot 10^3$  год. Сделаем одну оговорку для сопоставления векторного поля с приведенными там картинками. Дело в том, что наши расчеты сделаны относительно 46 с.ш., т.е. там скорости приняты равными нулю. Однако результаты перечисленных работ показывают, что на этих параллелях еще довольно заметные меридиональные скорости. Поэтому наша картина больше всего совпадает с полем векторов работы [9], где скорости рассчитаны относительно середины Ферганской впадины. Наложение реальных скоростей на 46 параллели дает согласованную картину рисунками приведенные в остальных работах. Численные значения скоростей 2-10 мм/год на этой территории тоже совпадают их данными.

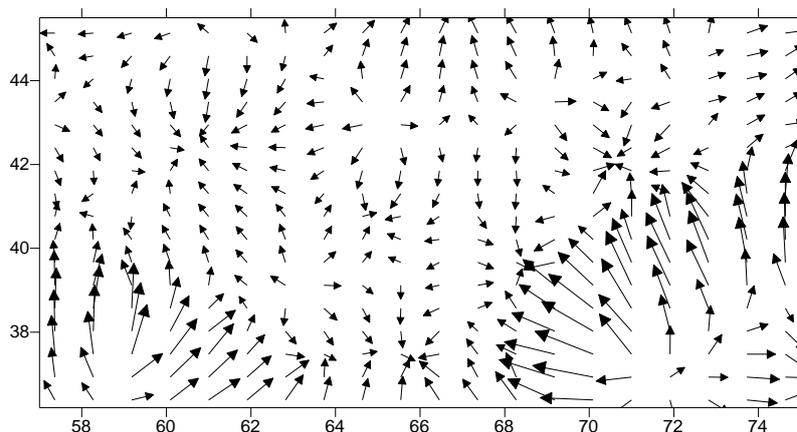


Рис. 7 Поле скоростей.

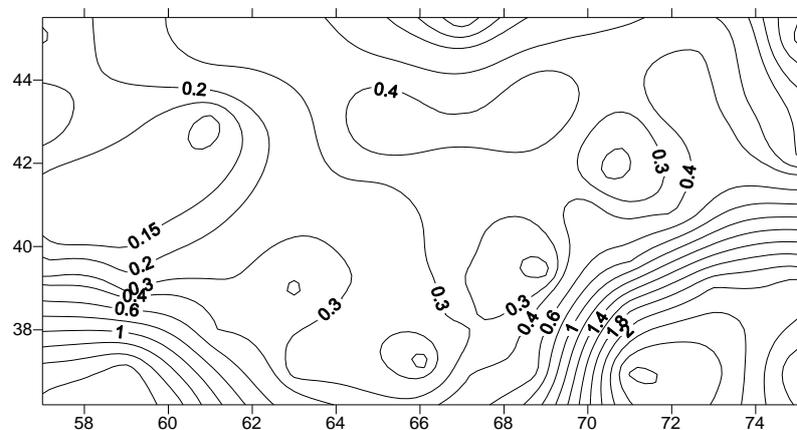


Рис. 8 Изолинии скоростей в см/год.

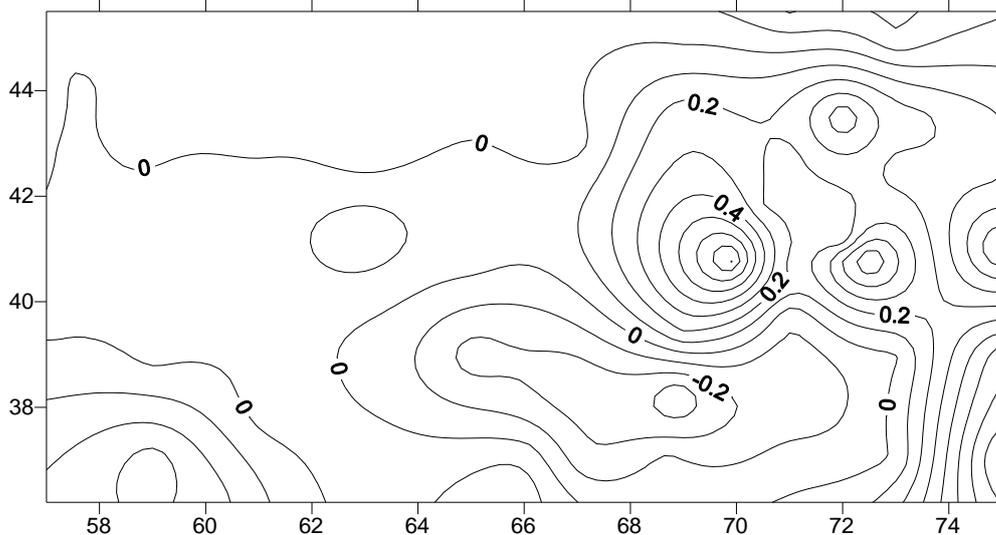


Рис. 9 Изолинии скорости вращения в  $10^8$  1/год.

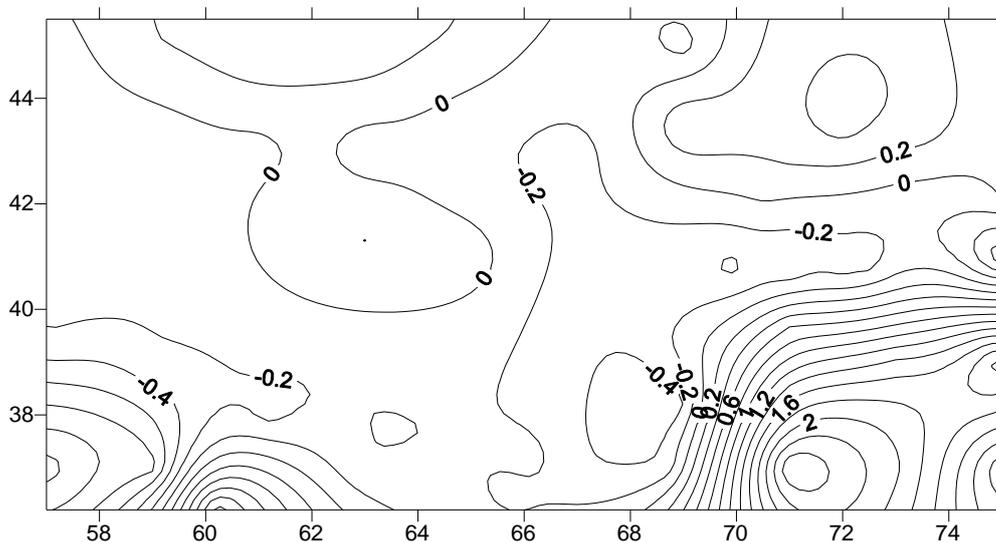


Рис. 10 Широтная скорость в см/год.

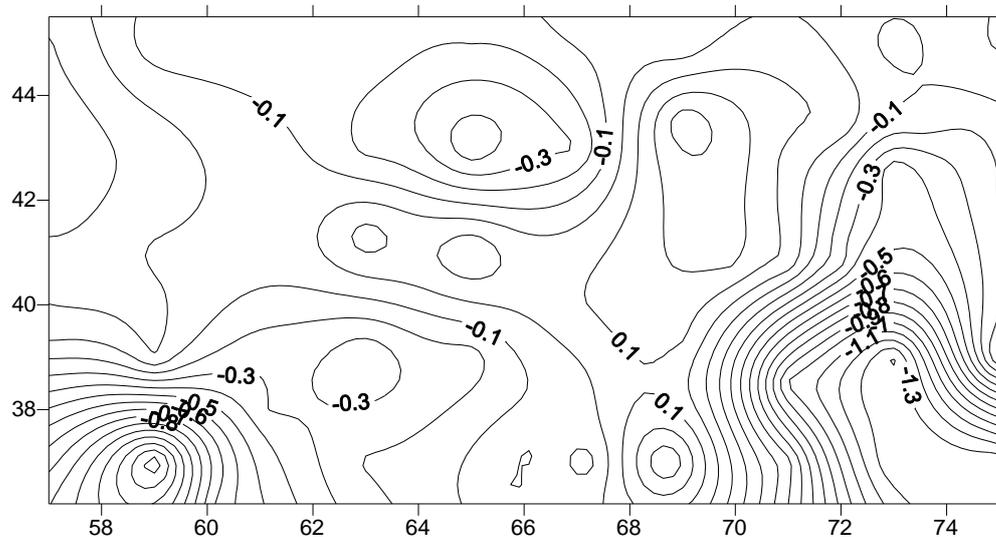


Рис. 11 Меридиональная скорость в см/год.

Незначительное вращение наблюдается также и на территории Таджикской депрессии, только в обратном направлении.

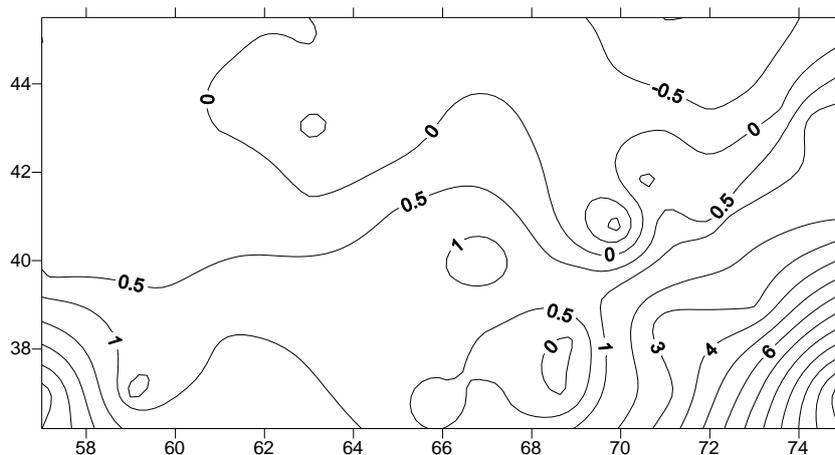


Рис.11 Тектоническое течение, в  $10^8$  1/год.

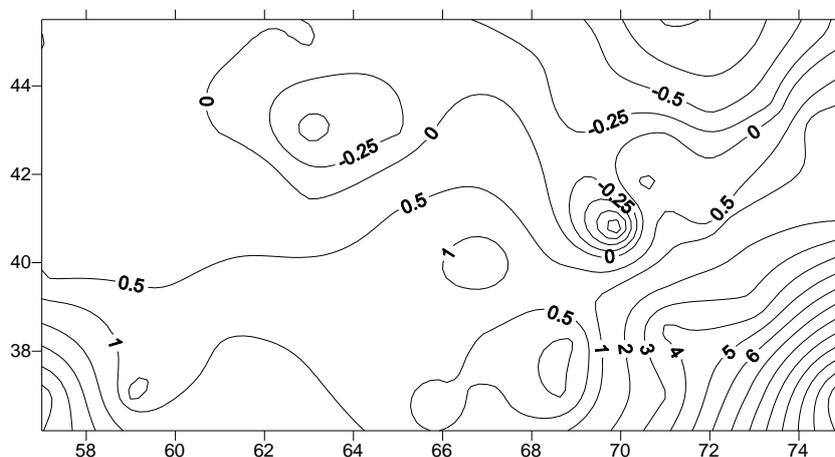


Рис.12 Вертикальная скорость поверхности Земли в см/год.

Изолинии дивергенции по формуле (10) и вертикальной скорости по формуле (6) на поверхности Земли не сильно отличаются друг от друга. Вертикальная скорость почти везде восходящая. Незначительные нисходящие движения (0,1 -0,5 мм/год) имеются в пределах Таджикской депрессии, а также на севере от Чуйской долины.

Таким образом, территория Центральной Азии в целом зажата. Однако, наряду с областями сжатия имеются зоны, где нет деформации, а также незначительные растяжения небольшой части Таджикской депрессии и северной территории начиная от Чуйской впадины.

### Литература

1. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М: Изд. «Наука», 1985, 405 с
2. Бреббия К., Теллес Ж., Врубел Л. Методы граничных элементов, М., Изд. «Мир», 1987 524 с
3. Абидов А.А. Современные основы прогноза и поисков нефти и газа. Изд. «Фан», Ташкент, 2012, 816 с.
4. Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И., Моисенко О.И., Щелочков Г.Г. Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии. //Геотектоника, 2007, No. 41(1), С.13–25
5. Уломов В.И. Динамика земной коры и прогноз землетрясений. Ташкент, Изд. «Фан», 1974, 215 с
6. Гзовский М. В., Основы тектонофизики, М.: Изд. «Наука», 1964, 536 с.
7. Николаев Н.И, Шенкарева Г. А., Карта градиентов скоростей новейших тектонических движений территории СССР. «Тектонические движения и новейшие структуры земной коры» / Под. ред. Николаева Н.И., М:Изд. «Недра», 1967. С.37-43

8. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного го-

8. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). Москва, Изд. «Научный мир», 2005, 400 с

9. Zubovich A. V., Muxamediev Sh. A. Метод наложенных триангуляций для вычисления градиента скорости горизонтальных движений: приложение к Центрально-Азиатской GPS сети // Геодинами-

ка и Тектонофизика, 2010, т.1, №2, С. 169-185

10. Кузиков С. И., Мухамедиев Ш. А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети. // Физика Земли, 2010, №7, С. 33-51

11. Костюк А. Д., Сычева Н. А., Юнга С. Л., Богомолов Л. М., Яги Ю. Деформация земной коры северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии. // Физика Земли, 2010, №3, С. 52-656.

УДК 550.34

Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А., Кузиев Ф.Н.

Институт сейсмологии АН РУз, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)

### ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТУРАНСКОЙ ЭПИПАЛЕОЗОЙСКОЙ ПЛИТЫ И ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЭПИПЛАТФОРМЕННОГО ОРОГЕНА ТЯНЬ-ШАНЯ

Sodiqov Y.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A., Kuziyev F.N.

*O'zR FA Seismologiya instituti, Toshkent sh., O'zbekiston Respublikasi*

**Turon epipaleozoy plitasi va g'arbiy Tyan-Shan epiplatforma orogenining o'zaro ta'sir maydonining zamonaviy geodinamikasi xususiyatlari**

**Annotatsiya.** Mavjud adabiyot (geologo-geofizik va geodezik) ma'lumotlar tahlili asosida Turon plitasi va g'arbiy Tyan-Shan orogenining o'zaro ta'sir maydonining geodinamik modeli taklif etiladi. Hidromexanika tenglamalari yordamida aniqlanadigan tog' jinslari harakatlarining modeli natijalarini yer qobig'ining I-III tartibli bloklarida sodir bo'ladigan jarayonlarni o'rganishga tatbiq etish imkoniyatlari aniqlanadi.

**Kalit so'zlar:** Turon plitasi, G'arbiy Tyan-Shan, orogen, geodinamik model, matematik model.

Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А., Кузиев Ф.Н.

*Институт сейсмологии АН РУз, [atabekovi@mail.ru](mailto:atabekovi@mail.ru)*

**Особенности современной геодинамики области взаимодействия Туранской эпипалеозойской плиты и западной части эпиплатформенного орогена Тянь-Шаня**

**Аннотация.** На основе анализа существующих литературных (геолого-геофизических и геодезических) данных предложена геодинамическая модель взаимодействия Туранской плиты и западной части орогена Тянь-Шаня. Использована модель течения горных масс земной коры, которые описываются уравнениями гидромеханики ползущего движения, для дальнейшего анализа процессов происходящих в отдельных блоках земной коры с региональными разрывными нарушениями I - III порядка.

**Ключевые слова:** Туранская плита, Западный Тянь-Шань, ороген, геодинамическая модель, математическая модель.

Sadikov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A., Kuziyev F.N.

*Institute Seismology Academy of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan*

**Features of modern geodynamics of the interaction area  
Turan plate and the western part of the Tien Shan orogen**

**Annotation.** Based on the analysis of existing literary and geodetic data, a geodynamic model of interaction between the Turan plate and the western part of the Tien Shan orogen is proposed. It is suggested to apply the rock flow model which uses the equations of hydro-mechanics of the creeping motion, for further analysis of the processes occurring in the blocks of the earth crust with regional faults of I - III order.

**Key words:** Turan plate, Tien Shan, orogen, geodynamic model, mathematical model.

Комплексный анализ материалов неотектонических и геодинамических исследований позволил построить схему неотектоники и геодинамики области взаимодействия Туранской плиты и западной части эпиплатформенного орогена Тянь-Шаня. В основу этой схемы (рис.1) положены

данные многочисленных геолого-поисковых, геофизических исследований, проведенных учреждениями Министерства геологии и Академии Наук Узбекистана. Были также учтены публикации авторитетных специалистов Узбекистана (О.М. Борисов, В.И. Троицкий, М.А. Ахмеджанов, Ф.Г. авторитетных специалистов Узбекистана (О.М. Борисов, В.И. Троицкий, М.А. Ахмеджанов, Ф.Г. Долгополов, Р.Н. Ибрагимов, Д.Х. Якубов, А.Р. Ярмухамедов и др.) и стран СНГ (В.С. Буртман, И.Е. Губин, М.Г. Леонов, В.И. Макаров, А.А. Никонов, В.Г. Трифонов, А.М. Бабаев, К.Е. Абдурахматов, О.К. Чедия и др.). Таким образом, в пределах плиты в составе осадочного чехла выделяются синеклизы, изометричные и линейные сводовые поднятия, тектонические ступени, рифтоподобные впадины, отдельные складки и др. В строении постплатформенного орогена также участвуют различные по морфологии, преимущественно линейные поднятия и разделяющие их рифтоподобные и рамповые, часто асимметричные прогибы и впадины. Положение и морфологии мезозойских и палеогеновых структур согласуется со структурой палеозойского складчатого основания, внутренней гетерогенностью и изостатической неуравновешенностью слагающих его горных масс. Унаследованное развитие структур осадочного покрова, так и их перестройка, контролировались геодинамическим режимом.

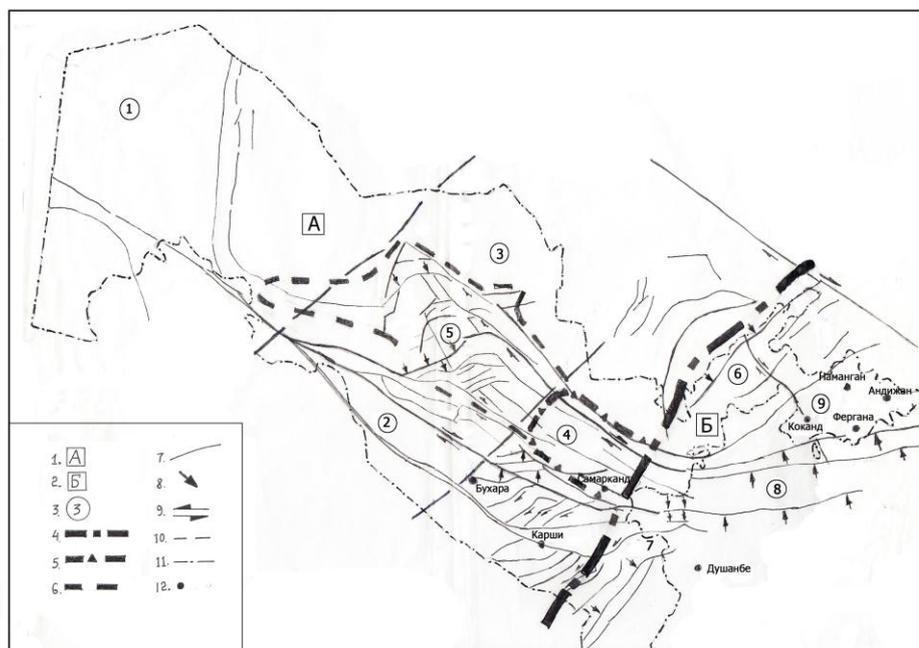
В современном рельефе Туранской плиты сохранились реликты весьма разнообразных по генезису и возрасту форм рельефа, от фрагментов откопанного мезозойского пенеплена, миоценовой поверхности выравнивания, расположенных, ниже неё плиоценовых педиментов и разновозрастных террас плейстоцена до обширных голоценовых равнин бассейнов рек Амударья и Сырдарья. Это является одним из главных показателей полигенетичности неотектонических структур и типов рельефа, длительности их развития. При этом средний и поздний плиоцен явились основными эпохами формирования горных сооружений Тянь-Шаня в очертаниях близких к современным.

Исследования показали, что структуры развитые в пределах Туранской плиты, в зоне сочленения с западной частью Тянь-Шаньского орогена и генетически связанные с последним, являются его запад – северо – западным погружением. Складчато - блоковые поднятия Нуратау и Центральных Кызылкумов, ступенчато погружающихся с востока на запад, отличаются в первую очередь, временем вовлечения в процесс тектонической активизации. В том же направлении наблюдается убывание амплитуд неотектонических движений, мощностей и размеров кайнозойских моласс, интенсивности расчленения рельефа, его абсолютной высоты, изменения геофизических характеристик и сейсмического режима.

К настоящему моменту разработаны различные модели формирования орогенных систем Тянь – Шаня, возникших в условиях сжатия, как зарубежных, так и среднеазиатских исследователей. Общим для большинства моделей является утверждение, что вовлеченные в орогенез тектонические блоки земной коры, по обе стороны Талассо – Ферганского правостороннего взбросо-сдвига, развивались в разных геодинамических режимах. К западу от взбросо-сдвига на фоне меридионального сжатия происходило выталкивание блоков к западу, что сопровождалось образованием субширотных взбросо-сдвиговых зон, меридиональных складок, левостороннее вращение блоков [1-2], Борта Ферганской межгорной впадины были частично перекрыты надвинутыми на нее горными массами палеозойских формаций [3-4]. При этом от стадии к стадии орогенические тенденции нарастали с одновременным вовлечением в орогенез все больших территорий к северу от Памиро – Каракорумской дуги и западу от Талассо – Ферганского взбросо-сдвига. Поэтому граница между орогеном Тянь – Шаня и Туранской плитой не оставалась постоянной. Развитие Тянь -Шаньского орогенеза в кайнозой было более сложным, чем это представлялось в литературе по новейшей тектонике, как единый постепенный складчатый процесс, начавшийся в олигоцене [5-6]. Влияние давления Индийской плиты на Евроазиатскую не ограничивается орогеном Тянь-Шаня, а распространяется в пределы Туранской плиты, где образованы складчато-блоковые системы Нуратау и Центральных Кызылкумов. Они подчинены единообразным и взаимосвязанным с западной частью Тянь-Шаня закономерностям структурного плана. Созданная в процессе неотектонических (средний - поздний плиоцен) движений структура Западного Тянь-Шаня и его западного погружения (плейстоцен – голоцен) имеют складчато-блоковый и сдвиго-взбросовый характер. Это определяет общий современный структурный план. Главную роль в едином современном структурном каркасе играют системы крупных взбросо-сдвигов (рис 1).

Движения по этим взбросо-сдвигам в сочетании с общим интенсивным субмеридиональным сжатием способствовали формированию в их крыльях сопряженных складчато-блоковых и

взбросо-сдвиговых структур с ярко выраженным элементом ротации против часовой стрелки – «конских хвостов». Механизм такого образования обуславливает подобие мегаструктур и осложняющих их форм более высоких порядков в разных частях региона. Это складчатые структуры Чаткало-Курамы, Юго-западных отрогов Гиссара и Центральных Кызылкумов (северная часть). В то же время эти регионы в корне отличаются по целому ряду геолого-геофизических характеристик.



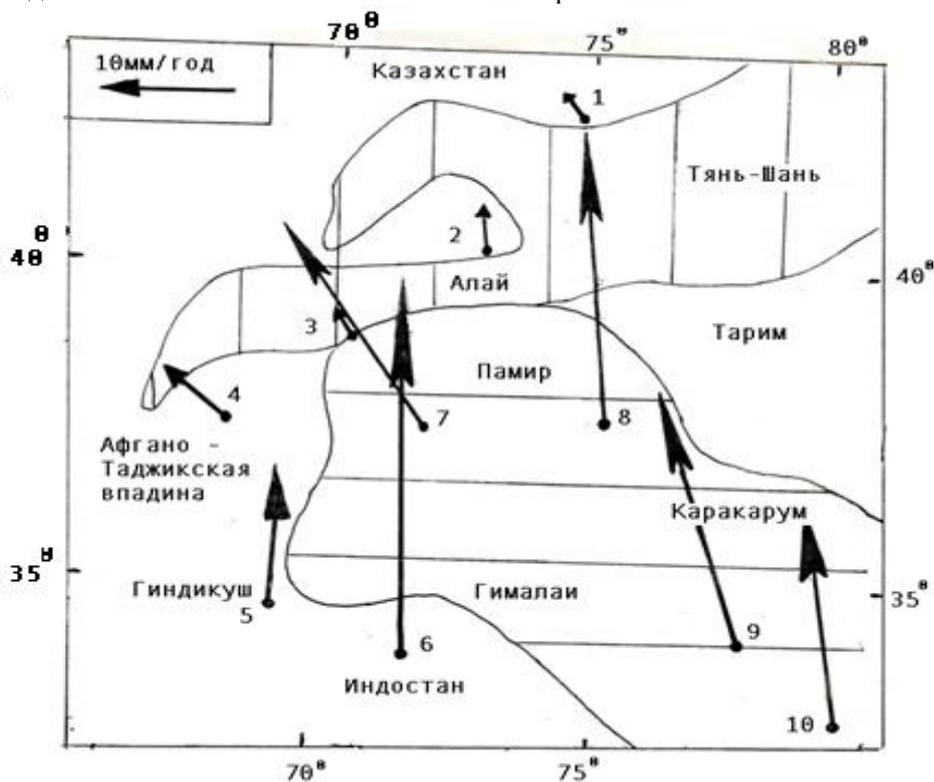
**Рис.1.** Схема неотектоники и геодинамики области взаимодействия Туранской плиты и западной части эпиплатформенного орогена Тянь-Шаня.

1-Туранская плита (А); 2- эпиплатформенный ороген. западной части Тянь-Шаня(Б); 3- крупные тектонические элементы (цифры в кружках - плато Устюрт(1); Амударьинская впадина(2); Сырдарьинская впадина(3)). Складчатые системы: Нуратау(4); Центральных Кызылкумов(5); Чаткало-Курамы(6); Юго-Западных отрогов Гиссара(7); Южного Тянь-Шаня(8). Ферганская впадина(9)); 4- граница Туранской плиты и орогена Западного Тянь-Шанья; 5- часть Туранской плиты вовлеченная в орогенный режим в предплиоценовую фазу усиления тектонических движений; 6- часть Туранской плиты вовлеченная в орогенный режим в эоплейстоценовую фазу усиления тектонических движений; 7 - разрывные нарушения; 8 - направления стрессовых напряжений ; 9 - сдвиги; 10 - скрытые разломы выделяемые по геофизическим данным , отдельные фрагменты которых дешифрируются на космо - и аэрофотоснимках; 11 - граница Республики Узбекистан; 12 - областные центры.

Во первых, совершенно разные истории домезозойского, доновейшего и новейшего геолого-тектонического развития. Во вторых, структурное положение, которое они занимают в складчатой системе Западного Тянь-Шаня. В третьих, особенности современной геодинамики - проявления сильных и слабых землетрясений; характер вторичных экзодинамических явлений – палеосейсмодислокации, дислокации современных землетрясений, трещинообразование и др. В четвертых, геофизические параметры - аномалии силы тяжести; аномалии геомагнитного поля; геотермическое поле; строение земной коры и верхней мантии по геофизическим данным и др.

Таким образом, исследования показали, что взбросо-сдвиги имеют решающее значение в формировании современной структуры Западного Тянь-Шаня и Туранской плиты, обуславливая сочетание транспрессии (сдвига–сжатие) и транстенсии (сдвига-растяжение). Сейсмичность Тянь – Шаня сосредоточена в верхнем слое земной коры – 95 % всех сейсмических событий происходят преимущественно на глубинах до 20 км. Это косвенно подтверждает условное разделение земной коры на нижнюю-упруго-пластическую, и верхнюю - хрупкую. Предполагается, что образование неотектонических складчато-блоковых мегаструктур региона - мегантиклиналей и мегасинклиналей – происходит в результате сжатия за счет перетекания пластических масс нижней коры в

процессе их нагнетания в поднятия и оттока из-под впадин на общем фоне длинноволновых деформаций литосферной мантии [7]. Крупнейшие взбросо-сдвиги, вероятно, проникают, по меньшей мере, до подошвы коры, т.к. в плановом рисунке рельефа с ними структурно связаны как «складки основания», так и «складки покрова». Необходимо отметить, что исследователи при разработке моделей современной геодинамики использовали, наряду с геолого-геофизическими материалами, данные о современных движениях земной коры по наблюдениям из околоземной орбиты. Возможность высокоточных измерений современных движений Земной коры появилась в результате создания глобальной системы «позиционирования» GPS и развития на её основе методов космической геодезии. По данным GPS (Рис.2) определены вектора и скорости перемещения пунктов наблюдений относительно стабильной части Евразии.



Скорости перемещений пунктов наблюдений приведенных на рис.2.: 1-Бишкек ( $2,1 \pm 0,8$ ;  $1,8 \pm 1,6$ ); 2-Ош ( $4,0 \pm 1,3$ ;  $0,6 \pm 1,3$ ); 3-Гарм ( $2,4 \pm 1,2$ ;  $1,2 \pm 1,2$ ); 4-Шаартуз ( $3,9 \pm 1,1$ ;  $5,5 \pm 1,1$ ); 5-Кабул ( $10,0 \pm 1,1$ ;  $0,1 \pm 1,1$ ); 6-Пешавар ( $29,0 \pm 0,9$ ;  $0,8 \pm 0,9$ ); 7-Хорог ( $15,8 \pm 1,1$ ;  $10,7 \pm 1,1$ ); 8-Ташкурган ( $22,5 \pm 1,7$ ;  $1,9 \pm 1,8$ ); 9- R ( $20,3 \pm 1,2$ ;  $5,7 \pm 1,2$ ); 10- I ( $16,6 \pm 1,6$ ;  $1,7 \pm 1,6$ ).

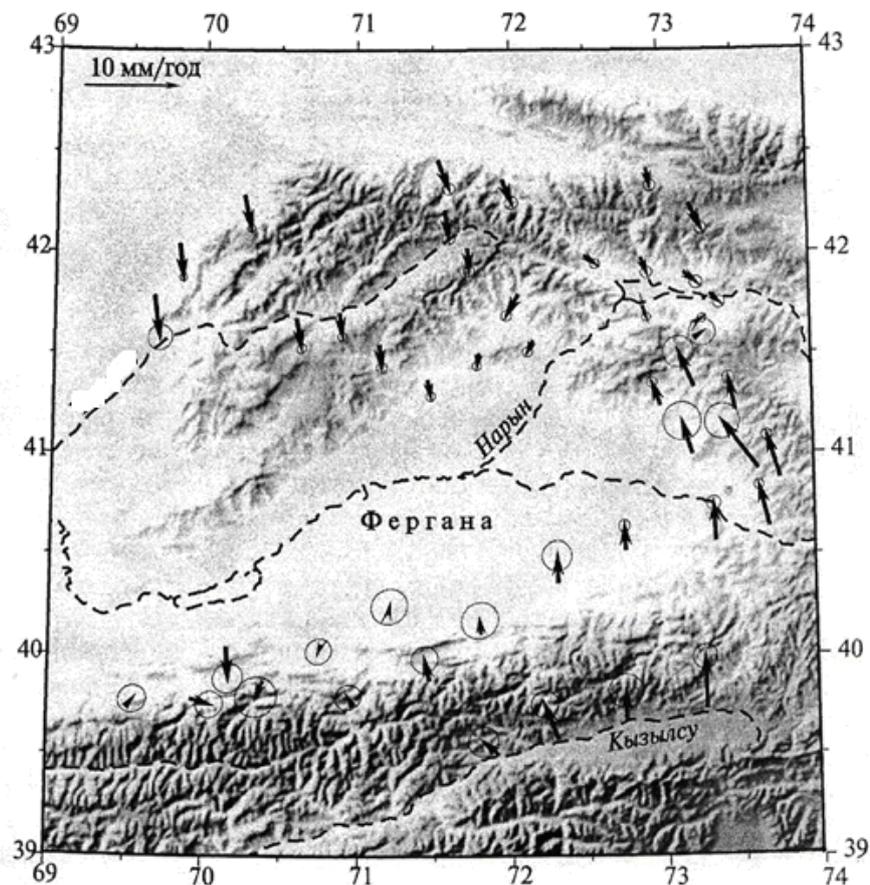
**Рис.2.** Векторы и скорости перемещения пунктов GPS относительно стабильной части Евразии (по [8]).

В.С. Буртман [9] в результате исследования геодинамики Памир - Пенджабского синтаксиса и анализа данных космической геодезии приведенного на рис.2 отметил, что перемещения к северу пунктов, расположенных на Памире, в Северо-Западном Куньлуне и в Тариме, происходят с близкими скоростями 15-20 мм/год. Это свидетельствует о том, что в настоящее время Памир и Тибет перемещаются в сторону Тянь-Шаня совместно. На фронте этого сближения Тарим поддвигается под Тянь-Шань. Более детальная, в тоже время сложная для восприятия схема векторов и величин перемещения пунктов GPS отражена на рис.3.

Здесь можно выделить несколько районов отличающихся ориентацией векторов перемещения. В первую очередь группа пунктов расположенных в пределах Таласского и Ферганского хребтов. Таласская группа направлена на Ю-ЮЗ и все они расположены к северо-востоку от Талассо-Ферганского сдвига. К юго-западу от сдвига, в пределах Ферганского хребта все вектора согласно ориентированы на северо-запад.

В целом обе группы векторов подчеркивают современную геодинамическую обстановку в зоне Талассо-Ферганского правостороннего сдвига. Группа пунктов наблюдения расположенных в пределах Чаткало-Кураминского региона ориентированы в южном направлении и подтверждают

высказанное предположение в работах [1-2], что к западу от Талассо-Ферганского сдвига, на фоне меридионального сжатия, происходит выталкивание блоков к западу с левосторонним (противочасовым) вращением блоков.



**Рис.3.** Векторы и величины перемещений пунктов GPS Западного Тянь-Шаня (по[7]).

Группа пунктов наблюдений расположенных в пределах южной части Ферганской впадины и Алайской долины ориентированы субмеридионально и непротиворечат геодинамическим построениям. Противоположную, южную, ориентацию показывает группа пунктов наблюдений расположенных в долине между саями Лайлак и Исфара, что сложно объяснить с геодинамических позиций, излагаемых в данной работе. Характерно, что по величине перемещений пункты наблюдений расположенные в равнинных частях (Ферганская впадина, Нарынская впадина) уступают пунктам расположенным в горных областях. В целом рис. 2 и 3 однозначно подтверждают субмеридиональную ориентацию сжимающих напряжений действующих в пределах Западного Тянь-Шаня и связанных вероятно с давлением Памирского выступа на Тянь-Шань.

Необходимо отметить, что объем исследований, посвященных современной геодинамике, основанных на формулировке математических соотношений, адекватно (согласно современным представлениям) описывающих природные процессы и допускающие их численное решение, неуклонно растет. Это и понятно, так как первопричина геодинамических процессов и их последствия, динамические и кинематические параметры глубинных тектонических структур, находятся в области предположений. Используемые, специалистами, геолого-геофизические методы изучения геодинамики, в настоящее время, не в состоянии однозначно решать существующие проблемы. Одним из эффективных путей, на взгляд авторов, применения геолого-геофизических данных, для анализа геодинамических процессов, является моделирование напряженно-деформированного состояния в пределах известных складчато-блоковых структур. Первым шагом в этом направлении могло бы быть создание математической модели геодинамики региона учитывающей всю реальную историю развития напряженного состояния литосферы во времени, но это, в настоящее

время, практически не возможно. В работе [10] смоделировано течение горных масс в литосфере (толщиной 100 км, в пределах географических координат 36-46 с.ш. и 56-76 в.д.), на основе уравнений гидромеханики ползущих движений (задача Стокса) соответствующее вышеописанной схеме образования тектонических структур в Центральной Азии. Эти уравнения в свою очередь используют тектонические напряжения земной коры современных движений. В качестве граничных условий для задачи Стокса используются скорости перемещений, согласующиеся с тектоническими напряжениями вдоль выделенных границ. Сами тектонические напряжения находятся как решение обратной упругой задачи [11]. Вычислительным экспериментом строятся граничные напряжения (эквивалентные действиям Индийской, Аравийской и Евразийской плит), которые создают и поддерживают перемещения соответствующие современному рельефу рассматриваемого региона. На рис. 4-5 приводятся скорости перемещений (направления и изолинии), полученные при численном решении задачи Стокса для территории 39-43 с.ш. и 69-74 в.д.

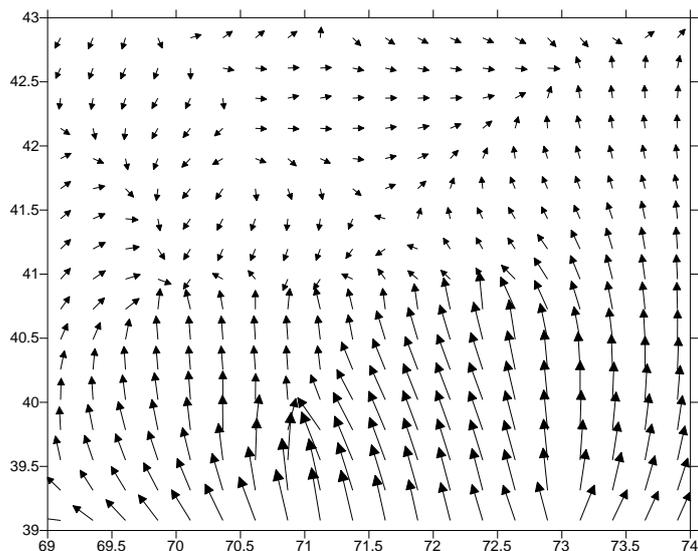


Рис.4 Направления вектора скоростей перемещения Западного Тянь-Шаня.

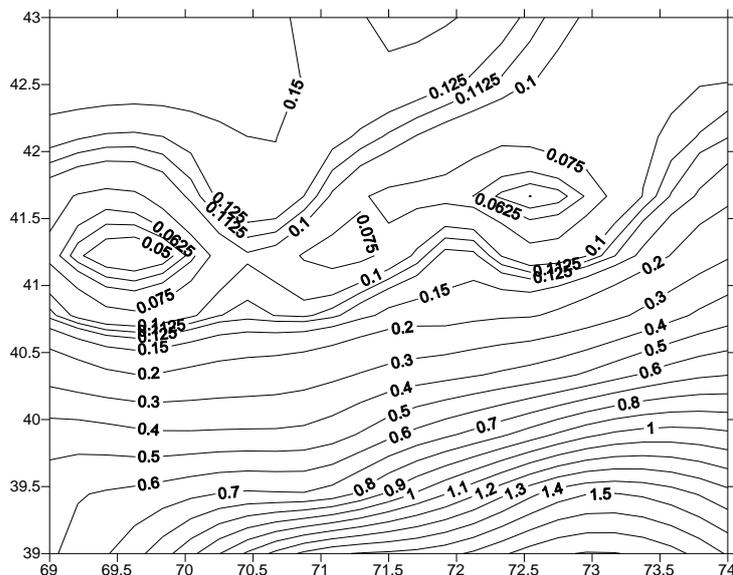


Рис. 5. Модуль горизонтальных скоростей перемещения Западного Тянь-Шаня, в см/год

Поле скоростей на рисунках 4-5 вполне согласуется с построенной картиной скоростей на основе данных GPS (рис. 3). На рисунках 6-8 приводятся изолинии вертикальной скорости, направления и значения вращения земной коры Западного Тянь-Шаня построенные по результатам задачи.

Поле скоростей на рисунках 4-5 вполне согласуется с построенной картиной скоростей на основе данных GPS (рис. 3). На рисунках 6-8 приводятся изолинии вертикальной скорости, направления и значения вращения земной коры Западного Тянь-Шаня построенные по результатам задачи.

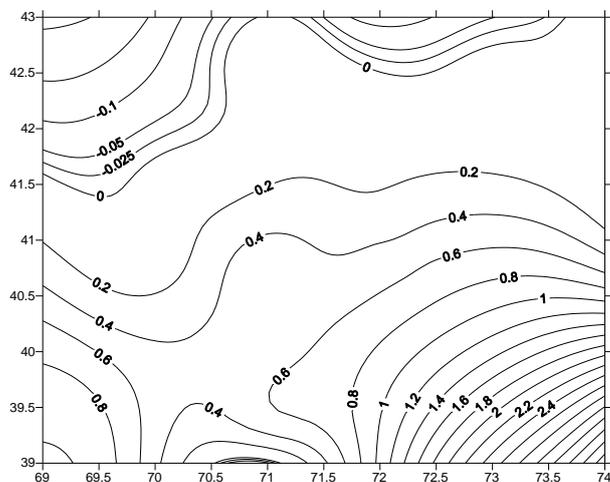


Рис.6 Вертикальная скорость перемещений см/год Западного Тянь-Шаня.

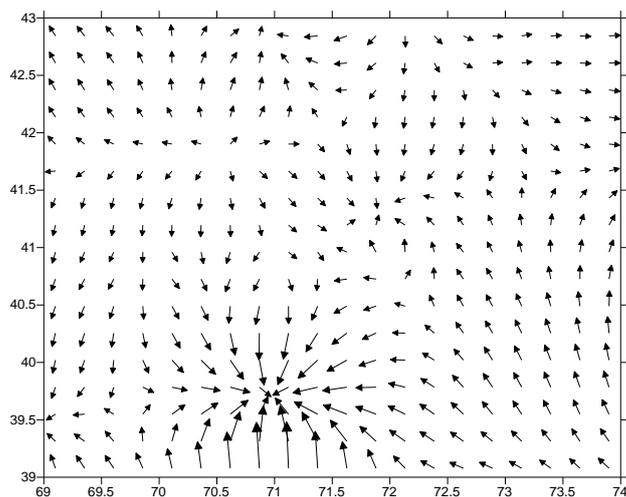


Рис.7 Вектор вращения Западного Тянь-Шаня.

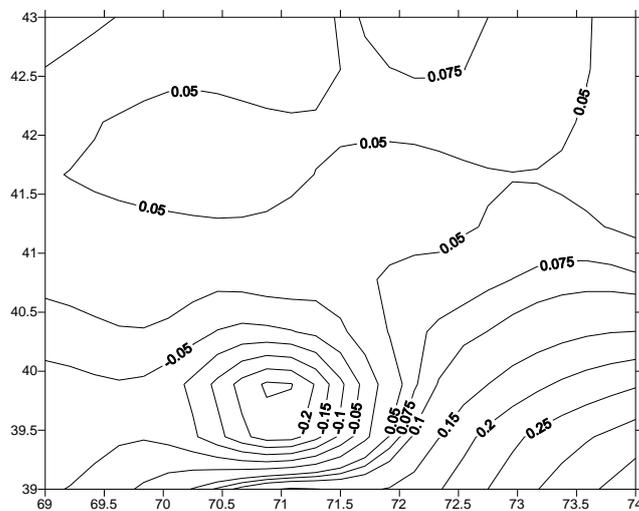


Рис.8 Численные значения вращения Западного Тянь-Шаня, в  $10^8$  1/год.

В заключении можно отметить:

- созданная в процессе неотектонических движений структура Западного Тянь-Шаня и его западного погружения имеют складчато-блоковый и взбросо-сдвиговый характер;
- главную роль в едином структурном каркасе играют системы крупных взбросо-сдвигов Талассо-Ферганского, Бесапано-Южно-Ферганского и Южно-Тянь-Шаньского;
- движения по крупным взбросо-сдвигам в сочетании с общим интенсивным субмеридианальным сжатием способствовали формированию в их крыльях структур с ярко выраженными элементами ротации против часовой стрелки, так называемых «конских хвостов»;
- наблюдается удовлетворительная сходимость поля скоростей перемещений (направления и изолинии) рассчитанная по математической модели с обобщенной картиной векторов и величин перемещений пунктов GPS Западного Тянь-Шаня.

Для понимания природы современных тектонических движений исследуемого региона, дальнейшее усовершенствование математической модели может быть направлено на выделение участков горизонтального взаимодействия складчатых блоков земной коры различающихся основными параметрами современной геодинамики.

### Литература

1. Абдуллаев Г.С., Троицкий В.И., Садыков Ю. М. и др. Геодинамическое районирование мезозойско-палеогенового осадочного чехла Туранской платформы и внутренних впадин Тянь-Шаня. – Материалы Республиканской научно-практической конференции – «Геодинамика фанерозоя Тянь-Шаня: принципы районирования, эволюция и минералогия – Т., НУ РУз – 2009, с. 23-27.
2. Абдуллаев Г.С., Троицкий В.И., Садыков Ю. М., и др. Геодинамическое районирование мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Туранской платформы и внутренних впадин Тянь-Шаня. В сб. «Теоретические и практические аспекты нефтегазовой геологии Центральной Азии и пути решения современных проблем отрасли» - Международная научно-практическая конференция (12 октября 2010 г.), к 50-летию ИГИРНИГМ, 2010, стр. 7-10.
3. Ибрагимов Р.Н. Некоторые вопросы формирования складок Ферганской впадины. В сб. «Сейсмология и сейсмогеология Узбекистана». Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1971 .с.27-34.
4. Раджабов Ш. С. и др. Новые представления о геологическом развитии северного борта в Ферганской впадины в мезо-кайнозойское время. Вестник НУ Уз. № 2/1 2012г. С. 86-88.
5. Шульц С. С. Анализ новейшей тектоники и рельеф Тянь-Шаня. М: Географгиз, 1948 г. 224 с.
6. Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988 г. 491с.
7. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования. М.: Научный Мир, 2005г. 399с.
8. Mohadjer S., Bendick R., Ischuk A. at all, Partitioning of India – Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements // Geophys. Res. Lett. 2010, vol. 37, № L04305, p. 1-6.
9. Буртман В.С. Геодинамика Памир-Пенджабского синтаксиса.// Геотектоника, №1, 2013 стр. 36-58.
10. Атабеков И.У., Артиков М.Т. Моделирование сейсмотектонического течения горных масс земной коры Центральной Азии. // Сборник докладов международной научной конференции. Ташкент, 2018 г, стр. 196-200.
11. Атабеков И.У. Напряжения земной коры Центральной Азии. // Проблемы вычислительной и прикладной математики, №5(11), 2017, стр.20-26.

## **TEXNOGEN SEYSMIKLIK**

УДК 550.341

**Хамидов Л.А.**

*Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова АН РУз, г.Ташкент,  
Республика Узбекистан, [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru)*

### **ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗЛОМАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ, НАХОДЯЩИХСЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ**

**Xamidov L.A.**

*O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining G'.O.Mavlonov nomli Seismologiya instituti,  
Toshkent sh., O'zbekiston Respublikasi, [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru)*

**Yirik suv omborlari yaqin hududlaridagi er qobig'ining yorilgan  
joylarida kuchlanishlar yig'ilishining chiziqli modeli**

**Annotatsiya.** Ishda yirik suv omborlari yaqin hududlaridagi er qobig'ining yorilgan joylarida kuchlanishlar yig'ilishining chiziqli modelini yaratish bo'yicha tadqiqotlarning qator natijalari keltirilgan. Hidrostatik bosimning er qobig'iga ta'siri tahlillangan, hamda energetik qonunlar doirasida muvozanatdagi kuchlar maydonining o'zgarishi tadqiq qilingan. Suv omborlarini ishlatish davrlari er qobig'ining yorilgan joylarida litostatik muvozanat holatiga ta'sir etuvchi hamda ichki muvozanatdagi kuchlar maydonini o'zgarishiga olib keluvchi manba deb faraz qilingan. Amalda aynan shu yoriqlarda etarli darajada yuqori bo'lgan seysmotektonik kuchlar yig'iladi. Belgilangan chiziqli fizik va geometrik bog'lanishlar doirasida, "manbalar" usulidan foydalanib kuchlanishlar maydoni aniqlangan. O'zbekistondagi bir qator suv omborlari yaqin hududlarida, muxandis-geologik faktorlarni hisobga olgan holda, er qobig'ining seysmik faol va muayyan yorilgan hududlari bo'yicha test hisoblar natijalari keltirilgan. Shuningdek 2D Kelvin va 3D Kupradze-Mindlin tenzorlarini  $S^{++}$  muhitida amalga oshirish imkoniyatlari tahlil qilingan.

**Tayanch so'zlar:** model, kuchlar yig'ilishi, kuchlanish, deformatsiya, tenglama, chegaraviy shartlar, yoriq, muvozanat, suv ombori, geologik faktor, algoritim.

**Хамидов Л.А.**

*Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова АН РУз, г.Ташкент,  
Республика Узбекистан, [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru)*

**Линейная модель концентрации напряжений в разломах земной коры, находящихся в ближней зоне деформационного влияния крупных водохранилищ.**

**Аннотация.** В работе исследована возможность построения линейных моделей концентрации напряжений в разломах земной коры, находящихся в зоне деформационного влияния крупных водохранилищ. Проведен анализ влияния гидростатического давления на земную кору и, основываясь на законах сохранения, исследованы нарушения статического поля. Предполагается, что нарушения статического равновесия в период эксплуатации водохранилищ является основным источником сил, влияющих на состояние литостатического равновесия в разломах. В них, как правило, накапливаются достаточно высокие сейсмотектонические напряжения. В пределах линейных физических и геометрических связей, численным методом "источников" и "стоков" определены поля напряжений. Представлены результаты тестовых расчетов для конкретных сейсмически активных разломных зон, с учетом инженерно-геологических факторов ближних зон некоторых водохранилищ Узбекистана. Изложена возможности реализации модели 2D Кельвина и 3D Купрадзе и Миндлина в среде  $S^{++}$ .

**Ключевые слова:** модель, концентрация, напряжения, деформация, уравнение, краевые условия, разлом, равновесие, водохранилище, геологический фактор, алгоритм.

**Khamidov L.A.**

*Institute of Seismology, Academy of Sciences of Uzbekistan,  
Tashkent, Republic of Uzbekistan, [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru)*

**Linear stress concentration model in the crustal faults located in the near zone of the deformation influence of large reservoirs**

**Annotation.** In this paper, the possibility of constructing linear models of stress concentration in the crustal faults located in the zone of deformation influence of large reservoirs was studied. The influence of hydrostatic pressure on the crust has been analyzed and, based on conservation laws, violations of the static field have been investigated. It is assumed that static disruption during the operation of reservoirs is the main source of forces affecting the state of lithostatic equilibrium in the faults. They tend to accumulate sufficiently high seismotectonic stresses. Within the limits of linear physical and geometrical connections, the stress fields are determined by the numerical method

of “sources” and “sinks”. The results of test calculations for specific seismically active fault zones, taking into account engineering and geological factors for the near zones of some reservoirs of Uzbekistan, are presented. The possibilities of implementing the 2D model of Kelvin and 3D Mindlin in the C++ environment are outlined.

**Key words:** model, concentration, stress, deformation, equation, boundary conditions, fault, equilibrium, reservoir, geological factor, algorithm.

**Введение.** Исследования по обеспечению сейсмической безопасности зон деформационного влияния водохранилищ в последнее десятилетие становятся все более значимыми при анализе техногенных катастроф. Процессы в зонах водохранилищ обусловлены в основном не глубинными геодинамическими процессами в земной коре и его локального напряженно-деформированного состояния, меняющегося при эксплуатации водохранилищ. Землетрясения техногенного характера, по своим разрушительным последствиям, количеству человеческих жертв занимают не последнее место среди других природных катастроф. Можно привести много примеров нарушения геодинамического равновесия в зонах влияния крупных водных резервуаров [1,2,3,4]. Поэтому этим проблемам во всем мире уделяется большое внимание. Особенно в странах, на территории которых имеются сейсмические зоны, активность которых существенно превышает уровень регулярности геодинамического равновесия. Для регионов Узбекистана особую опасность представляют сейсмические зоны, расположенные в западном Тянь-Шане, Ферганской долине, включая восточную часть Ташкентского и Андижанского вилоятов, а также Южном Узбекистане, где эксплуатируются ряд крупных водохранилищ и плотность населения достаточно высока.

**Целью работы** является разработка количественных основ расчета геомеханических силовых полей, по которым можно определить распределение первичного поля напряжений в основании чаши водохранилища.

**Состояние вопроса и постановка задачи.** Мировой практикой установлено, что опасная сейсмическая активность проявляется, если общий объем воды в водохранилище превышает 10 млрд.куб.м. и его максимальная глубина достигает 90 м и более [1,2,3,4]. Провоцирующим сейсмическим фактором техногенного плана является не только сама по себе огромная масса воды, но и фильтрация ее в более глубокие горизонты. Наиболее признанным механизмом быстрых (разрывных) движений техногенного плана являются заполнение пор и вновь открывшихся трещин водой. Внутрипоровое давление при этом является той критической добавкой, которая приводит в действие спусковой механизм с образованием толчка землетрясений. По зонам разломов фильтрация воды в более глубокие горизонты земной коры происходит более интенсивно. В результате насыщения зон разломов водой, служащей т.н. «смазкой», - зоны разломов активизируются и по ним начинают происходить подвижки земной коры. Например, те трещины в плотине Саяно-Шушунской ГЭС (СШГЭС), которые появились в 1990 году после того, как заполнение водохранилища достигло проектной отметки 220 м, можно оценивать как факт того, что «процесс пошел» [5,6]. Известно, что за медленными движениями земной коры техногенной природы в определенный момент времени могут последовать быстрые (импульсные), катастрофические движения [4,6]. Факты постоянно появляющихся и расплзающихся в теле плотины трещин характеризуют развитие тектонических процессов в районе водохранилища и плотины СШГЭС [6]. Это объективный процесс: огромное гидротехническое сооружение, являющееся уникальным гидротехническим сооружением мирового масштаба: высота плотины – 245 м., проектная площадь водохранилища – 600 кв.км., объем – 31,3 млрд.куб.м., входящее в тройку мировых лидеров по установленной мощности в 6,400 миллиона киловатт - не может не оказывать техногенного влияния на геологические, тектонические процессы в регионе [6].

По данным А.А. Никонова, на крупных водохранилищах России (Красноярское и Братское) скорость движения земной коры составляет 7 - 10 мм/г. Величина пригибания ложа водохранилища прямо пропорциональна удельной нагрузке воды на единицу площади дна. На водохранилищах с напором в сотни метров (Ингурское - 410, Нурекское - 273, Саяно-Шушенское - 212, Токтогульское - 180 м.) поверхность земли прогибается на 20-25 см. Влияние пригибания земной коры на подъем грунтовых вод как следствие заболачивания почв наблюдалось только на крупных равнинных водохранилищах с исходным неглубоким залеганием грунтовых вод [4,5,6]. Локальные землетрясения, возникающие при заполнении водохранилища, имеют незначительные магнитуды - менее 2 - 2,5, реже проявляются толчки с магнитудой 3.5 – 5.0 и совсем редко 6 – 6.5, и только в

3-х случаях наблюдались разрушительные последствия: в районе водохранилищ Кремаста (Греция), Койна (Индия) и Кариба - в Африке [1].

Например, при проектировании водохранилища Мид на р. Колорадо в США (объем воды 35 млрд. м<sup>3</sup>) было заранее вычислено, что тяжесть воды нарушит изостатический уравновешенное состояние земной коры и вызовет её пригибание с амплитудой до 18 см на площади, почти в 100 раз превосходящей размеры водохранилища. Высокоточные повторные нивелирования, выполненные после заполнения водохранилища, подтвердили эти расчёты [1,2]. Через 20 лет после заполнения чаши водой пригибание коры достигло 20 см и охватило площадь около 30 тыс. км<sup>2</sup>. Такая же картина наблюдалась при заполнении водохранилища Кариба на р. Замбези в Африке (объем 150 млрд. м<sup>3</sup>). Здесь сразу после заполнения искусственного бассейна пригибание коры составило 13 см при расчётной амплитуде прогиба 23.5 см. Оседание поверхности распространилось на площадь, границы которой на 70–100 км отодвинуты от контура водоёма [1,2].

В основном же землетрясения поверхностные, с очагами на глубинах менее 6 км, но в [3,7] отмечались и на глубине 10 км. Эпицентры располагаются, в основном, на расстоянии не более 10 - 15 км. Анализ данных показал, что сейсмическая активность возрастает при достижении напора 100 м. и более. Выявлена взаимосвязь сейсмической активности с площадью и объемом воды в водохранилище.

В районе Токтогульского водохранилища исследования, проведенные Институтом сейсмологии НАН КР совместно с американскими учеными в 1981 - 1982 гг., показали наличие связи между объемом водохранилища и сейсмичностью района [8]. Текущие наблюдения за возбужденной сейсмичностью и данные прошлых лет в работе [8] показали следующее. После 1977 г. (при достижении уровня в водохранилище Н=100 м.) началась сейсмическая активность, выраженная в увеличении числа слабых землетрясений в непосредственной близости от плотины на глубине до 5 км.

Как отмечено в работах В.Б.Смирнов, В.О.Михайлов, А.В.Пономарев, К.Arora, R.K.Chadha и др. «..природа изменчивости сезонного отклика наведенной сейсмичности в области Койна-Варна (Индия), его эволюция в пространстве и времени, связь с изменениями уровня воды в водохранилищах обсуждены во многих публикациях, но вопрос пока следует считать открытым...». Этими исследованиями выявлено, что изменения сезонной сейсмической активности после заполнения водохранилища Койна обусловлены перераспределением в пространстве наведенной сейсмичности и активизацией различных систем разломов [1,9,10].

Анализ данных наблюдений за сейсмической активностью показал наличие её зависимости от скорости изменения уровня воды в водохранилище. Она имеет нелинейный характер и связана с другими влияющими факторами: дополнительной нагрузкой, наличием тектонических разрывов, обводнением, изменением порового давления и т.п. [8,11].

В настоящее время по всему миру выявлено более 100 случаев повышения сейсмической активности, связанных с заполнением водохранилищ [12,13,14]. Различными авторами [12,13,14,15,16,17] предлагаются следующие механизмы воздействия водохранилищ на земную кору, в результате которых возникают плотинные землетрясения:

- а) гравитационное воздействие водохранилища вызывает пригибание земной коры и тем самым нарушает равновесное состояние ее блоковой структуры.
- б) увеличивается поровое давление в массиве горных пород под водохранилищем в результате фильтрации воды по трещинным зонам в земной коре.

Однако до сих пор нет доказательств того, какой из этих механизмов является доминирующим. Если в качестве доказательства первого из них приводятся данные ограниченных по времени повторных геодезических съемок, проведенных до и после заполнения водохранилища, то для второго никаких данных натурных наблюдений нет.

Основой моделирования исходной континуальной системы с учетом кратковременной дополнительной нагрузки-разгрузки системы неоднородностей в ближней зоне водохранилищ при соответствующей формализации заключается в том, что бы результатами численных экспериментов можно было давать необходимые ответы о характере эффектов и о различных величинах напряжений, связанных с сеймотектоническим процессом в натуральных условиях [14,16,17,18]. К числу задач, относящихся непосредственно к сеймотектонике, следует отнести выявление закономерностей деформирования локальных разломов в ближней зоне водохранилищ и их сейсмогенность [18]. Ранее мы провели постановку исследований по разработке методических приемов,

позволяющих описать локальный сеймотектонический процесс на ближних глубинах, где могут возникать техногенные очаги землетрясения при нагрузочно-разгрузочной эксплуатации водохранилища [19]. Аппроксимируя смещения создающих условия нагрузки-разгрузки на границах основания и разломов в зоне влияния водохранилищ внешними сосредоточенными силами, мощность которых является искомым, можно составить граничную задачу для определения влияния дополнительных сил. Близкие глубины зон деформационного влияния водохранилищ находятся под действием фоновых напряжений. В них при эксплуатации водохранилища постепенно накапливаются дополнительные напряжения, и когда они переходят критическое значение, в этих глубинах земной коры образуются очаги местного характера. Основная задача состоит в том, чтобы выделить те возможные очаги, реализация которых непосредственно связано с высокой концентрацией напряжений в естественном деформационном поле при вариациях давления на основания водохранилищ от эксплуатации.

**Методика исследований.** Предварительным условием рационального анализа и исследования физического состояния геологической среды, особенно для горных пород, является создание такой модели, которая воплощает в себе заданные важные свойства реального объекта, а второстепенные характеристики, не нуждающиеся в изучении, игнорирует [20]. Упрощение реальных условий и концентрация внимания на основных моментах позволяют сделать задачу доступной для математического и экспериментального исследования. При этом нет оснований отдавать заведомое предпочтение какой-либо одной механической схеме по сравнению с другими, в которых можно рассчитать источники соответствующих напряжений. Ограничивая в механической модели изучение силовых полей только теми природными характеристиками и свойствами горных пород, которые могут быть связаны с применением законов механики, мы по необходимости отвлекаемся (абстрагируемся) от рассмотрения всех остальных свойств среды, в которой происходит процесс перераспределения внутренних усилий [18,21]. Это означает, что при таком изучении мы фактически имеем дело уже не с действительно существующей средой, а с некоторой приближенной схемой ее, отражающей действительные свойства среды, только в той мере, в какой соответствующее природное образование подчиняется закону механики. Поэтому привлечение к анализу при построении геомеханической схемы только тех параметров состояния среды, которые имеют существенное значение для возможной реализации соответствующего процесса, при моделировании является необходимым условием. Это является и достаточным условием, т.к. сама модель на основе базируется на феноменологическую макроскопическую теорию [19]. В настоящее время разработаны достаточно быстро сходящиеся специальные итерационные процессы для решения численного аналога граничных задач тектонофизики, требующих в некоторых случаях оптимального по порядку числа арифметических действий. В работах [20,21,22] на основе численных анализов показано эффективность метода «источников» и «стоков» (англ. method of «sources» and «drains»-MSD [21]). Идея MSD [20] близка к идее вариационных методов (метод граничных интегралов, метод граничных элементов и т.д.) [21,22]. Решение задачи методом MSD находится в виде линейной комбинации первых  $N$  функций системы фундаментальных решений уравнения равновесия из тензора 2D-Kelvin для двумерных плоских задач и 3D-Mindlin+Kupradze для трехмерных пространственных задач, где коэффициенты линейной комбинации определяются из граничных условий приведенной к системе линейных алгебраических уравнений [20,21]. Основа метода MSD состоит в том, что исходя из матрицы фундаментальных решений уравнений равновесия Ламе (2D-Kelvin для плоскости и 3D-Mindlin+Kupradze для пространства), определяются плотности их распределения удовлетворяющим заданным граничным условиям.

**Условия формирования схемы краевой задачи и тестовое численное реализация.** Вопрос реализации численной модели концентрации напряжений в зонах активных разломов сводится к решению краевой задачи математической физики для уравнения Ламе с соответствующими краевыми условиями [20,21]. При построении алгоритма требуется создание самостоятельных блоков расчета по тензору Грина для двумерных и трехмерных операторов Ламе [20,21]. Анализ результатов исследований проведенных в работах [16,18] показали, что использование тензоров 2D-Kelvin для двумерного поля и 3D-Mindlin+Kupradze для трехмерного поля является наиболее продуктивным. В прямых вариационных методах (а в разностных - все методы, включая конечно-разностные схемы или метод конечных элементов) используют для поиска приближенного решения следующую граничную задачу:

$$LW_i = 0 \quad (1)$$

С граничными условиями:

$$L'W_i / r = F(y) \tag{2}$$

где  $L = \mu \times \nabla^2 + (\lambda + \mu)graddiv$  - оператор Ламе;  $W_i$  - компоненты перемещений;  $L'$  - оператор граничных условий;  $F(y)$  - заданная функция. Выбирая решение уравнения (1) в форме ряда, тождественно удовлетворяющего граничным условиям (2) определяется плотность распределения построенного ряда.

Матрица фундаментальных решений, тензор Кельвина выражаемая формулами Сомилиано имеют вид для 2D-Kelvin [21]:

$$G_{ij}(x,y) = \begin{vmatrix} n \ln r - m \frac{(x-x_0)^2}{r^2} & -m \frac{(x-x_0)(y-y_0)}{r^2} \\ -m \frac{(x-x_0)(y-y_0)}{r^2} & n \ln r - m \frac{(y-y_0)^2}{r^2} \end{vmatrix} \tag{3}$$

и для 3D-Mindlin+Kupradze:

$$\begin{aligned} u &= \left[ n \frac{(x-x_0)^2}{R^3} - \frac{m}{R} \right] P + m \frac{(x-x_0)(y-y_0)}{R^3} Q + m \frac{(x-x_0)(z-z_0)}{R^3} N; \\ v &= m \frac{(x-x_0)(y-y_0)}{R^3} P + \left[ n \frac{(y-y_0)^2}{R^3} - \frac{m}{R} \right] Q + m \frac{(y-y_0)(z-z_0)}{R^3} N; \\ w &= m \frac{(x-x_0)(z-z_0)}{R^3} P + m \frac{(y-y_0)(z-z_0)}{R^3} Q + \left[ n \frac{(z-z_0)^2}{R^3} - \frac{m}{R} \right] N; \end{aligned} \tag{4}$$

где  $u, v, w$  - компоненты вектора перемещений;

$(x_0, y_0)$  - точки приложения сил (точки сингулярности);  $P, Q, N$  - соответствующие компоненты интенсивности по направлениям осей  $x, y, z$

где  $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2$ ;  $n = \frac{\lambda + \mu}{4\pi\mu(\lambda + 2\mu)}$ ;  $m = \frac{\lambda + 3\mu}{4\pi\mu(\lambda + 2\mu)}$ ;

Основная отличительная черта метода MSD от традиционных вариационных методов состоит в том, что, не заботясь об удовлетворении основному уравнению, так как оно тождественно удовлетворяется тензорами 2D-Kelvin для двумерного поля по (3) и 3D-Mindlin+Kupradze по (4) для трехмерного поля, необходимо обеспечить выполнения лишь граничных условий. Искомыми становятся мощности базисных векторов перемещений  $f(P, Q)$  при 2D-Kelvin и  $f(P, Q, N)$  при 3D-Mindlin+Kupradze.

Решение в перемещениях уравнения (1) при (3) будет:

$$W_i = \sum_{i=1}^2 \int_{S_0} G_{ij} [l(x-x_0), (y-y_0)] X_j(x_0) dS_0 \tag{5}$$

Математическая постановка краевой задачи при этом будет следующей.

Жесткое упругое полупространство ослабленное несколькими не ортогональными (в частном случае ортогональными) цилиндрическими не однородностями большой протяженности, испытывает на всем протяжении продольный сдвиг, сжатие, на бесконечности, задаваемое в виде однородной деформации и вертикальное давление от веса водохранилища.

Пусть полупространство, имеющее внутренние цилиндрические концентраторы напряжений и кусочно-неоднородную весомую среду находятся в плоско-деформированном состоянии. Тогда, выбрав центр прямоугольных декартовых координат так, что бы одна ось была направлена по оси концентратора, а остальные - по условию выбора правой системы, условия на границе неоднородностей можем написать:

$$\sigma_{nm}^{(i)} = \sigma_{nm}^{(i+1)}; \mathbf{W}_1^i = \mathbf{W}_2^i; \sigma_{ns}^{(i)} = \sigma_{ns}^{(i+1)}; \tag{6}$$

- для сочетания и участков групп концентраторов;

$$\sigma_{nm}^{(i)} = \sigma_{nm}^{(i+1)}; \mathbf{W}_1^i = \mathbf{W}_2^i; \sigma_{nn}^{(i)} = k \sigma_{ns}^{(i)}; \tag{7}$$

Здесь  $\sigma_{ij}^{(i)}$  -  $jj$ -тые компоненты напряжений в  $i$ -том концентраторе;

$k$  - коэффициент Кулона (трении покоя).

- на свободной поверхности.  $\sigma_{nn} = 0$ ;  $\sigma_{ns} = 0$ ; (8)

- на границе с основанием водохранилища действует квазистатическая нагрузка  $\delta g_v$  от

давления веса объема  $\delta g_v = \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{k=1}^m (F_k \Delta S_k \Delta t_k / S_k)$ ; где  $\pi \approx 3,14$ ;  $\mu$  - модуль сдвига;  $T$  -

общее период нагрузки разгрузки на основание;  $F_k$  - давление на основание при  $\Delta t_k$ ;  $\Delta S_k$  - раз-  
ница изменения площади зеркала при росте  $k$  от разных  $\Delta t_k$ ;  $\Delta t_k$  - интервалы периода от  
нагрузки до разгрузки (или обратно, где всегда  $T > \Delta t_k$ );  $S_k$  - изменения площади зеркала.

Выражения (6) и (7) сформулированы по отношению к выбранной системе координат, цент-  
ры которых установлены в центрах концентраторов, т.е. разломов. Ее назовем местной. Уравне-  
ние (1), условия (8) составлены по отношению к основной системе координат, центр которой  
установлен на свободной поверхности над центром исходного концентратора. Решение данной  
задачи будет суперпозицией решений двух задач: задачи для полуплоскости с нагрузкой от веса  
водохранилища и задачи для плоскости с неоднородностями (как аналог разломов). Если решение  
для плоскости с нагрузкой от веса водохранилища обозначим через  $\tilde{u}, \tilde{v}$  то для полуплоскости с  
неоднородностями можно написать:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \tilde{u}(x, y) + \int_{\Gamma_{01}} \{ \bar{G}_{15}(x, y, x_0) X_5(x_0) + \bar{G}_{16}(x, y, x_0) X_6(x_0) \} dx_0; \\ v(x, y) &= \tilde{v}(x, y) + \int_{\partial_{01}} \{ \bar{G}_{25}(x, y, x_0) X_5(x_0) + \bar{G}_{26}(x, y, x_0) X_6(x_0) \} dx_0; \end{aligned} \quad (9)$$

где  $G_{ij}$  тензор Кельвина. Подставив эти выражения в граничные условия, получим систему шести  
интегральных уравнений с шестью неизвестными функциями плотностей:

$$\int_{\partial_{0i}} \left\{ \sum_{j=1}^4 K_{ij}(x, y, x_0) X_j(x_0) \right\} dx_0 + \int_{\partial_{0i}} \left\{ \sum_{j=5}^6 K_{ij}(x, y, x_0) X_j(x_0) \right\} dx_0 = B_i; \quad (10)$$

где:  $i = 1, 2, \dots, 6$ ;  $B_{1i} = B_{2i} = (k_{s_i} \lambda - \mu \sin 2\alpha_i) \varepsilon_0 + 2\varepsilon_0 \mu k_{s_i} \sin^2 \alpha_i$ ;

$B_3 = B_5 = B_6 = 0$ ;  $B_4 = (x^+ - x^-) \sin \alpha_i \varepsilon_0 + \delta g_v$ ;

Задавая:  $x_j = \frac{2a}{N} \left[ \frac{N+1}{2} - j \right]$  при  $j = 1, 2, \dots, N$   $y_j = \frac{2b}{N} \left[ \frac{N+1}{2} - j \right]$  при  $j = 1, 2, \dots, N$  для ком-

понент перемещений (5) получим:

$$\begin{aligned} u &= \sum_{j=1}^N \left\{ \left[ n \ln r - m \frac{(x-x_{0j})^2}{r^2} \right] Q_j - m \frac{(x-x_{0j})(y-y_{0j})}{r^2} P_j \right\} - \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / S_i); \\ v &= \sum_{j=1}^N \left\{ \left[ n \ln r - m \frac{(y-y_{0j})^2}{r^2} \right] P_j - m \frac{(x-x_{0j})(y-y_{0j})}{r^2} Q_j \right\} - \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / S_i). \end{aligned} \quad (11)$$

при  $u_1/\varepsilon_0 x$ ;  $v_1/\varepsilon_0 x$ ;  $a=5$ ;  $b=2$ ;  $N=10$ ;  $x_0=5$ ;  $y_0=8$ ; [при 3D по (4)  $z_0=-5$ ]  $m=4,5$ ;  $n=3,2$ ;  $Q=6$ ;  $P=8$ ;  
 $\varepsilon=1,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $\alpha=45^\circ$ ; для поля  $0 \leq x \leq 20$ ;  $0 \leq y \leq -20$  шагом 0.5 произведены численные тестовые модуль-  
ные расчеты перемещений по тензорам 2D-Kelvin в среде C++ [21]. Например, для 2D модели (3),  
(4) и (11) является блоками горизонтальных  $u(G_{ij})$  и вертикальных  $v(G_{ij})$  смещения (при тензоре  
2D-Kelvin) в поле действующих геостатических сил. Если предположить давление, действующее  
 $\Delta \sigma$  избыточным только в неоднородностях, то можем считать справедливым:

$$\vec{P} + \vec{Q} + \vec{N} = \Delta \sigma \times \left[ \vec{L} \times \vec{r} \right]; \quad \text{где радиус вектор } \Gamma_i \text{ и } r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2;$$

Подставив их в выражение для смещений, можно рассчитать перемещения для заданных  
условий. Пусть точки  $x_i, y_i, z_i$  соответствовали точке подвижки от исходной точки по  $i$ -той площадке  
разрыва с вариацией  $\Delta \sigma$ . Тогда функция  $\sigma_{ij}(u, v, w)$ , удовлетворяющая уравнению Ламе для про-

странства при определенных  $f(P, Q)$  и при соответствующей вариации  $\Delta\sigma_i$ , дает картину этого распределения.

**Обсуждение результатов.** Подставляя в граничные условия (6), (7) и (8), (9), решение (11) и учитывая (10) получим неоднородную систему линейных алгебраических уравнений для определения компонент  $f(P_j, Q_j)$ . Включая в модули расчета в первом приближении неоднородности с соответствующими физическими данными (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и др.), рассчитаны поле касательных напряжений (рис.1).

**Рис. 1.** Поле касательных напряжений, соответствующее вычисленным смещениям.

Система уравнений, полученная из (10) решена при следующих параметрах: число элементов на границе  $2N=80$ ; Модуль Юнга, коэффициент Пуассона и деформация сжатия введены для грани диорита.

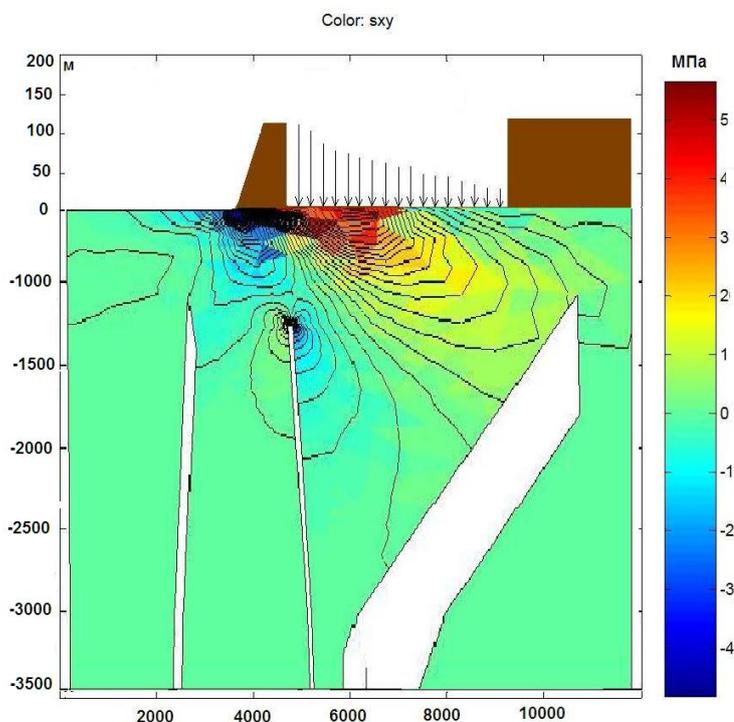
Коэффициент трения во всех неоднородностях принят  $k_s=0,3$ ; центр области  $D$  по отношению к исходной системе:  $x_i = 0$ ;  $y_i = 2,4$ ; Как показали предварительные расчеты, достаточно высокая устойчивость алгоритма получена в пределах  $0,0035 < \Delta S_i/S_i < 0,042$  [21]. При более низких значениях  $\Delta S_i/S_i$  устойчивость его по отношению к исходным данным снижается, а при более высоких значениях  $\Delta S_i/S_i$  счет останавливается из-за уменьшения правой части системы уравнений. Рассчитаны  $\Delta$ -изолинии равных касательных напряжений на верхней части одной неоднородности при устойчивой реализации алгоритма.  $\Delta$ -изолинии оценены по точкам равных значений  $\bar{\tau} = (\tau / \mu \varepsilon_0) \times 10$ ;

Отклонение от основных составляет не более 12,5%. При расчете введены следующие константы:  $E=21 \times 10^4 \text{ МПа}$ ;  $\nu=0,28$ ;  $\rho=7,8 \text{ г/см}^3$ ;  $G=8,2 \times 10^4 \text{ МПа}$ ; которые определяют качество породы и начальная деформация  $\varepsilon_0=2,5 \times 10^{-6}$ . При заданных условиях жесткой защемленности границ неоднородностей с основным горным массивом, концентрацию напряжений мы получили только на основании чаши водохранилища.

С другой стороны, явно выделяется зона распространения максимальных значений касательных напряжений вглубь основания от 0,3 до 0,4 МПа. В табл.1 показаны предварительные оценки напряжений в ближних зонах разрывов на примере возможной вариации давления при срабатывании в Чарвакском, Гиссаракском и Тупалангском водохранилищах. Они рассчитаны для до критических нагрузок с учетом введенных значений граничных условий для напряжений по формулам (6), (7) и (11). Как видно в рис.1 и табл.1, увеличение числа срабатывания прямо пропорционально росту абсолютного значения вариации напряжений.

Можно предварительно отметить, что при нагрузке-разгрузке от чаши водохранилища структуры основания реагируют изменением силового поля с уклоном к концентрации напряжений и обладают приблизительно одинаковым характером изменения поля напряжений при до критических нагрузках.

Область концентрации дополнительных напряжений в зонах неоднородностей (как элемент тектонических нарушений) одних масштабов (размеров) могут локализоваться близко друг к другу.



**Таблица 1** - Оценка напряжений в ближних зонах разрывов при критических нагрузках.

Водо-хранилища	Напряжение	Вариация глубины столба воды $\Delta h$ , м	Результаты расчетов по двум разрывам (тестовый)			
			Число срабатывания	Вариация напряжений, МПа $\times 10^{-2}$	$\sigma_{пр} / \sigma_v$	$\sigma_{пч} / \sigma_v$
Гиссарак	Вертикальные $\sigma_v$	140-110	3	-1,07±0,4	1,08	1,26
	Продольные, $\sigma_{пр}$		4	-1,16±0,3		
	Поперечные, $\sigma_{пч}$		6	-1,35±0,5		
Чарвак	Вертикальные $\sigma_v$	160-130	3	-1,12±0,3	1,15	1,27
	Продольные, $\sigma_{пр}$		4	-1,29±0,4		
	Поперечные, $\sigma_{пч}$		6	-1,43±0,5		
Тупаланг	Вертикальные $\sigma_v$	180-150	3	-1,32±0,1	1,23	1,31
	Продольные, $\sigma_{пр}$		4	-1,63±0,2		
	Поперечные, $\sigma_{пч}$		6	-1,74±0,6		

где  $\sigma_{пр} / \sigma_v$  - отношением продольного напряжения к вертикальному;

$\sigma_{пч} / \sigma_v$  - отношение поперечного напряжения к вертикальному.

При составлении алгоритма численного расчета по (1)-(9) нами в качестве условий вариации давления в водохранилище введена амплитуда прогибания  $\Delta A_{прог,i}$  земной коры при нагрузке или разгрузке. При  $i$ -том шаге расчета она равна сумме приращений амплитуд, полученных на каждом из  $N$  шагов:

$$\Delta A_{прог,i} = \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (\Delta F_i \Delta S_i \Delta t_i / S_i); \quad (12)$$

где:  $\Delta F_i$  – некомпенсированная часть удельной нагрузки;  $\Delta t_i$  – шаг во времени, определяющий время срабатывания в разнице давления  $\Delta F_i$ ;  $\Delta S_i$  – площадь, куда налагается и разгружается сила  $\Delta F_i$ ;  $S_i$  – общая площадь основания, где идет нагрузка-разгрузка;  $T$  – общее время срабатывания. В пределах допустимых значений физико-механических характеристик, согласно табл.2 и согласно [43,44], и с учетом (7), (8), (9), на базе алгоритма для расчета (11) и (12), введя соответствующее преобразование, нами проведены расчеты деформаций и прогибания в известных по [44] своей техногенной сейсмичностью водохранилищах.

В табл.3 представили результаты численно экспериментальных значений рассчитанных напряжений и деформаций для указанных водохранилищ, подвергавшимся к проявлению техногенной сейсмичности в период эксплуатации.

**Таблица 2** - Физико-механические характеристики и параметры упругости.

№	Водохранилища и их расположения по вилоятм Узбекистана	Средние скорости волн в поверхности части земной коры		Коэффициент Пуассона $\nu$	Упругие характеристики, $\times 10^4$ Мпа	
		$V_p$	$V_s$		$\lambda$	$\mu$
1	Пачкамарское (Кашкадарьинский вилоят)	2500	1800	0,20	5,1	2,4
2	Гиссаракское (Кашкадарьинская вилоят)	2800	2100	0,26	3,8	3,1
3	Чарвакское (Ташкентский вилоят)	2900	2300	0,31	2,4	2,6
4	Тупалангский (Сурхандарьинский вилоят)	3100	2500	0,33	2,2	1,8

В таблице 3: Давление на основание водохранилищ выбраны максимальным эксплуатационным пределом как соотношение  $\sigma = F/S^2$  где  $F$  - сила гравитационного веса и  $S$ ,  $m^2$  площадь основания куда действует эта сила; деформационная прогибание основания  $\zeta_i$  при действующем давлении  $P$  выбрано из эмпирических связей;  $V$  – эксплуатационный объем;  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_n$  – соответ-

ственно вертикальное, продольное и поперечное напряжения;  $\sigma_{np}/\sigma_v$  - отношение продольного напряжения к вертикальному;  $\sigma_h/\sigma_v$  - отношение продольного напряжения к вертикальному;  $\Delta\varepsilon_\zeta(\zeta_i) \cdot 10^{-5}$  - вариация деформация по отношению к глубине 8-10 км. земной коры основания водохранилищ.

**Таблица 3** - Результаты численно экспериментальных значений напряжений для разных водохранилищ, подвергавшихся к проявлению техногенной сейсмичности в период эксплуатации.

№	Водохранилища	$P$ , бар	$\zeta_i$ , см	$V$ , км <sup>3</sup>	$\Delta\varepsilon_\zeta \cdot 10^{-5}$
1	Чарвак – Ташкентский вилоят	16,0	1,50	2,100	0,28
2	Тупаланг – Сурхандаринский вилоят	18,0	1,40	0,500	0,23
3	Гиссарак – Кашкадаринский вилоят	14,0	1,20	0,170	0,15
4	Пачкамар – Кашкадаринский вилоят	7,10	0,58	0,270	0,07

Именно на этих глубинах наблюдается сейсмогенный слой, где находятся основные очаги ближних зон этих водохранилищ.

**Заключение.** Результаты анализа расчетов линейной моделью концентрации напряжений в разломах земной коры, находящихся в ближней зоне деформационного влияния крупных водохранилищ позволяют сделать следующие выводы и предположения.

Обоснована численная схема решения связанных краевых задач применительно к сейсмическому расчету нагрузок «сооружение – основание – водохранилище» с учетом дополнительных напряжений, возникающих за счет эксплуатации водохранилища.

Геодезические съемки показали, что прогиб земной коры в районе водохранилища простирается примерно на 6–7 км в обе стороны от осевой линии водохранилища. Компенсационное (окаймляющее) поднятие земной коры происходит по обеим сторонам от осевой линии водохранилищ на расстоянии от 5 до 10 км в каждую сторону. Видимо, процесс прогиба–поднятия формирует в пределах участка прогиба в верхней части коры сжимающие напряжения, а в верхней части растягивающие напряжения. В пределах основных участков компенсационного действия давления, наоборот, в верхней части коры – растягивающие, в нижней части – сжимающие напряжения. Поэтому при более интенсивных вариациях давления изменение напряжений толщи земной коры на большой площади в областях активной тектонической деятельности может являться причиной наведенных сейсмических событий с гипоцентром на большой глубине и большом удалении от водохранилища. Подвижность геологической среды, обусловленная прогибом, высокочастотной нагрузкой или разгрузкой земной коры от веса крупных водохранилищ, может являться одним из механизмов воздействия на напряженно- деформированное состояние пород от высоких плотин.

Выявлено, что в природе воздействия, вызывающего наведенную сейсмичность в зоне активного влияния крупных и высотных плотин одна из основных ролей принадлежит пригрузке района водохранилища массой воды и, вызванным ею изменением поля напряжений. Полученные количественные оценки напряжений геологической среды (в моделях) подтверждает предположения ряда исследователей (Л.М.Плотникова [25], Н.К.Gupta, В.К.Rastogi, Р.К.Chadha, Р.Mandal, С.С.Sarma [26], К.Rajendran, С.М.Harish [27], К.М.Мирзоев, А.В.Николаев, А.А.Лукк, С.Л.Юнга [28], Н.К.Капустян, А.Я.Сидорин, Л.М.Фихиева [29], С.Б.Турунтаев, А.М.Кулюкин, Т.И.Герасимова, М.Г.Дубиня [30]) о жизнеспособности выше указанного механизма.

В пользу нашей количественной модели свидетельствует и тот факт, что наведенная сейсмичность в большей мере зависит от высоты столба воды, чем от объема воды в водохранилищ. Так как наведенная сейсмичность является реакцией среды на изменение условий равновесия, с проявлением релаксационного процесса, то механизмы появления техногенной сейсмичности включают, главным образом, изменение напряженного состояния среды, особенности и величину приложенных сил и нагрузок. Эти механизмы в значительной степени взаимосвязаны, и чаще всего, в зависимости от особенностей воздействия, геологического строения и тектонической обстановки горного массива, возможна реализация нескольких механизмов, которые могут обеспечить ту или иную форму проявления техногенной сейсмичности.

Исследования поддержаны Министерством инновационного развития РУз и АН РУз в рамках Госпрограмм фундаментальных и прикладных исследований на 2017-2020 годы грантами №ФА-Ф-8-008 и № ПЗ-2017091115.

### Литература

1. Gupta H.K. Reservoir induced earthquakes. 1992. Elsevier. 364 p.
2. Yeh T.-Ch. J., Khaleel R., Carroll K.C. Flow through heterogeneous geologic media. Cambridge Univ. Press. 2015. 343 P.
3. Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Пономарев А.В., Arora K., Chadha R.K., Srinagesh D., Потанина М.Г. О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия с 2018 года. // Физика Земли. - 2018. - № 4. - С.100-109.
4. Нурмагамбетов А. Землетрясение 21 февраля 2011 г. и сейсмическая опасность Атырауского региона. // Алматы: «Oil&Gas». - 2011. - № 3. - С.100-103.
5. Водные ресурсы // Гидросфера и производство. 2014. - <http://studopedia.info/6-19489.html>
6. Тектоника СШ ГЭС. // [http://www.sayanogorsk.info/attach/id/10018/%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_%D1%81%D1%88%D0%B3%D1%8D%D1%81.doc](http://www.sayanogorsk.info/attach/id/10018/%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D1%81%D1%88%D0%B3%D1%8D%D1%81.doc).
7. Николаев Н.И. Механизм и особенности возникновения землетрясений, связанных с водохранилищами // Тр. Гидропроекта. Москва. - 1978. - Вып. 65. - С.9-27.
8. Влияние водохранилища на сейсмическую активность района. // Проблемы энергетического сектора. - <http://www.exposcen.ru/okidirs-316-4.html>
9. Yadav A., Gahalaut K., Mallika K., Rao N.P. Annual periodicity in the seismicity and water levels of the Koyna and Warna reservoirs, Western India: a singular spectrum analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. - 2015. - V.105. - № 1. - P. 464-472.
10. Азога К., Chadha R.K., Srinu Y., Selles A., Srinagesh D, Smirnov V., Ponomarev A., Mikhailov V.O. Lineament fabric from airborne LiDAR and its influence on triggered earthquakes in the Koyna-Warna region, Western India // J. Geol. Soc. - India. - 2017. - V.90. - № 4. - P.267-279.
11. Тетельмин В., Даниелов Э. Прогиб земной коры от веса крупных водохранилищ и его последствия. // Москва.: LAP Lambert Academic Publishing. - 2016. - 112с.
12. Алиев М.М., Дещеревский А.В., Идармачев И.Ш. Исследование связи вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления пород с температурным режимом воды в скважине около плотины Чиркейской ГЭС. // Журн. Инженерные изыскания. - №14. - 2016. - С.60-66.
13. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Технологические процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЕК, 2005. 252 с.
14. Gupta H.K., Rastogi B.K. Dams and Earthquakes // Elsevier. Amsterdam. 1976. 229 p.
15. Идармачев Ш.Г., Дейнега А.Г., Омаров Г.Н. Гидродинамические проявления в районе Чиркейского водохранилища как возможный предвестник «плотинного» землетрясения // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана. Махачкала: Изд-во Института геологии Дагестанского филиала АН СССР, 1979. № 3 (21). С. 31-39.
16. Lutfulla Hamidov, Local Seismicity of Reservoir Areas Based on Digital Seismometric Observations. // IV International Conference "Problems of Cybernetics and Informatics" (PCI'2012), September 12-14, 2012. - vol. III. - Baku, Azerbaijan. - P.85-89.
17. Chopra Satinder and Marfurt Kurt Seismic Attributes – a promising aid for geologic prediction. // REC@RDER Canadian Society of Exploration Geophysicists. - 2006. - vol. 31 No. Special: <http://csegrecorder.com/articles/view/seismic-attributes-a-promising-aid-for-geologic-prediction>
18. Хамидов Л.А. Оценка НДС зон разрывообразования вблизи водохранилищ при докритических деформациях. // Проблемы сейсмологии в Узбекистане - Ташкент: ИС АН РУз, 2016. - №13. - С.100-107.
19. Хамидов Л.А., Джумабаев И.М., Артиков Ф.Р., Адиллов К.А. Особенности проявления сейсмичности и геодинамики в зонах деформационного влияния водохранилищ Южного Тянь-Шаня. // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. - Всероссийское совещание. - Иркутск, 23-29 сентября 2012 года. - С.86-88.
20. Rakhmatulin Kh.A., Saatov J.U., Khamidov L.A. The solution of the problem determination of steysi in the rocs zones. // Jur.Mechanical probl.Mech.Eng.-Dep.Worcster, USA vol.3, 1 4, 1980 P.38-42.
21. Хамидов Л.А., Ахмаджонов А.З., Модуль расчета тензоров перемещений 2D-Кельвина и 3D-Купрадза для одной сосредоточенной нагрузки в качестве компонента модели очага предстоящего землетрясения в поле действующих геостатических сил. // Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии - Международная научная конференция. - Ташкент, Узбекистан, 15-16 октября 2018 г. - С.293-297.
22. Бреббия К., Теллес Ж., Врубел Л. Методы граничных элементов. - Москва: Мир. - 1987. - 524с.

22. Бреббия К., Теллес Ж., Врорубел Л. Методы граничных элементов. - Москва: Мир. -1987.- 524с.

23. Саатов Я.У., Быковцев А.С., Хамидов Л.А. Сейсмологические задачи механики. - Ташкент: Мехнат, 1985. - 275 с.

24. Хамидов Л.А. Поля напряжений на основаниях водохранилищ. // Проблемы сейсмологии в Узбекистане - Ташкент: ИС АН РУз, 2015. -№12.- С. 14-19.

25. Плотникова Л.М. Оценка пространственного напряженно-деформированного состояния земной коры в результате заполнения крупных резервуаров. // Геология и минеральные ресурсы. - Ташкент. - 2008. - №4. -С.14-22.

26. Gupta H.K., Rastogi B.K., Chadha R.K., Mandal P., Sarma C.S.P., 1997. Enhanced reservoir-induced earthquakes in Koyna region, India, during 1993–95. *Journal of Seism.* 1(1), 47–53.

27. Rajendran K., Harish C.M. Mechanism of triggered seismicity at Koyna: An evaluation based on relocated earthquakes, // *Current Science*, 2000. V.79, No. 3. - P.358-363.

28. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведённая сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // *Физика Земли*, №10. -2009-С.49-68.

29. Капустян Н.К., Сидорин А.Я., Фихиева Л.М. Воздействие Нурекского водохранилища на геофизическую среду // М.: Изд. ОИФЗ РАН, 1998. -С.24.

30. Турунтаев С.Б., Кулюкин А.М., Герасимова Т.И., Дубиня М.Г. Динамика локализации сдвиговой деформации в песке. // *ДАН*. 1997. — т.354, №1. - С. 105-108.

УДК 551.3:550.3 (575.1)

**Хамидов Л.А.<sup>1</sup>, Ибрагимов А.Х.<sup>1</sup>, Алимухамедов И.М.<sup>2</sup>, Хамидов Х.Л.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова, АН РУз; <sup>2</sup> Центр передовых технологий Министерства Инновационного развития РУз; Ташкент, Узбекистан

[hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru), [alisher1957@mail.ru](mailto:alisher1957@mail.ru), [ilhom75@mail.ru](mailto:ilhom75@mail.ru), [hayrulla\\_classic@mail.ru](mailto:hayrulla_classic@mail.ru)

## ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНАХ ЧАРВАКСКОГО И АНДИЖАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ УЗБЕКИСТАНА

**Xamidov L.A.<sup>1</sup>, Ibragimov A.X.<sup>1</sup>, Alimuxamedov I.M.<sup>2</sup>, Xamidov H.L.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G.O.Mavlonov nomli Seismologiya instituti; <sup>2</sup> O'zbekiston Respublikasi innovatsion rivojlanish vazirligining Ilg'or texnologiyalar markazi; [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru), [alisher1957@mail.ru](mailto:alisher1957@mail.ru), [ilhom75@mail.ru](mailto:ilhom75@mail.ru), [hayrulla\\_classic@mail.ru](mailto:hayrulla_classic@mail.ru)

**Chorvoq va Andijon suv omborlarida seysmik monitoring tizimini takomillashtirish imkoniyatlari.**

**Annotatsiya.** Tabiiy va texnogen seysmik jarayonlar ta'siridagi gidrotexnik inshootlarning barqaror ishlashini ta'minlash uchun suv omborlari hududlarida zilzilalardan hosil bo'ladigan tebranishlar to'g'risida aniqroq seysmometrik ma'lumotlar olinishi kerak. Bunga erishish zamonaviy raqamli monitoring tizimini yaratmasdan deyarli imkonsizdir. Maqolada O'zbekistonning bir necha suv omborlari hududlarida seysmik monitoring tizimini takomillashtirish imkoniyatlari ko'rib chiqildi. Suv omborlari atrofidagi zilzilalardan kelayotgan to'lqinlarni raqamli qayd qilish uchun seysmik stansiyalar tarmog'ini takomillashtirish xolatlari ko'rsatildi. Tarmoq ishlash rejimlarini sinovdan o'tkazish bilan, turli uskunalar va bir tipdagi seysmometrlardan foydalangan holda, to'g'on tebranishlari aniqlandi va mahalliy seysmiklikning mumkin bo'lgan tarqalishi aniqlandi. Chorbog' va Andijon suv omborlari to'g'onlari va qirg'oq nishabliklari tebranishlarining dinamik parametrlari baholandi. Ayrin hududlardagi portlash va yuqori chastotali tebranishlar hosil qiladigan manb'alardan olingan yozuvlar dinamik parametrlarni hisoblamasdan turib ajratildi.

**Tayanch so'zlar.** Seysmik tebranishlar, spektr, to'g'on, suyuqlashuv, tezlik, tartib, rezervuar, operatsiya, seysmiklik, energiya.

**Хамидов Л.А.<sup>1</sup>, Ибрагимов А.Х.<sup>1</sup>, Алимухамедов И.М.<sup>2</sup>, Хамидов Х.Л.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт сейсмологии им.Г.А.Мавлянова, АН РУз; <sup>2</sup> Центр передовых технологий Министерства Инновационного развития РУз; Ташкент, Узбекистан, [hamidov\\_l@mail.ru](mailto:hamidov_l@mail.ru), [alisher1957@mail.ru](mailto:alisher1957@mail.ru), [ilhom75@mail.ru](mailto:ilhom75@mail.ru), [hayrulla\\_classic@mail.ru](mailto:hayrulla_classic@mail.ru)

## Возможности совершенствования системы мониторинга сейсмичности в зонах Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана

**Аннотация.** Для обеспечения устойчивой эксплуатации гидротехнических сооружений в фоне естественных и техногенных сейсмических процессов необходимо получить более точные сейсмометрические данные о механизмах колебания горных массивов в зонах водохранилищ. Без создания современных цифровых систем мониторинга достичь этого практически невозможно. В статье рассмотрена возможность совершенствования системы мониторинга сейсмичности в зонах нескольких водохранилищ Узбекистана. Показано, что для этого вокруг объекта необходимо разбить сеть сейсмических станций (хотя бы временных) для

для цифровой регистрации местных землетрясений. На примере апробации работы сети, пользуясь разными типами оборудования и одинаковыми базовыми сейсмометрами, оценены колебания плотин и выявлены вероятные зоны локальной сейсмичности. Оценены предварительные динамические параметры колебаний бортов Чарвакского и Андижанского водохранилищ и плотин. Выделены шумы от ближних взрывов или источников высокочастотных колебаний без определения расчета динамических характеристик плотины.

**Ключевые слова.** Сейсмические колебания, спектр, плотина, разжижение, скорость, напряжение, режим, водохранилище, эксплуатация, сейсмичность, энергия.

**Khamidov L.A.<sup>1</sup>, Ibragimov A.Kh.<sup>1</sup>, Alimukhamedov I.M.<sup>2</sup>, Khamidov Kh.L.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Institut of Seismology G.A.Mavlyanova AS RUz.; <sup>2</sup> Advanced Technologies Center, Ministry of Innovative Development of the Ruz, Tashkent, Uzbekistan, [hamidov\\_1@mail.ru](mailto:hamidov_1@mail.ru), [alisher1957@mail.ru](mailto:alisher1957@mail.ru), [ilhom75@mail.ru](mailto:ilhom75@mail.ru), [hayrulla\\_classic@mail.ru](mailto:hayrulla_classic@mail.ru)

**Possibilities for improving the seismic monitoring system in the Charvak and Andijan reservoirs of Uzbekistan.**

**Annotation.** To ensure sustainable operation of hydraulic structures in the background of natural and technogenic seismic processes, it is necessary to obtain more accurate seismometric data on the mechanisms of rock mass fluctuations in reservoir zones. Without the creation of modern digital monitoring systems, this is almost impossible to achieve. The article considers the possibility of improving the seismic monitoring system in the zones of several water reservoirs in Uzbekistan. It is shown that for this purpose around the object it is necessary to break up a network of seismic stations (at least temporary ones) for digital recording of local earthquakes. Using the example of approbation of the network operation, using different types of equipment and the same basic seismometers, the dam fluctuations were evaluated and probable local seismicity zones were identified. The preliminary dynamic parameters of oscillations of the Charvak and Andijan reservoirs and dams are estimated. Noises from near explosions or sources of high-frequency oscillations are singled out without determining the calculation of the dynamic characteristics of the dam.

**Key words.** Seismic vibrations, spectrum, dam, liquefaction, speed, voltage, mode, reservoir, operation, seismicity, energy.

**Введение.** В последние годы в комплексе исследований, способствующие повышению сейсмозологической безопасности и эффективности эксплуатации водохранилищ, новым направлением становится локальный сейсмический мониторинг зон особо важных объектов. Исследования влияния техногенных факторов возникающих от строительства крупных водохранилищ требует выполнения большого объема наблюдений. Вокруг объекта необходимо разбить сеть сейсмических станций (хотя бы временных) для возможности регистрации сейсмичности [1,2]. Выполненных ранее исследованиях собраны информации о наиболее крупных водохранилищах Восточного и Южного Узбекистана где фиксированы возможные изменения уровня сейсмического риска от их эксплуатации. Анализированы параметры сейсмичности в разные интервалы: до, во время и после строительства водохранилищ [3,4,5]. Для получения более точных сейсмометрических данных о механизмах колебания горных массивов в зонах водохранилищ проведена совершенствования системы сейсмического мониторинга в зонах ряда крупных водохранилищ Узбекистана.

Ранее работами, проведенными с 1972 года по 2007 годы Л.М. Плотниковой, В.И. Махмудовой, М.Г. Фленовой, Н.М.Джураевым, И.Х.Тимбековым и др. [3,4,5] практически началось реализация первичной основы сейсмического мониторинга в зонах водохранилищ. Эти исследования базировались в основном на аналоговые системы регистрации землетрясений.

После завершения и начала эксплуатации крупного в Узбекистане Чарвакского водохранилища в ближней зоне водохранилища произошло две сильных землетрясений. 13 февраля 1977 года в 15 часов 33 минуты по Гринвичу произошло землетрясение с  $I=5$  баллов по шкале MSK64 и магнитудой  $M=3,6$  в районе Чарвакского водохранилища. Месяц спустя, 15 марта, в 14 часов 07 минут произошел второй, более сильный толчок с  $I=5$  баллов по шкале MSK64 и магнитудой  $M=3,9$ . Как было указано в работах Л.М.Плотниковой, М.Г.Фленовой, В.И.Махмудовой это землетрясение получило название Денапское [3]. Как отмечено в этих работах «интерес к изучению особенностей проявления этих землетрясений связан с решением проблемы влияния водохранилища на сейсмичность района и с вопросами сейсмостойкости уникального гидротехнического сооружения – высокой Чарвакской плотины...». Инженерно-сейсмометрическая служба основанная на старую, частично аналоговую аппаратуру работала в основном в Чарвакском (Ташкентский вилоят), Андижанском (Андижанский вилоят), Гиссаракском (Кашкадарьинский вилоят) и Тупалангском (Сурхандарьинский вилоят).

С 2007 года началось совершенствование существующей до этого цифровой системы инженерно-сейсмометрических наблюдений в водохранилище Чарвак, а с 2017 года в зоне Андижанского водохранилища. С этого же времени организовано система цифрового мониторинга с современной базой обработки сейсмометрической информации.

**Цель.** Поиск возможностей совершенствования мониторинга сейсмичности крупных водохранилищ Узбекистана для определения на базе современных информационно-коммуникационных систем очагов локальных землетрясений, механизмов колебания береговых склонов и тела плотины во время землетрясений.

**Методика.** Методика основывается на методы оценки локальной сейсмичности, метода цифровой регистрации сейсмических волн, математические методы определения собственных частот колебаний плотин и методы обработки, многолетних данные изменений волновых полей в зонах крупных водохранилищ Узбекистана, связанных с землетрясениями.

**Постановка задачи.** В Постановлении Президента Республики Узбекистан, от 9 августа 2017 года за №3190 «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкого строительства и сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан», отмечено необходимость дальнейшего развития методологии мониторинга риск образующих сейсмических факторов и состояния уязвимости крупных гидросооружений на основе современных аппаратных, информационных, телекоммуникационных технологий и модельных представлений [6].

В районах расположения большинства водохранилищ Узбекистана отсутствовали систематические сейсмометрические наблюдения за продолжительный срок. Они проводились, эпизодично преследуя производственные цели для отдельных водохранилищ. Например, для оценки устойчивости насыпной плотины Чарвакского гидроузла (Ташкентский вилоят) и бетонной плотины Андижанского водохранилища (Андижанский вилоят) были поставлены специализированные локальные автоматизированные системы сейсмометрических наблюдений. Контроль над сейсмичностью в зонах водохранилищ проводились в целях сейсмического микрорайонирования зоны строительства и эксплуатации [3,4,5,7]. Поэтому судить об исторической сейсмичности регионов их расположении можно только по данным либо региональных сейсмических сетей, либо служб других организаций, охватывающих обработкой данных этих районов. Произведя анализ исторического и современного состояния системы мониторинга сейсмичности в зонах крупных водохранилищ Узбекистана показало необходимость:

- выделения обеспеченных устойчивой сейсмометрической системой информационной базой зоны водохранилищ Узбекистана с возможностью обработкой данных по записям землетрясений.

- апробация совершенствованной системы мониторинга сейсмичности определением механизмов колебания береговых склонов, тела плотины и основания водохранилищ во время землетрясений с дальнейшим выделением изменения локальной сейсмичности.

Исследования проведены в соответствии с Государственными нормативными документами Республики Узбекистан об обеспечении геодинамической и сейсмической безопасности водохранилищ. Используются результаты организации инженерно-сейсмометрических наблюдений в период эксплуатации водохранилищ выполненных до 2007 года, выполненных в соответствии с требованиями СНиП-II-7-81 (плотины относящихся к сооружениям 1 класса капитальности и расположенных в зоне высокой сейсмичности- 8-9 баллов) [8]. Нами с 2007 года по настоящее время исследования выполнены в соответствии с требованиями ШНК 2.06.11-04, пункта 1.12, для сооружений I-II классов где указано обязательное включение в состав исследований по организации инструментальных наблюдений за поведением сооружений, их оснований и береговых склонов при динамических воздействиях (землетрясения, взрывы и др.) с требованиями обязательного приложения 1 (стр.92, ШНК 2.06.11-04)) [9].

**Объекты и возможности локального сейсмического мониторинга в зонах водохранилищ.** Исследования влияния техногенных факторов от строительства водохранилищ и разработок месторождений полезных ископаемых на окружающую среду, и особенно, на природу сейсмичности требует выполнения большого объема наблюдений. Первичную основу сейсмического мониторинга сейсмичности, где осуществлен сбор данных о сейсмических событиях, анализируем в пределах водохранилищ Чарвак и Андижан.

Чарвакское водохранилище (Ташкенткая вилоят, Восточный Узбекистан) географически расположена на территории Бостанлыкского района Ташкентского вилоята. Оно находится на реке Чирчик несколько ниже по течению места слияния рек Пскем и Чаткал между отрогами Угамского и Чаткальского хребтов западного Тянь-Шаня. Водоохранилище образовано каменно-насыпной плотиной высотой 168 метров Чарвакской ГЭС. Объем водохранилища составляет приблизительно 2 куб. км. Площадь водной поверхности водохранилища составляет более 37 км<sup>2</sup>, протяженность береговой линии около ста километров. Уровень водохранилища значительно понижается в летний период времени, так как его вода используется для задач ирригации и поливного земледелия в долине Чирчика. Она находится в узловой зоне примыкания Чаткальского, Пскемского и Коксуйского рек Приташкентского геодинамического полигона западного Тянь-Шаня. От створа плотины практически начинается, совмещая, с рекой Угам река Чирчик, которая является основным источником пресной воды всей орошаемой и городской зоны Ташкентской долины. Основание водохранилища пересекают ряд сейсмоактивных разломов, такие как Пскомское, Кумбельская и Каржантауская. В этой зоне происходили сильные землетрясения с  $M \geq 5$  Бручмуллинское (1956), Ташкентское (1966), Денапское (1974), Таваксайское (1977), Назарбекское (1980), Ташкентское (2008). Зона по сейсмичности оценена 8-9 балльной по шкале MSK-64 [7,10].

В 2007-2011 гг сейсмометрические наблюдения обновлены организацией цифровой сети для целей оценок колебания плотины в Чарвакском водохранилище, объем которого при максимальном заполнении составляет около 2 км<sup>3</sup>. Она имеет высоту более 120 м и длину более 800 м. В теле плотины установлены 18 цифровых сейсмических станций и проведен анализ записей по обновленной сети АССН «Чарвак». Измерительные пункты (ИП) оборудованы высокочувствительными сейсмографами для записи местных и близких землетрясений с увеличением каналов в зависимости от фона помех 1-го рода от 10000. Диапазон периодов полосы пропускания 0.2-1.2 с, амплитудно-частотных характеристик каналов соответствует главной части спектра сейсмических волн слабых близких и местных землетрясений [10].

Инженерно-сейсмометрические оценки по временной схеме представлены цифровыми записями в 20 ИП. При переходе на постоянную схему инженерных сейсмометрических наблюдений, количество ИП увеличено до 24 трех канальных. Из них 12 ИП в противоположных бортах и в основании остались в прежнем положении. Чувствительность регистрационных каналов сейсмостанции в ждущем режиме установлена для записи скорости слабых колебаний грунта от 1 до 5 баллов ( $V_x = 10$  с) и для более сильных - от 5 до 9 баллов ( $V_x = 1$  с). В качестве сейсмоприемников применялись С - 5 - С с  $T_s = 4,5$  с ( $D_s = 0,6$ ;  $D_{so} = 0,02$ ) и гальванометров ГБ - IV с  $T_g = 0,008$  с ( $D_g = 0,7$ ). На сейсмограммах режимную измеряться максимальные амплитуды скорости колебаний -  $A_{max}$  (мм/с) и соответствующие им периоды колебаний, длительность колебаний. Произведен так же, и расчет относительного изменения интенсивности колебаний  $\delta_i = A_{max(i)}/A_{ma}$ , где  $i$ -номер ИП. Определение сейсмических свойств мелкообломочных и крупнообломочных массивов в зоне плотины Чарвак, как экспериментальный материал при разных нагрузках и объемах воды, выполнялось несколькими методами. Записью слабых далеких землетрясений; изучением спектральных характеристик грунтов анализируя микросейсмы и методом Накамура (HVSR) [11]. Для обработки данных использовалась программы JSESAME и GEOPSY (в среде MATLAB 8.0). Метод регистрации землетрясений малых энергий использовано для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с разными физико-механическими свойствами крупнообломочных массивов. При установке новой аппаратной системы определены постоянные, рассчитаны частотных характеристики всех сейсмоканалов в Чарвакском, Андижанском водохранилищах.

Например, для проведения этих оценок предварительно выбраны записи по существующей сети «Чарвак». Рассмотрен вопрос обработки сигналов от 14 измерительных ИП по всем каналам и компонентам. К началу 2012 года отмечено, что в каналах 13,12,15,16 датчики временно не работали. Начиная с 2012 года, по 2014 год произведен дополнительный монтаж ИП и обеспечена его устойчивая работа. На теле плотины в 23х железобетонных боксах (камеры) урегулированы сейсмометры. Сигналы от сейсмометров через специальный кросс поступали на центральный компьютер, расположенной на сейсмостанции станции расположенной на основании плотины. В рис.1 и 2 показана система в сборе, блок из 6 автоматических цифровых преобразователей (АЦП).

Произведена установка многоканальной системы регистрации сейсмических сигналов на основе серийно выпускаемых 16-разрядных 8-канальных АЦП с предварительными усилителями и

наборами фильтров производства WEBTRONICS (США). Система состоит из 6 комплектов восьмиканальных АЦП WEBTRONICS подключаемых к компьютеру посредством платы расширения COM-портов производства MOXA. Производитель MOXA выбран из-за качественной поддержки оборудования и наличия драйверов для всех операционных систем.



Рис.1. Система в сборе.

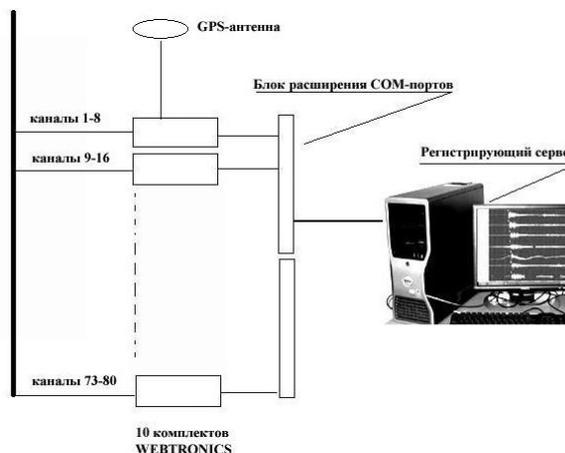


Рис.2. Блок-схема системы регистрации сейсмических колебаний.

С регистрирующего компьютера по локальной сети поток данных поступает в систему EarthWorm, которая позволяет в режиме реального времени просматривать трассы от всех сейсмометров одновременно. Для обработки данных необходим отдельный компьютер стандартной конфигурации (2,5 ГГц, 512 мб ОЗУ, HDD-40 Гб, клавиатура, мышь, монитор). На регистрирующем компьютере одновременно запускаются 10 исполняемых файлов программы регистрации, причем для каждой запускаемой программы присваиваются свои (уникальные) каналы регистрации. Всего суммарное количество каналов – 80, с возможностью дальнейшего расширения сети датчиков. При помощи GPS-приемника первого АЦП WEBTRONICS производится синхронизация внутреннего таймера регистрирующего компьютера. Поток данных с остальных девяти АЦП привязывается таймеру РС.

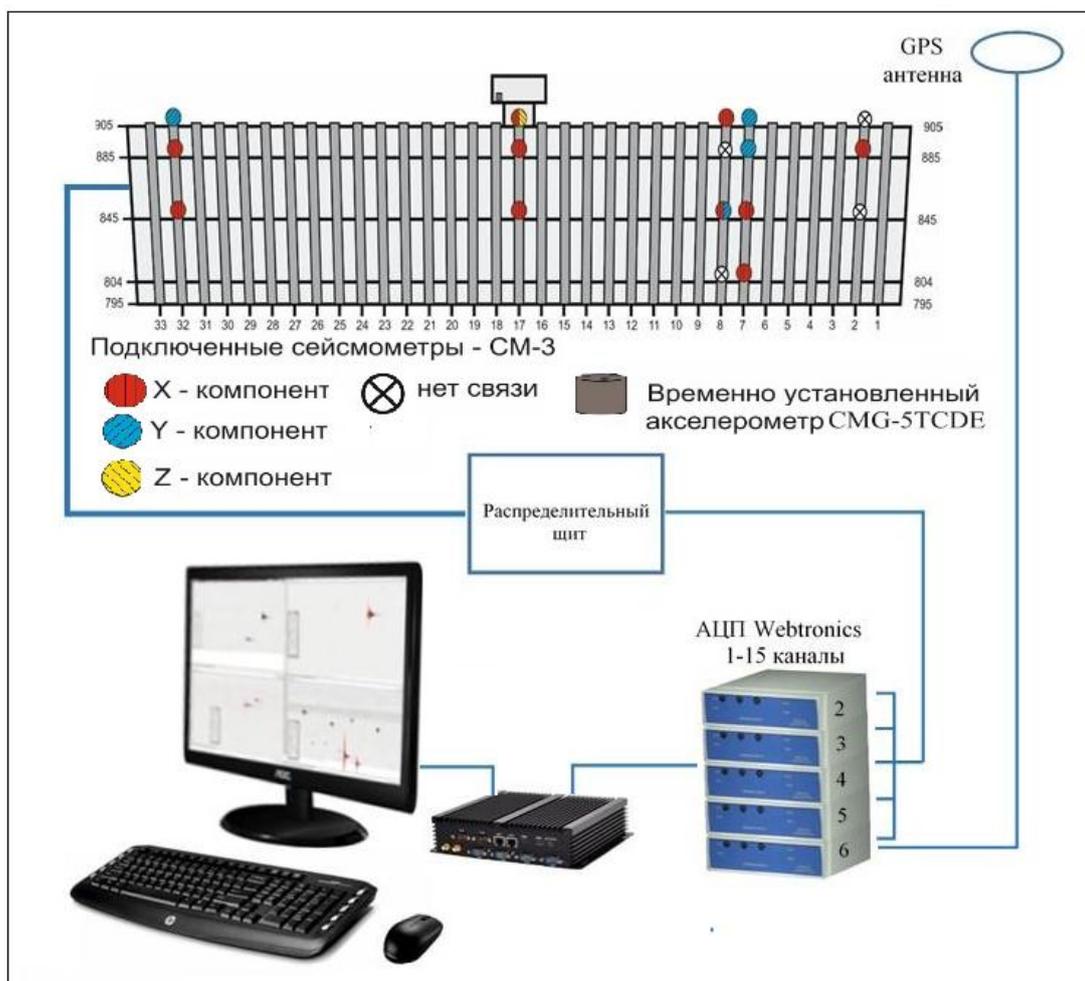
Непрерывные данные и событийные файлы прописывались в специальные разделы по группам сейсмометров. Так, например, для камеры (бокса) с сейсмометрами на теле плотины №22 создается папка с номером 22 и т.п. Каждая система WEBTRONICS состоит из: 8-канального предварительного усилителя с возможностью переключения коэффициента усиления от 1 до 200 с шагом 50; 8-канального полосового фильтра высоких и низких частот; коммутатора, совмещенного с АЦП; GPS-приемника со внешней антенной; COM-порта; импульсного блока питания на 24 V; соединительный кабель COM-COM.

Необходимо подчеркнуть, что состав контрольных наблюдений, их методика, календарные сроки и оценка безопасной работы сооружения разрабатываются на основе предварительно проведенных натурных исследований па гидросооружении. Объем контрольных наблюдений определяется типом сооружения, характером основания и степенью ответственности гидроузла. Объем специальных натурных исследований определен актуальностью исследования напряженно-деформированного состояния плотины Чарвакской ГЭС.

*Андижанское водохранилище (Андижанский вилоят, Восточный Узбекистан).* Бетонная плотина Андижанского водохранилища (на р. Карадарья) расположена на территории высокой – 9 балльной сейсмичности [12,13]. По конструкции она относится к массивно-контрфорсной плотине. Высота плотины – 115м, длина по гребни около 900м и ширина по основанию 110м [14]. Основанием плотины служат скальные грунты – сланцы Pz и известняки, песчаники и др. мелового возраста. В целях наблюдения за сейсмическим состоянием Андижанского водохранилища в 1980 году на теле плотины было установлено 54 сейсмоприемника. Из них 43 шт. короткопериодной аппаратуры на базе сейсмометров СМ-3, 11 сейсмоприемников ОСП-2 для регистрации сильных движений.

С 1980 по 2017 годы система мониторинга за сейсмическим состоянием плотины пришла в негодность. Без малого за 40 лет эксплуатации сейсмоприемники СМ-3 устарели. Не на всех боксах в теле плотины полностью установлены сейсмоприемники в наборе всех 3-х компонент, особенно отсутствуют компоненты Z. Система мониторинга сейсмического состояния плотины не только не соответствует современным требованиям, но полностью вышла из строя.

В 2018 году в рамках инновационного проекта «Создание цифровой сейсмической системы на плотине Андиганского водохранилища для мониторинга его состояния и прогноза возможных природных и техногенных катастроф» было запущена совершенствованная новая цифровая система сейсмического мониторинга. В составе аппаратур имеются 43 сейсмоприемника СМ-3 установленных в соответствующих боксах и камерах на теле плотины. Проведя оценку амплитудно-частотных характеристик обнаружено, что установленные в боксах сейсмоприемники СМ-3 распределены по 3-м компонентам не поровну (по X=20, Y=15, Z=8 шт). Кабель, с подключёнными СМ-3 сейсмоприемниками собраны в распределительном щите (основной кросс), который расположен в отдельном помещении. Здесь проводится управления системой. Для преобразования в цифровой формат механических колебаний, записывающих скорости колебания сейсмоприемниками СМ-3 в виде электрических сигналов, а также для их сохранения, была модернизирована и создана компьютеризированная система сейсмического мониторинга на плотине Андиганского водохранилища (рис.3).



**Рис.3.** Схема действующего с 2018 года системы сейсмического мониторинга, с указанием расположения постаментов (боксов) на теле плотины и соответствующих компонент подключенных каналов на плотине Андиганского водохранилища .

Проверены рабочее состояние (прозвонка) жил кабелей, подключенных в распределительный щит (центральны кросс), обеспечив непрерывный связь с сейсмоприемниками.

Система состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Webtronics, произведенного в США и промышленного компьютера EGLOBAL TECHNOLOGY. Эта система управляется с помощью компьютерной программы WinSDR. Всего работает 15 каналов, по которым сейсмические данные в режиме реального времени от сейсмоприемников, находящихся на плотине, передаются к сейсмостанции в операторской комнате. Из них 10 каналов - X компонента, 4 канала-Y компонента и 1 канал -Z компонента (табл.1).

**Таблица 1.** Подключенные сейсмоприемники к цифровой системе сейсмического мониторинга на плотине Андижанского водохранилища.

№ канала	Отметка (м)	Секция	Компонент	Номер сейсмоприемника	№ жилы	№ComPort	Webtronics каналы
1	905	17	X	151	171-172	2	1
2	905	32	Y	156	207-208	2	2
3	905	17	Z	251	167-170	2	3
4	905	8	X	26A	144-145	3	1
5	905	7	Y	33	64-69	3	2
6	885	2	X	254	105-106	3	3
7	885	17	X	28	165-166	4	1
8	885	7	Y	228	43-44	4	2
9	885	32	X	191	204-205	4	3
10	804	7	X	150	8-9	5	1
11	845	32	X	126	186-187	5	2
12	845	7	X	185	19-20	5	3
13	845	8	X	241	132-133	6	1
14	845	8	Y	208	136-137	6	2
15	845	17	X	178	150-151	6	3

Механические колебания на теле плотины, регистрирующиеся сейсмоприемниками SM-3, далее аналоговый сигнал оцифровываются с помощью АЦП Webtronics и передаются на компьютер. С помощью программы WinSDR установленной на промышленный компьютер, данные в онлайн режиме визуализируются на мониторе в виде сейсмограмм. Суточные данные (сейсмограммы) автоматически сохраняются в жестком диске компьютера. Кроме этого событийные файлы (сейсмограммы землетрясений или сильных колебаний) сохраняются в памяти компьютера отдельно.

**Результаты организации контроля волновых характеристик.** Изучение особенностей проявления сейсмичности в связи с эксплуатацией объекта для сейсмоэкологического контроля требует длительного непрерывного наблюдения с накоплением сейсмостатистики не только по сильным, но и в основном по слабым землетрясениям менее 10 энергетического класса. Такие крупные объекты, как Чарвакское и Андижанское водохранилища при эксплуатации оказывают влияние на окружающую геологическую среду, изменяют напряженное состояние и характер сейсмических проявлений [3,7,10].

На сейсмограммах режимно измерялось максимальные амплитуды скорости колебаний -  $A_{max}$ (мм/с), соответствующие им периоды колебаний и длительность колебаний. Произведен расчет относительного изменения интенсивности колебаний:  $\delta_i = A_{max(i)}/A_{max}$  ( $i$ -номер измерительного пункта). Метод регистрации землетрясений малых энергий использовано для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с разными физико-механическими свойствами крупнообломочных массивов. Всего произведено измерений на 16 пунктах регистрации в теле Чарвакской плотины и 14 пунктах Андижанской плотины. Зарегистрированы 51 землетрясений на расстояниях от 20 до 500 км. К анализу включены записи 21 землетрясений наиболее характерно отражающих динамические смещения, как низкочастотных, так и высокочастотных колебаний.

Ниже в таблице 2 как пример показано результаты вычисления значений частот  $f_0$ , в Гц и отношение скоростей к измерительному пункту №8 в теле плотины Чарвак при Маржанбулакском землетрясении 26 мая 2013 года.

В измерительных пунктах регистрация волн велась непрерывном режиме. Все сейсмостанции работали в цифровом режиме регистрации сейсмических событий. В специализированной

программной среде WinQuake определялся азимут на эпицентр путем измерения знаков и значений амплитуд первых вступлений:  $A_{ew}$ ,  $A_{ns}$  и  $A_z$  продольных волн и с учетом коэффициента увеличения каждого сейсмоканала. Далее все записи импортировались в среду стандартного офиса Microsoft Excel. Здесь производилась их сортировка и хранение. Рассчитывались угол,  $\alpha$  т.е.  $tga=A_{ew}/A_{ns}$ , учитывая знак амплитуды по каналу Z, определялся азимут на эпицентр.

**Таблица 2.** Значение  $f_0$ , в Гц и отношение скоростей к пункту №8 при Туюбузком землетрясении 25 мая 2013 года.

Дата	Время	R,км	Ms	#8			#4		
				Z	E	N	Z	E	N
24.05.2013	22:18:33.7	105	5,1	12400	13050	25320	28910	26340	18490
Fo, Гц				0,896	0,772	1,122	2,788	1,407	2,788
Отношение скоростей к №8							2,33	2,02	0,73

Дата	время	R,км	Ms	#14			#19		
				Z	E	N	Z	E	N
24.05.2013	22:18:33.7	105	5,1	-	25650	21080	31170	38650	22000
Fo, Гц				-	0,891	2,731	4,783	6,494	6,978
Отношение скоростей к №8					1,97	0,83	2,51	2,96	0,87

Расчет относительного изменения интенсивности колебаний производился по соотношениям  $\delta=A(x)max(i)/A(x)max(3)$  и  $\delta=A(x')max(i)/A(x')max(3)$ . Значения амплитуды колебания смещения - в мм и скорости - в мм/с. Динамические параметры колебаний в пунктах наблюдений производились по записям полученных сейсмостанциями работающих в непрерывном режиме. Производилось автоматическая разметка записей землетрясений на сейсмограммах с длиной обрабатываемой части, равной - с момента вступления волн с максимальной амплитудой до фазы, где амплитуда колебаний уменьшается до значения  $1/3 - 1/5$  от значений максимальных амплитуд. В большинстве случаев обрабатываемая часть сейсмограмм составляет от 3 до 7, редко до 10сек;

По телу плотины и береговых склонов Андижанского водохранилища анализ сейсмометрических измерений при оценке динамических характеристик плотины проводился Методом Y.A.Nakamura [15,16,17]. Этот метод основан на получении отношений спектров горизонтальных компонент микросейсмических колебаний к спектру их вертикальной компоненты (H/V отношений), которые представляют собой передаточную функцию разреза грунтов на всю толщу относительно несвязного геологического материала инженерного фундамента, представляющую аналог амплитудно-частотной характеристики [18,19]. В таблице 3 показаны основные значения, полученные в 16ти пунктах сейсмологических измерений.

**Таблица 3.** Основные значения характеристик колебания в 16-ти измерительных пунктах.

№ пункта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Собственная частота - $F_0$	4.7	4.3	4.2	4.7	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1	4.6	5.3	4.6	5.1
Отношение амплитуд колебаний	2.5	1.1	1.5	2.1	7.0	5.2	5.8	4.3	2.5	10.7	13.9	10.6	9.5	10.8	12.9	9.7
Коэффициент затухания поперёк	0.22	0.25	0.38	0.38	0.25	0.70	0.48	0.26	1.72	0.25	0.19	0.22	0.47	0.25	0.20	0.25
Коэффициент затухания вдоль	0.25	0.30	2.47	0.74	0.99	1.39	1.69	1.31	0.42	6.22	0.99	0.31	1.00	0.29	0.23	0.22
Коэффициент усиления колебания	5.6	8.3	7.9	8.3	10.4	9.5	9.6	8.6	20.1	9.4	9.4	9.9	8.3	10.9	8.0	9.8

Для измерения скорости колебаний используются велосиметры, а для ускорения – акселерометры. Использовались цифровые велосиметры модели CMG-6TD. Минимальная длительность

записи 30 минут. Сейсмометрические измерения на гребне плотины производились с применением широкополосных трехкомпонентных цифровых сейсмометров CMG-6TD производства Guralp – Великобритания. Измерения микросейсм проведены в 16-ти пунктах регистрации. Основным методом анализа полученных данных во всех пунктах наблюдения является спектральный анализ записей микросейсмических колебаний.

**Обсуждение результатов.** Графики спектрально-временного анализа для большинства измерительных пунктов Андижанской системы мониторинга показало следующие: из спектрограмм выявлено, что по горизонтальным компонентам присутствуют моды (гармоники) на частотах от 4,0 до 4,7 Гц. Для пунктов наблюдаются высокая частота собственных колебаний – 5,3 Гц.

На вертикальных компонентах они также прослеживаются, но с меньшими амплитудами. Наибольшие отношения амплитуд колебаний поперек/вдоль на гребне плотины прослеживаются для точек начиная от 10 того до 16 того пунктов, в пределах значений от 9,5 до 13,9, тогда как для точек начиная от 1 до 9 того значения отношений амплитуд в пределах от 1,1 до 7,0. Наибольший коэффициент усиления колебаний - 20,1 показывает центральная часть плотин.

Сейсмометрические исследования показали, что конструкция обладает нелинейным поведением, это проявляется в различии частотного диапазона и коэффициента передачи элементов плотины. По Чарвакской системе анализ графиков частот по нескольким регистрировавшим сейсмические волны измерительным пунктам и отношение амплитуд колебаний к амплитудам колебаний основания показало, что при регистрации разных землетрясений в разных точках они сильно изменяются в зависимости от азимута к эпицентру. Она видимо зависят от физико-механических свойств пород их основания и от интенсивности сейсмического воздействия.

Грунты в каньонной части, под ядром плотины и в правобережном борту каньона могут быть отнесены к грунтам I категории по сейсмическим свойствам. Для них интенсивность сейсмических воздействий по установленным нормам не превышают 8 баллов. Галечники под плотиной на левобережной поверхности Ходжикентской террасы отнесены к грунтам II категории по сейсмическим свойствам. Известняки левого борта в верхней части примыкания плотины, тоже отнесены к грунтам II категории по сейсмическим свойствам. Для них интенсивность сейсмических воздействий составляет 9 баллов. Чарвакская грунтовая плотина возведена в суженной части долины реки Чирчик. Она имеет вид ущелья с характерным плоским дном. Оба борта долины реки сложены известняками. Основные сооружения Чарвакского гидроузла целиком располагаются в пределах единого тектонического блока. Блоки ограничены зонами разрывов четвертого порядка и разбитого серией более мелких трещин. Обобщение фактических физико-механических показателей грунтов тела плотины произведено на основании их статической обработки.

**Закключение.** Установлено, что на гребнях плотин значения скоростей смещений по сравнению со скоростями смещений основания плотин в зависимости от их высоты может превышать от 1,2 до 1,4 раза. Предложена и реализована методика обработки результатов цифровой регистрации сейсмических волн во время землетрясений в зонах водохранилищ с учетом собственных частот колебаний. Представленные графики частот по нескольким регистрировавшим сейсмические волны измерительным точкам и отношение амплитуд колебаний к амплитудам колебаний основания плотин показало, что при регистрации разных землетрясений в разных точках они сильно изменяются в зависимости от азимута к эпицентру.

Максимальные горизонтальные колебания фиксируются на средних высотных отметках тела плотины. Интенсивность сейсмических колебаний на гребне железобетонной плотины меньше чем на опорном грунте (Кампиррават), на величину в среднем 0,7 балла по шкале MSK-64. Сейсмометрические исследования показали, что конструкция обладает нелинейным поведением, это проявляется в различии частотного диапазона и коэффициента передачи элементов плотины. Реализованные параметры системы мониторинга позволяют одновременно наблюдать землетрясения - местные и удаленные, а также пуск и остановку агрегатов ГЭС, собственные колебания плотины.

Исследования поддержаны Министерством инновационного развития РУз и АН РУз в рамках Госпрограмм фундаментальных и прикладных исследований на 2017-2020 годы грантами №ФА-Ф-8-008 и № ПЗ-2017091115.

## Литература

1. Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Современное состояние сейсмических наблюдений в районах размещения ответственных промышленных объектов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 280-284.
2. Хамидов Л.А., Шукуров М.А. Локальная сейсмичность зоны деформационного влияния Гиссаракского водохранилища.// Материалы III-Международной сейсмологической школы.- «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных»- Кисловодск, 20-24-октября 2008 г.- С.211-216.
3. Плотникова Л.М., Махмудова В.И., О.В.Карнаухова Методика и результаты определения значимых факторов режима эксплуатации Чарвакского водохранилища, определяющих сейсмичность района.// Сейсмогеодинамика области перехода от орогена Тянь-Шаня к Туранской плите.- Ташкент: Фан.-1986.- С.87-102.
4. Джураев Н.М., Зияудинов Ф.Ф., Джураев А., Нурмухамедов К.Ш. Об инженерно-сейсмогеологических условиях территории строительства Тупалангского водохранилища.// «Проблемы оценки сейсмической опасности, риска и прогноз землетрясений» – Ташкент: ИС АН РУз, №1, 2004.- С.436-446.
5. Тимбеков И.Х., Джураев Н.М., Туйчиева М.А. О достижениях комплексных инженерно-сейсмологических исследований, проведенных в районе предстоящего строительства гидротехнических сооружений в сейсмоактивных зонах Узбекистана.// Проблемы сейсмологии в Узбекистане, -Ташкент:Янги авлод-№3,2006- С.54-63.
6. Постановление Президента Республики Узбекистан от 9 августа 2017 года за №3190, Сайт: [http://lex.uz/pages/getpage.aspx?lact\\_id=3303614](http://lex.uz/pages/getpage.aspx?lact_id=3303614)
7. Lutfulla Hamidov, Local Seismicity of Reservoir Areas Based on Digital Seismometric Observations.//J.Problems of Cybernetics and Informatics,2012.-vol.III.-Baku, Azerbaijan.-P.85-88.
8. Строительство в сейсмических районах. Норма проектирование (СН и П-И-7-81). М., Стройиздат, 1982-49с.
9. Градостроительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. Гидротехнические сооружения. ШНК 2.06.11-04. Издание официальное. Государственный Комитет Республики Узбекистана по архитектуре и строительству, Ташкент, 2006-103с.
10. Ибрагимов А.Х., Хамидов Х.Л. Инженерно-сейсмометрические наблюдения в плотине Чарвакского водохранилища.// Современная техника и технологии в научных исследованиях.- 5-Межд.молод. Конф., 24-25 апреля 2013 г. Научная станция РАН - Бишкек: ИС РАН.-2013.-С.206-208.
11. Nakamura Y. A. Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface // Quart. Report of RTRI, 1989. Vol.30. №.1, P.25-33.
12. Джураев Н.М., Зияудинов Ф.Ф., Туйчиева М.А. О характере поведения бетонной плотины Андижанского водохранилища по материалам инженерно-сейсмометрических наблюдений за период 1995-96гг.// Проблемы сейсмологии в Узбекистане.-№4.-2007.-С.73-80.
13. Артиков Т.У., Абдуллабеков К.Н., Ибрагимов Р.Н., Ибрагимов Р.С. Унифицированный комплекс карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана // Доклады АН РУз.- 2010.- №1.- С.53-61.
14. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. Ташкент, 2012. 254с.
15. M. Mucciarelli and M.R. Gallipoli / A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique / Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 42, n. 3-4, pp. 255-266.
16. Nakamura Y.A., Gurler, E. Dilek, Saita J. et al. Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor // Proceeding, 12th WCEE 2000 in Auckland. NZ. P. 1-8.
17. Turnbull M. Relative seismic shaking vulnerability microzonation using an adaptation of the Nakamura horizontal to vertical spectral ratio method //J.Earth. Syst. Sci. 2008. V. 117. S2. P. 879-895.
18. Ditommaso R., Marco Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses/ Bulletin of Earthquake Engineering. August 2012, Volume 10, Issue 4, pp 1221–1235.
19. Guidelines for the implementation of the H/V spectra ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation // SESAME European research Project WP12 – Deliverable D23.12: Project № EVG1.

<b>Mundarija</b>	Саҳ.
<b>Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.</b> Markaziy Osiyo zilzilalari makroseysmik intensivligining o`zgarish qonuniyatlarini va ularning seysmik xavfni baholashda foydalanishi.....	3
<b>Abdullabekov K.N., Maksudov S.X., Tuychiev A.I.</b> Zilzilalarni prognoz qilish bo'yicha tadqiqotlarning zamonaviy xolati.....	18
<b>Atabekov I.U.</b> Markaziy Osiyo litosferasidagi tektonik oqimlarining matematik modeli.....	24
<b>Sodiqov Y.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A., Kuziyev F.N.</b> Turon epipaleozoy plitasi va g'arbiy Tyan-Shan epiplatforma orogenining o'zaro ta'sir maydonining zamonaviy geodinamikasi xususiyatlari.....	33
<b>Xamidov L.A.</b> Yirik suv omborlari yaqin hududlaridagi er qobig'ining yorilgan joylarida kuchlanishlar yig'ilishining chiziqli modeli.....	41
<b>Xamidov L.A., Ibragimov A.X., Alimuxamedov I.M., Xamidov H.L.</b> Chorvoq va Andijon suv omborlarida seysmik monitoring tizimini takomillashtirish imkoniyatlari.....	51

<b>Содержание</b>	Стр.
<b>Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.</b> Закономерности изменения макросейсмической интенсивности землетрясений Центральной Азии и их использование при оценке сейсмической опасности.....	3
<b>Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Туйчиев А.И.</b> Современное состояние исследований по проблеме прогнозирования землетрясений.....	18
<b>Атабеков И.У.</b> Математическая модель тектонических течений в литосфере Центральной Азии.....	24
<b>Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А., Кузиев Ф.Н.</b> Особенности современной геодинамики области взаимодействия Туранской эпипалеозойской плиты и западной части эпиplatformенного орогена Тянь-Шаня.....	33
<b>Хамидов Л.А.</b> Линейная модель концентрации напряжений в разломах земной коры, находящихся в ближней зоне деформационного влияния крупных водохранилищ.....	41
<b>Хамидов Л.А., Ибрагимов А.Х., Алимухамедов И.М., Хамидов Х.Л.</b> Возможности совершенствования системы мониторинга сейсмичности в зонах Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана.....	51

<b>Content</b>	page
<b>Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.</b> Regularities of changes in macro seismic intensity of Central Asia earthquakes and their using for seismic hazard assessment.....	3
<b>Abdullabekov K.N., Maksudov S.Kh., Tuychiev A.I.</b> Modern condition of research on the problem of forecasting of earthquakes.....	18
<b>Atabekov I.U.</b> Mathematical model of tectonic flow in the lithosphere of Central Asia.....	24
<b>Sadikov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A. Kuziyev F.N.</b> Features of modern geodynamics of the interaction area Turan plate and the western part of the Tien Shan orogen.....	33
<b>Khamidov L.A.</b> Linear stress concentration model in the crustal faults located in the near zone of the deformation influence of large reservoirs.....	41
<b>Khamidov L.A., Ibragimov A.Kh., Alimukhamedov I.M., Khamidov Kh.L.</b> Possibilities for improving the seismic monitoring system in the Charvak and Andijan reservoirs of Uzbekistan.....	51

**SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI**

**ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ**

**SEISMOLOGY PROBLEMS**

**№ 1, 2019**

Компьютерная верстка Л.А. Хамидов, Х.Л. Хамидов

---

Формат 80-64 1/8 Усл.печ.л. 3,9. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в минитипографии АН РУз  
Ташкент, 100047, ул.акад.Я.Гулямова, 70.