

ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI FANLAR АКАДЕМИЯСИ
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

SEYSMOLOGIYA MUAMMOLARI

1

ТОМ 3

2021

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

Jurnal 2019-yildan yiliga ikki marta nashr etiladi

Журнал издается с 2019 года по два номера в год

TAHRIRIYAT A'ZOLARI:

V.A. RAFIKOV (TAHRIRIYAT
KENGASHI RAISI)
K.N. ABDULLABEKOV (BOSH MUHARRIR)
U.A. NURMATOV (mas'ul kotib)
X.A. AKBAROV
T.U. ARTIKOV
D.KH. ATABAYEV
T.L. IBRAGIMOVA
V.A. ISMOILOV
S.X. MAKSUDOV
B.S. NURTA'YEV
B.YU. QURBONOV
SH.S. RAJABOV
L.A. HAMIDOV

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Рафиков (Председатель
редакционного совета)
К.Н. Абдуллабеков (главный редактор)
У.А. НУРМАТОВ (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
Л.А. Хамидов

Manzil: Toshkent shahri, Shayxontohur tumani, Zulfiyaxonim k., 3-uy.
Tel.: +99871 241-51-70, 241-32-22; Fax: +99871 241-74-98.
E-mail: seismologiya@mail.ru;

Jurnal sayti: www.seismos.uz.

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

Сайт журнала: www.seismos.uz.

Jurnal O'zbekiston Respublikasi Matbuot va axborot agentligida 08.04.2019-yil
1013-raqam bilan ro'xatdan o'tgan.

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

Seysmik xavfni baholash va seysmik rayonlashtirish

УДК 550.34

Ребецкий Ю.Л.¹, Артиков Т.У.², Ибрагимов Р.С.², Ибрагимова Т.Л.², Мирзаев М.А.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА МЕТОДОМ КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРЫВНЫХ СМЕЩЕНИЙ

Rebetskiy Yu.L.¹, Artikov T.U.², Ibragimov R.S.², Ibragimova T.L.², Mirzaev M.A.²

¹ *RFA O.Yu. Shmidt nomidagi Yer fizikasi instituti, Moskva, Rossiya*

² *O'zR FA G'.A. Mavlonov nomidagi. Seysmologiya instituti, Toshkent, O'zbekiston, ibrroma@yandex.ru*

O'zbekiston hududi yer qobig'ining kuchlangan holatini uzlukli siljishlarini kataklastik uslub asosida taxlil qilish

Аннотация. O'zbekiston hududi yer qobig'ining zamonaviy kuchlangan holati, turli mualliflar tomonidan tuzilgan zilzila o'chog'i mexanizmlari katalogi asosida uzlukli siljishlarni kataklastik uslub yordamida o'rganildi. Kuchlangan maydonning rekonstruksiyasi ikki bosqichda, ma'lumotlarning aniqligi yuqori bo'lgan va umumiy holda, hamda zilzila magnitudalarining turli qiymatlarida amalga oshirilgan. Tadqiqot natijasida respublikaning turli hududlari uchun kuchlangan bosh vektorning azimuti va og'ish burchagi, Lode-Nadai koeffitsienti qiymatlari, geodinamik kuchlanganlik holati turlari, maksimal urinma kuchlanish va hartomonlama bosimning nisbiy qiymatlari aniqlangan. Zilzila o'chog'ining mexanizmi asosida aniqlangan yer qobig'ining kuchlangan holati rekonstruksiya qiymati $M \leq 4.5$ va $M \geq 5.0$ zilzilalar uchun turlicha ekanligi va turli qatlamlarda inversiya xolati kuzatilishi aniqlangan. Kuchli zilzilalar effektiv bosimi kam bo'lgan maydonlarga intilishi ko'rsatilgan.

Калит so'zlar: zilzila o'chog'i mexanizmi, kuchlanganlik maydoni rekonstruksiyasi, bosh kuchlanganlik o'qlari, kuchlanganlik elipsoidi, kuchlanganlikning geodinamik turlari

Ребецкий Ю.Л.¹, Артиков Т.У.², Ибрагимов Р.С.², Ибрагимова Т.Л.², Мирзаев М.А.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан, ibrroma@yandex.ru*

Исследование напряженного состояния земной коры территории Узбекистана методом катакlastического анализа разрывных смещений

Аннотация. На основе сборного каталога механизмов очагов землетрясений, составленного по данным различных авторов, методом катакlastического анализа разрывных смещений (МКА) проведено изучение современного напряженного состояния земной коры территории Узбекистана. Реализовано два этапа реконструкции поля напряжений МКА на различных уровнях площадной детальности осреднения параметров и при различной магнитудной иерархии рассматриваемых землетрясений. В результате проведенных исследований для различных областей изучаемой территории определены азимуты и углы погружения осей главных напряжений, значения коэффициента Лоде – Надаи, геодинамический тип напряженного состояния, относительные (нормированные на прочность сцепления массивов горных пород) величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления. Выявлены различия в параметрах напряженного состояния в результате реконструкций природных напряжений, проведенных по механизмам очагов землетрясений с магнитудами $M \leq 4.5$ и $M \geq 5.0$, а также инверсий, осуществленных для различных глубинных слоев земной коры. Показано, что сильные землетрясения тяготеют к зонам пониженного эффективного давления.

Ключевые слова: механизм очагов землетрясений, реконструкция поля напряжений, оси главных напряжений, эллипсоид напряжений, геодинамический тип напряженного состояния

Rebetskiy Yu.L.¹, Artikov T.U.², Ibragimov R.S.², Ibragimova T.L.², Ibragimov R.S.², Mirzaev M.A.²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia*

² *Mavlyanov Institute of Seismology, AS of Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, ibrroma@yandex.ru*

Research of the Uzbekistan territory earth's crust stress state by methods of cataclastical analysis of displacements along fault sets

Abstract. The study of the current stress state of the Earth's crust of the Uzbekistan territory was carried out by methods of cataclastic analysis of displacements along fault sets for the collected catalogue of earthquake focus mechanisms (EFM), compiled according to the data of various authors. Two stages of stress field reconstruction are implemented at different levels of area detail of averaging parameters and at different magnitude hierarchy of analyzed earthquakes. Azimuths and dip angles of principal stresses axes, Lode – Nadai coefficient values, geodynamic type of stress state, relative (normalized for cohesion strength of rock massif) normalized values of maximum shear stress and effective pressure are determined for different areas of studied territory. As a result of natural stress reconstructions were revealed based on the focal mechanisms of earthquakes with magnitudes $M \leq 4.5$ and $M \geq 5$ differences in the parameters of the stressed state carried out. It has been suggested that the hierarchy of magnitude levels of the considered earthquakes reflects the stressed state of various deep layers of the Earth's crust. It is shown that strong earthquakes gravitate to zones of reduced effective pressure.

Keywords: earthquake focal mechanism, reconstruction of the stress field, principal stress axes, stress ellipsoid, geodynamic type of stress state

Введение. Территория Узбекистана характеризуется сложным тектоническим строением и высоким уровнем сейсмической активности. Решение ряда важных задач прикладной сейсмологии, связанных с прогнозированием землетрясений и с оценкой сейсмической опасности сейсмоактивных регионов, в значительной степени опирается на результаты исследований современного напряженно-деформированного состояния структур земной коры, обусловленного происходящими геодинамическими процессами. Важную информацию о кинематике разрывов в очагах и напряженном состоянии массивов горных пород несут данные о механизмах очагов происходящих землетрясений. Усилиями ряда ученых [1-3 и др.] к настоящему времени разработаны различные методы реконструкции напряженно-деформированного состояния земной коры, основанные на интерпретации распределения в пространстве азимутов и углов погружения осей главных напряжений в совокупности очагов землетрясений, попадающих в элементарные объемы земной коры. В данном исследовании реконструкция природных напряжений земной коры территории Узбекистана осуществлялась по механизмам очагов землетрясений с помощью алгоритмов метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА), разработанных в Лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН [4]. Расчет параметров, характеризующих напряженное состояние массивов горных пород, проводился на различных уровнях площадной детальности и при различной магнитудной иерархии рассматриваемых землетрясений. Проведенные построения позволили определить для каждого домена, для которого удалось осуществить реконструкцию, азимуты и углы погружения осей главных напряжений, значения коэффициента Лодэ – Надаи, геодинамический тип напряженного состояния и относительные (нормированные на прочность сцепления массивов горных пород) величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

Краткая характеристика объекта исследования. Исследуемая территория располагается в центральной части Западного Тянь-Шаня между Центрально-Казахстанским щитом и Туранской плитой Урало-Сибирской платформы на севере и западе, Таримским блоком на востоке и Индийской платформой на юге. Восточная часть исследуемого района включает в себя горные системы Тянь-Шаня, Алая и Памира. К юго-западу от Узбекистана расположен Копетдагский горный массив Туркмено-Хорасанской горной системы [5].

Геологические структуры Западного Тянь-Шаня (рис. 1) существенно различаются по рельефу, геологическому строению и истории геологического развития. На востоке они представлены высокими горными складчатыми сооружениями, состоящими из палеозойских образований, и межгорными и предгорными впадинами, покрытыми мезозойскими и кайнозойскими отложениями. На западе эти отложения, с меньшей мощностью, охватывают обширные равнины эпипалеозойской Туранской плиты, а палеозойские породы местами выступают в виде возвышенностей небольшого размера в пределах Кызылкумов. В пределах Туранской плиты выделяются Амударьинская, Сырдарьинская и Приаральская впадины. В эпиплатформенную орогеническую область входит система положительных и отрицательных структур, выраженных в рельефе в виде горных хребтов (Чаткало-Кураминских, Алай-Туркестанских, Заравшан-Гиссарских и др.), межгорных (Ферганская, Сурхандарьинская) и предгорных

(Ташкентско-Голодностепская, Кашкадарьинская) впадин и разделяющих их зон разрывных нарушений. В данной работе использована сеймотектоническая основа, предложенная в [6].

По геолого-геофизическим данным, в пределах исследуемой территории мощность земной коры изменяется от 40 км на северо-западе (район Приаралья) до 55 км (Ферганская долина).

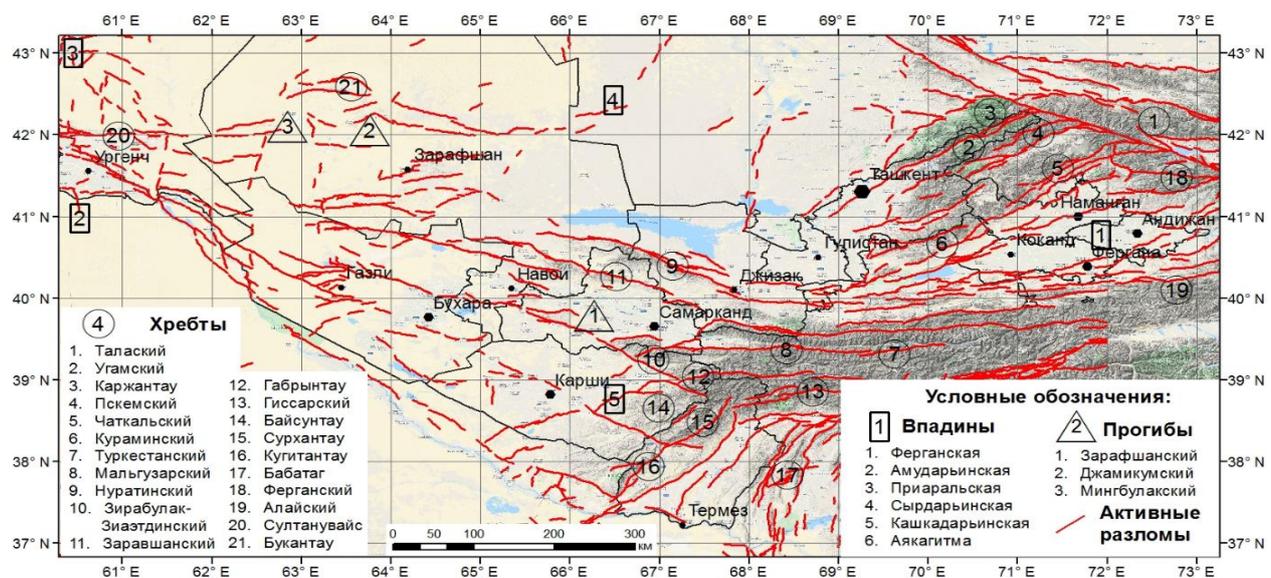


Рис. 1. Современный структурный план исследуемого района и активные разломы земной коры (по [7])

Используемые данные и методы анализа

Каталог механизмов очагов землетрясений. При формировании базы данных механизмов очагов землетрясений, наряду с построениями, опубликованными в сборниках «Землетрясения Средней Азии и Казахстана» [8], использовались следующие источники:

- определения механизмов очагов сильных (с $M \geq 5.0$) землетрясений, произошедших на территории Узбекистана и прилегающих к нему территориях в период с 1946 по 1985 гг., проведенные Е.М. Безродным и изложенные в его монографии [9];

- выборка по территории Узбекистана из каталога механизмов очагов землетрясений Центральной Азии с энергетическим классом $K \geq 10$ ($M \geq 3.5$) за период с 1970 по 2005 годы (авторы каталога Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко), предоставленная заместителем директора по научной работе Института геофизических исследований МЭ РК Н.Н. Михайловой;

- выборка механизмов очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 3.0$ по территории, ограниченной координатами $37^{\circ} - 43^{\circ}$ с. ш., $63^{\circ} - 74^{\circ}$ в. д., за период с 1946 по 1992 гг. из каталога Института Физики Земли (ИФЗ) РАН. Для ряда землетрясений в данном каталоге приведено несколько решений, полученных разными авторами;

- Гарвардский каталог механизмов очагов сильных (с $M \geq 5.0$) землетрясений СМТ [10] с 1976 года по настоящее время.

В результате унификации исходных данных, анализа различных решений для одних и тех же сейсмических событий и выбора среди них единственного наиболее вероятного был сформирован единый каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, включающий 1157 сейсмических событий [11]. Карта эпицентров землетрясений, вошедших в сводный каталог, с изображением механизмов очагов этих землетрясений показана на рис. 2. На этом же рисунке приведены гистограммы распределения землетрясений сборного каталога МОЗ территории Узбекистана по магнитуде и глубине.

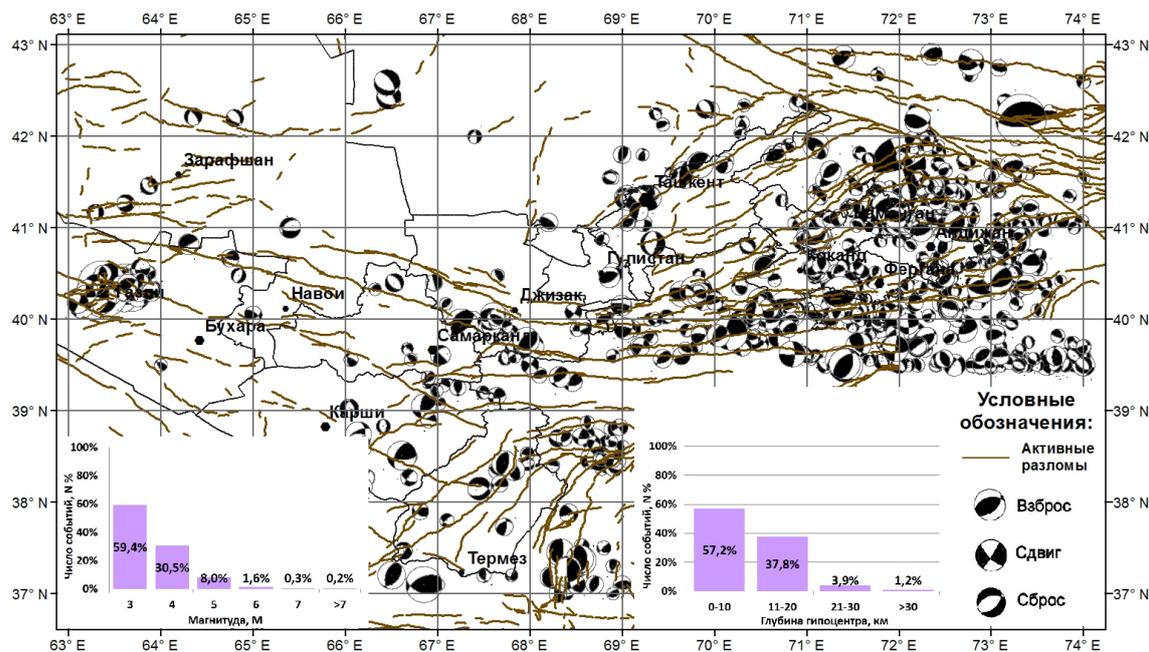


Рис. 2. Карта механизмов очагов землетрясений, вошедших в сводный каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, и гистограммы распределения событий каталога по магнитуде и глубине

Метод анализа. Для проведения реконструкции природных напряжений использовался метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА). Катакластическими или псевдопластическими называются необратимые деформации, возникающие в массиве горных пород за счет разрывных смещений по разномасштабным трещинам при соответствующем уровне усреднения. Основные положения метода катакластического анализа разрывных смещений определяются энергетическими ограничениями теории пластичности:

1. В процессе упругопластического деформирования преобразование части упругих деформаций в необратимые (остаточные), обуславливающие диссипацию упругой энергии в объеме геологической среды, может осуществляться как за счет сдвигов по вновь образующимся поверхностям нарушений сплошности геоматериала, так и за счет смещения берегов уже существующих трещин и разрывов различного масштабного уровня;

2. Разрывы и трещины одного ранга могут влиять друг на друга, что приводит к отклонению среднего смещения на их плоскости от направления среднего касательного напряжения на этой же плоскости для искомого тензора напряжений;

3. Каждое разрывное смещение, реализующееся на трещине или разрыве, на искомом тензоре напряжений, должно приводить только к уменьшению упругой энергии геосреды и формированию необратимых деформаций в направлениях действия главных напряжений в соответствии с принципом упорядоченности.

4. В своей совокупности разрывные смещения формируют тензор необратимых катакластических деформаций, для которого искомый тензор напряжений доставляет максимум диссипации упругой энергии.

В результате реконструкции МКА в каждой конкретной точке определяются параметры тензора поля напряжений или локальное стрессосостояние (local stress state). Эти сведения позволяют установить преобладающие ориентировки осей главных напряжений, их относительное пространственное положение (определяющее геодинамический тип напряженного состояния) и коэффициент Лоде Надаи (определяющий вид тензора напряжений). Для расчетов параметров напряженного состояния применялась компьютерная программа STRESSseism, разработанная Ю.Л.Ребецким в лаборатории «Фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики» ИФЗ РАН [3].

Первоначально, для получения генерализованной картины напряженного состояния исследуемого региона, были проведены вычисления по сетке $0.2 \times 0.2^\circ$ с минимальным размером одно-

родной выборки, состоящей из пяти определений механизмов очагов землетрясений в каждом домене. При этом радиус круговой области, в пределах которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для формирования однородных выборок в каждой расчетной точке, варьировался от 15 до 60 км. Проведенная на данном уровне детальности реконструкция позволила получить параметры напряженного состояния практически всей сейсмоактивной части территории Узбекистана. Исключение составили несколько областей, в которых даже при столь мягких ограничениях по статистическим соображениям реконструкцию провести не удалось. На территории Приташкентского района это область, контролируемая динамическим влиянием Северо-Ангренского и Южно-Ангренского разломов северо-восточного простирания, расположенных к юго-востоку от города Ташкента. На территории Западного Узбекистана это две области: первая – район сочленения Бесаянкой системы разломов северо-западного простирания с системой Северо-Тамдынских разломов северо-восточного простирания, вторая – район г. Бухара, в пределах одноименной сейсмогенной зоны. На территории Южного Узбекистана это области Кызылдарьинско-Лянгарских и Байсун-Кугитанских разломов юго-западного простирания.

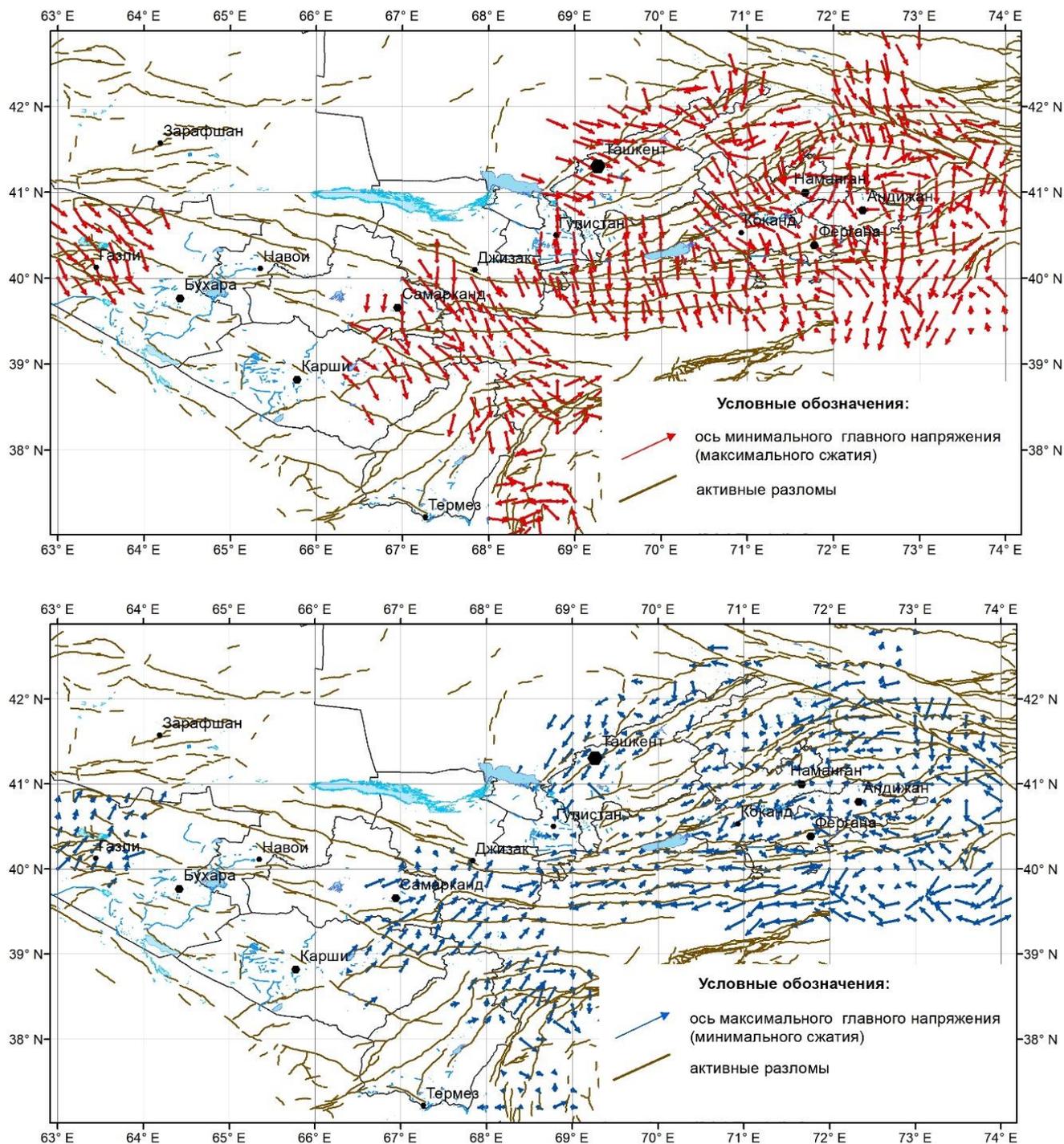
На следующем этапе исследования, для получения более детальной картины распределения природных напряжений исследуемой территории, были проведены расчеты по сетке $0.1 \times 0.1^\circ$. Минимальный размер однородной выборки в каждом исследуемом домене при этом варианте расчета включал не менее шести определений механизмов, а радиус круговой области, в пределах которой проводилось осреднение параметров, варьировался в значительно меньших пределах, чем ранее, и составлял от 15 до 30 км. Это, с одной стороны, несколько уменьшило площадь, на которой реконструкция оказалась возможной, а с другой – обеспечило высокую точность построений в областях, в которых удалось осуществить реконструкцию. Исходя из распределения землетрясений по глубинам, построения были проведены для всего сейсмоактивного слоя в целом, а также отдельно для верхней части земной коры (до 10 км) и для слоя, расположенного ниже 10 км. Кроме того, для исследования влияния магнитудной иерархии землетрясений (при полумагнитудной классификации землетрясений по величине) на результаты проводимых инверсий, построения проводились на том же уровне детальности отдельно по механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений ($M \leq 4.5$) и для сильных ($M \geq 5.0$) землетрясений.

На выбранных уровнях площадной детальности осреднения параметров и при различной магнитудной иерархии рассматриваемых землетрясений было проведено два этапа реконструкции поля природных напряжений алгоритмами МКА.

Результаты реконструкции напряжений

Ориентация в пространстве осей главных напряжений. Предваряя описание площадного распределения азимутов и углов погружения осей главных напряжений, следует сказать, что в алгоритме МКА используется правило знаков напряжений, принятое в классической механике, т.е. сжимающие напряжения отрицательны, а растягивающие положительные. В силу этого главные напряжения σ_1 – являются минимальными сжимающими, а σ_3 – максимальными сжимающими. Поэтому, при интерпретации ориентации осей главных напряжений для σ_1 мы будем использовать термин ось главного растяжения (имея ввиду, девиаторную составляющую этого напряжения), а для σ_3 – ось главного сжатия.

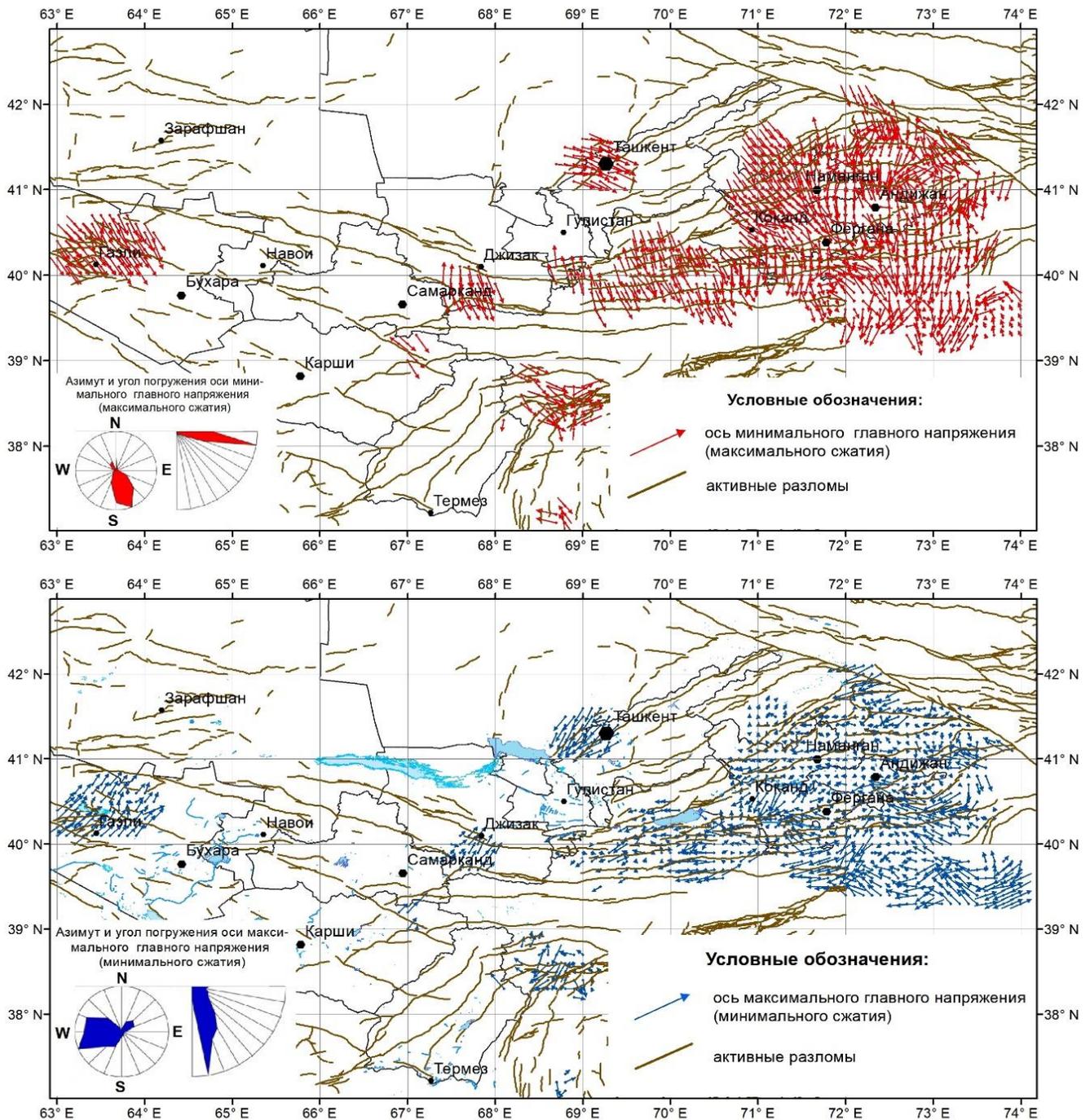
Как следует из рис. 3, б, на генерализованном уровне реконструкции, угол погружения оси минимального сжатия σ_1 сильно варьирует для различных участков исследуемой территории, меняясь от вертикального погружения на территории Южного Узбекистана и на отдельных участках Бесаянского и Южно-Ферганского разломов до практически горизонтального погружения на территории Алайской долины за одноименным хребтом. Вариации угла погружения оси главного напряжения сжатия σ_3 в пределах исследуемой территории существенно меньше (см. рис. 3, а). Для большей части территории эта ось близгоризонтальна. В большинстве случаев простирание оси максимального сжатия практически перпендикулярно простиранию структур. Эта особенность нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают. На территории Туранской платформы (Западный Узбекистан) и в пределах переходной зоны от орогена к платформе (Приташкентский район) преимущественным направлением оси максимального сжатия σ_3 является юго-восточное, в орогенической части исследуемой территории (Восточный Узбекистан) – близмеридиональное.



Условные обозначения: а - максимального сжатия σ_3 ; б - минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км

Рис. 3. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений

На детальном уровне реконструкции напряжений (см. рис. 4 и рис. 5) по ряду областей отмечаются некоторые различия азимутов и углов погружения осей главных напряжений σ_3 и σ_1 при проведении инверсии по механизмам очагов землетрясений с различным магнитудным уровнем. Для Газлийской очаговой зоны в результате реконструкции напряжений по сильным землетрясениям азимут оси σ_3 меняется с юго-восточного (полученного по слабым и умеренным землетрясениям) на южный при примерно том же угле погружения, а погружение оси σ_1 при рассмотрении

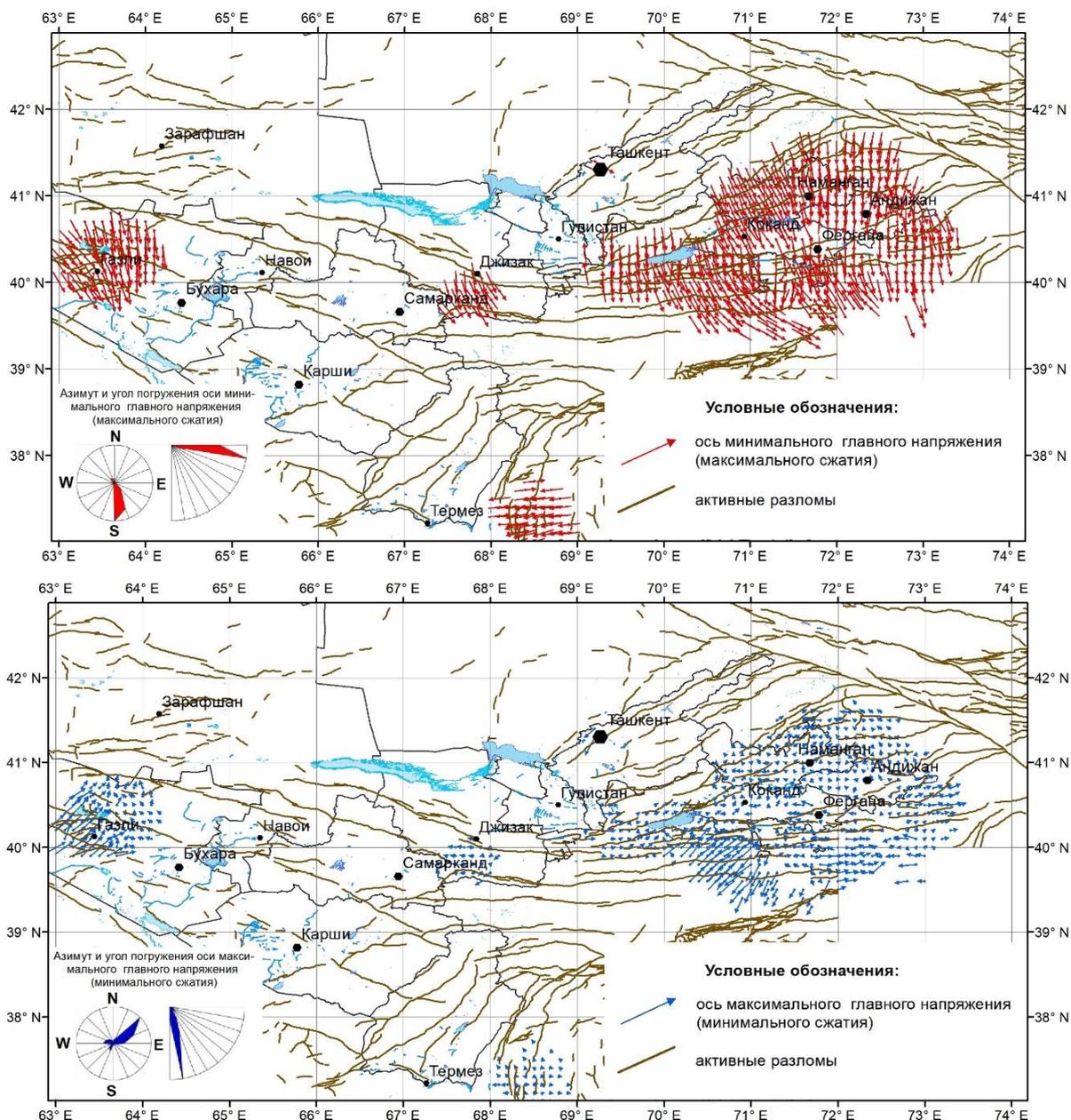


Условные обозначения: а - максимального сжатия σ_3 ; б - минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) реконструкции по землетрясениям с $M \leq 4.5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км

Рис. 4. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений

только сильных землетрясений становится практически близвертикальным. То же самое можно сказать относительно угла погружения оси σ_1 для участка между городами Джизак и Самарканд, относящегося к Нуратинскому и Зирабулак-Зиаэтдинскому хребтам. Для Приташкентского района и для Ферганской межгорной впадины можно отметить хорошее соответствие азимутов простирания и углов погружения осей σ_3 и σ_1 на данном уровне детальности при рассмотрении землетрясе-

ний с различным энергетическим уровнем. Направление главной оси напряжения максимального сжатия σ_3 для территории Приташкентского района близширотное, а ось минимального сжатия σ_1 ориентирована на юго-юго-запад. Погружение обеих осей σ_1 и σ_3 для большинства доменов достаточно пологое.

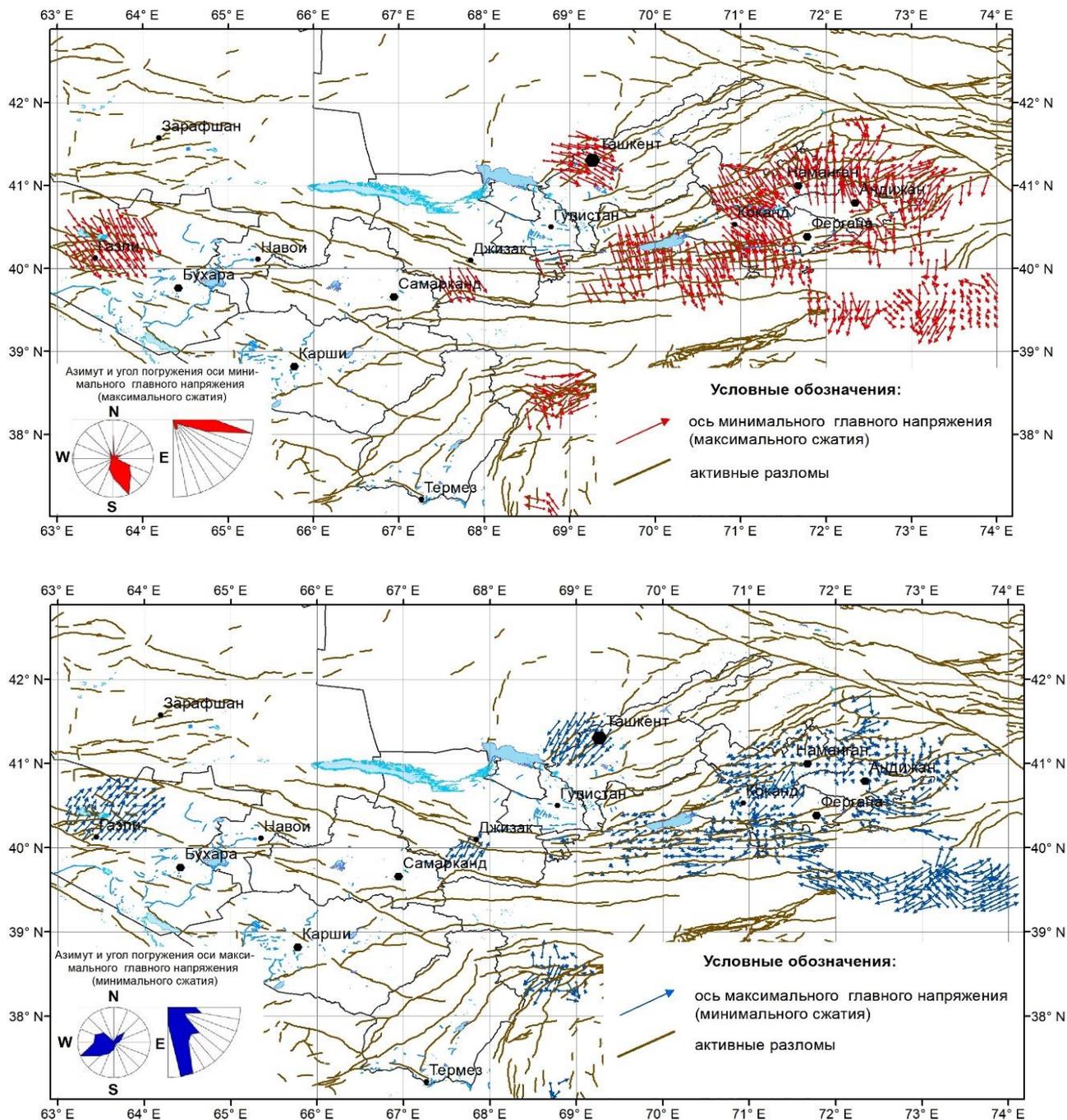


Условные обозначения: а - максимального сжатия σ_3 ; б - минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) реконструкции по землетрясениям с $M \geq 5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км

Рис. 5. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений:

Анализируя пространственное положение азимутов и углов погружения осей главных напряжений можно отметить, что угол погружения оси минимального сжатия σ_1 существенно меняется с глубиной (рис. 6 и рис. 7). На малых глубинах (0-10 км) отмечается большой разброс в углах погружения оси σ_1 (от 0° до 80°). На глубинах больше 10 км для большинства доменов ось σ_1 субвертикальна. Наибольшие вариации азимута оси минимального сжатия с увеличением глубины

отмечаются в районе Алайского хребта (от субширотного на малых глубинах до субмеридионального на больших) и в восточной части Газлийской очаговой зоны (от северо-восточного до строго меридионального).

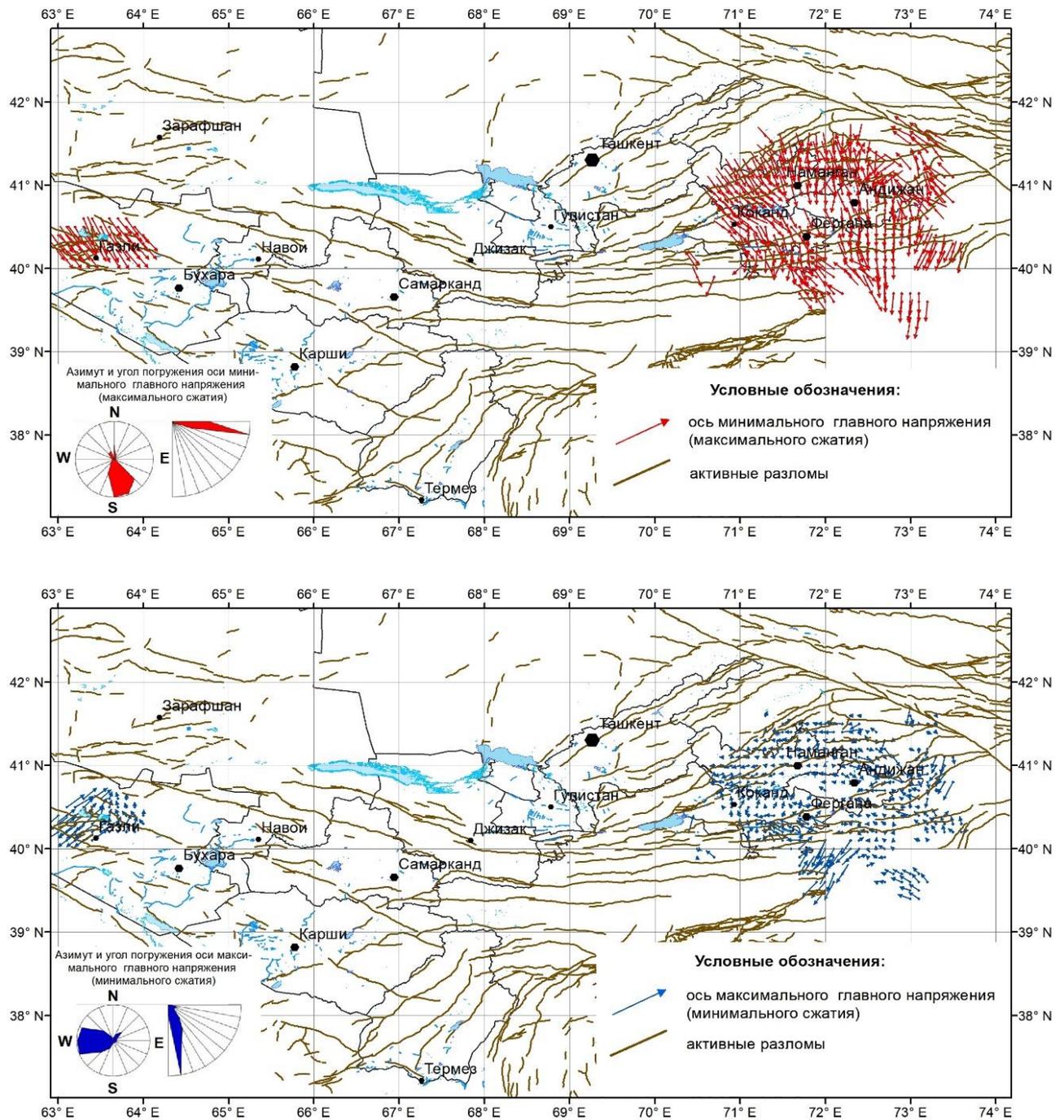


Условные обозначения: а - максимального сжатия σ_3 ; б - минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \leq 10$ км

Рис. 6. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений

Угол погружения оси главного сжатия σ_3 ведет себя более стабильно при изменении глубины сейсмоактивного слоя. Как для всего сейсмоактивного слоя в целом, так и для различных глубин, у большинства доменов ось σ_3 близгоризонтальна. На малых глубинах в рай-

оне Алайского хребта можно отметить ее близвертикальное погружение. В большинстве случаев простираение оси максимального сжатия практически перпендикулярно направлению структур. Эта особенность нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают.



Условные обозначения: а - максимального сжатия σ_3 ; б - минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \geq 11$ км

Рис. 7. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений:

Параметры эллипсоида напряжений. Анализ распределения коэффициента Лодэ – Надаи, рассчитанного по всей совокупности землетрясений (рис. 8) при большом радиусе осреднения (генерализованный уровень), свидетельствует о том, что преобладающее число доменов характеризуется состоянием, близким к чистому сдвигу ($-0.2 < \mu_\sigma < 0.2$). Домены с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию ($\mu_\sigma \geq 0.6$) или одноосному растяжению ($\mu_\sigma \leq -0.6$), распределены по исследуемой территории достаточно мозаично.

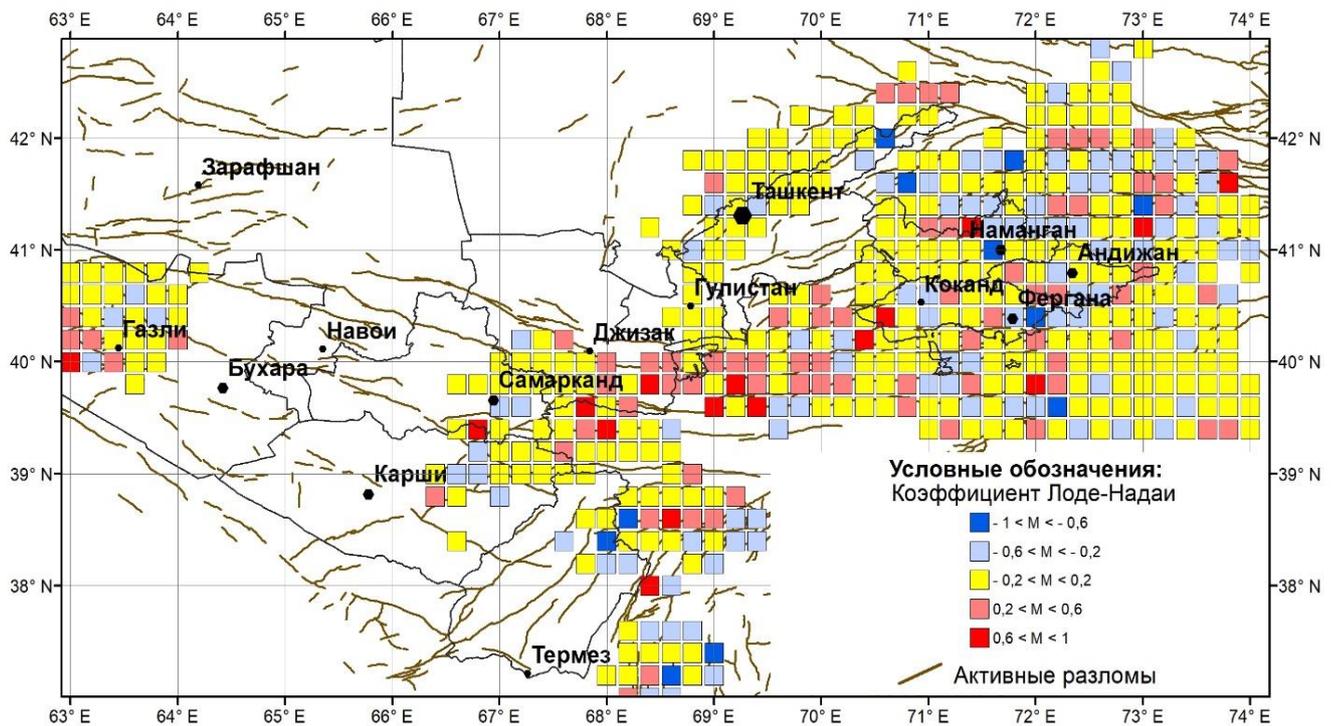


Рис. 8. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

На детальном уровне реконструкции (при радиусе осреднения параметров напряженного состояния $R \leq 30$ км) при рассмотрении механизмов очагов землетрясений с $M \leq 4.5$ доля областей с напряженным состоянием, близким к чистому сдвигу, несколько уменьшается (см. рис. 9), а области, в которых вид напряженного состояния близок к одноосному сжатию или одноосному растяжению, обретают черты связанного множества. Области со значениями $\mu_\sigma \geq 0.2$ расположены на востоке и западе Газлийской очаговой зоны, в центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны и в северной части Бабатаг-Кейкитауской структуры. Две области с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению ($\mu_\sigma \leq -0.2$), расположены в пределах Ферганской межгорной впадины, севернее городов Андижан и Наманган, и одна – в пределах Алайской долины за Алайским хребтом. Несколько доменов в пределах Приташкентского района также характеризуются умеренными отрицательными значениями коэффициента Лодэ – Надаи.

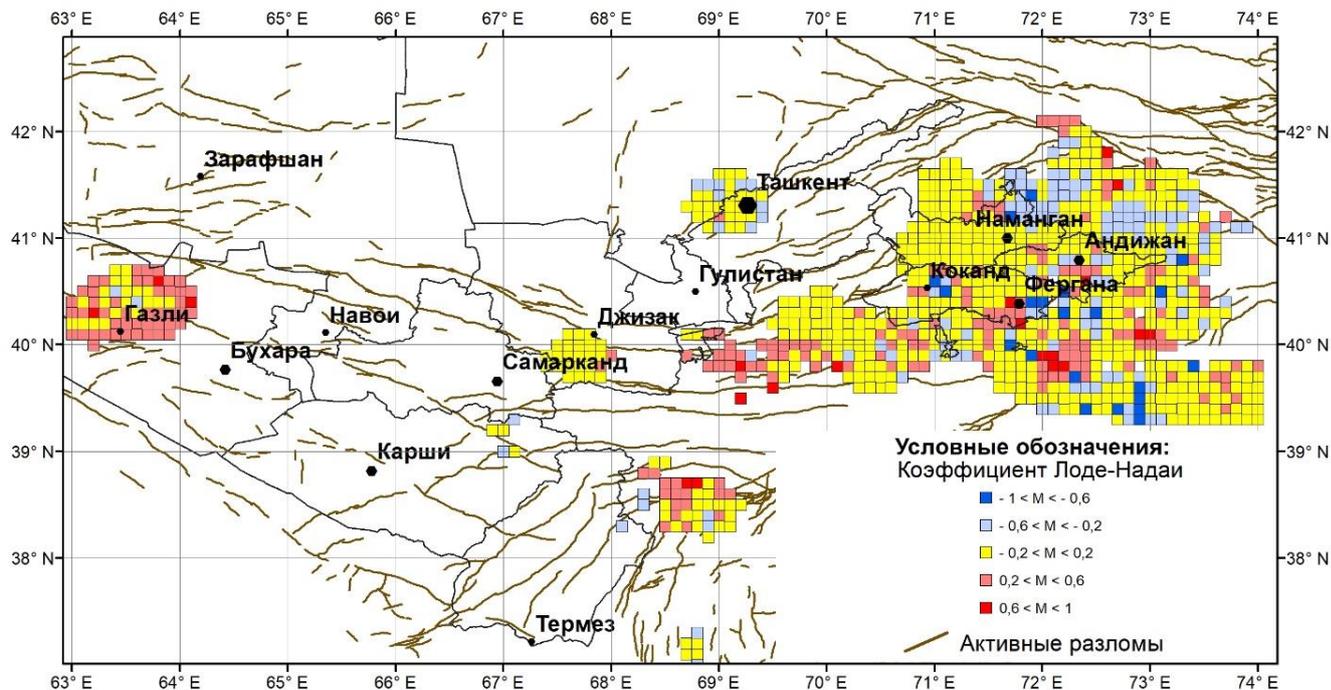


Рис. 9. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи при реконструкции по землетрясениям с $M \leq 4.5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

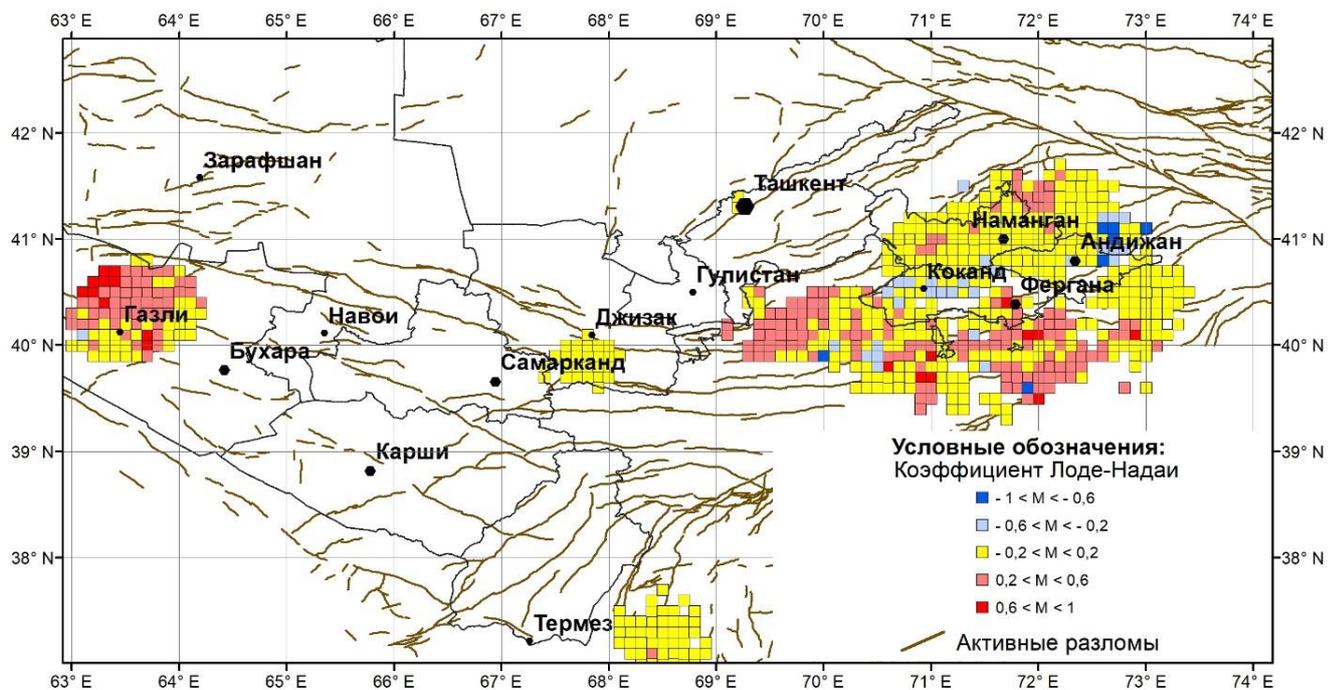


Рис. 10. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи при реконструкции по землетрясениям с $M \geq 5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

По результатам реконструкции напряжений, полученной с привлечением механизмов очагов землетрясений с $M \geq 5.0$ из сборного каталога МОЗ, области с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию, расположены в северной части Газлийской очаговой зоны, в области сочленения Южно-Ферганской и Северо-Ферганской сейсмоактивных зон, а также в районах Алайского и Туркестанского хребтов. Области с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению, отмечаются только в пределах двух участков Ферганской межгорной впадины: между Северо-Ферганским разломом и Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоной южнее г. Коканд и к северу от г. Андижан в пределах Андижанской сейсмогенерирующей зоны. Доля областей с напряженным состоянием, близким к чистому сдвигу, становится еще меньше, чем в результате предыдущей реконструкции по механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений.

Характер распределения коэффициента Лодэ – Надаи существенно меняется с глубиной (рис. 11 и рис. 12). Если для небольших глубин (0-10 км) преобладающим является чистый сдвиг, то с увеличением глубины домены с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию, одноосному растяжению и чистому сдвигу, распределены примерно в равных долях. При этом большая часть доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению, располагается в пределах Ферганской межгорной впадины. На глубинах до 10 км в Газлийской очаговой зоне значения коэффициента Лодэ – Надаи близки к нулю, что характерно для состояния чистого сдвига, а на больших глубинах отмечаются высокие значения параметра μ , что соответствует одноосному сжатию.

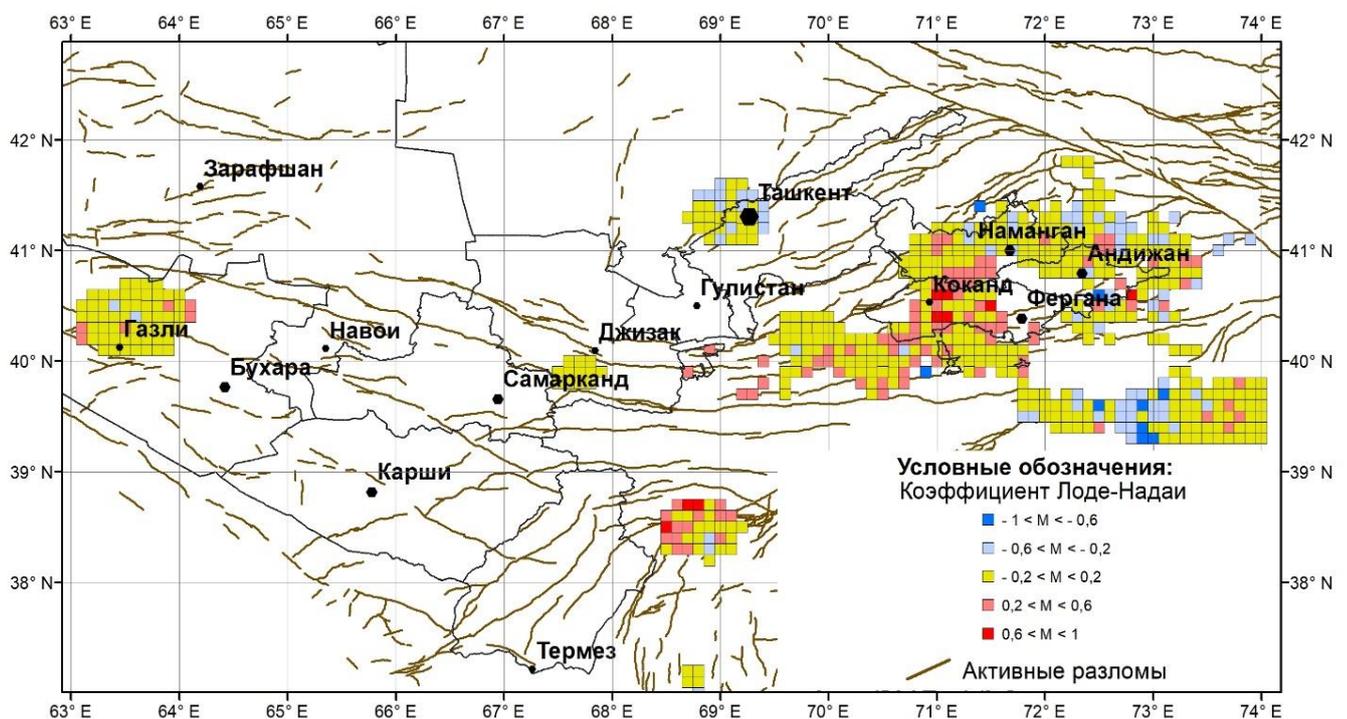


Рис. 11. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \leq 10$ км

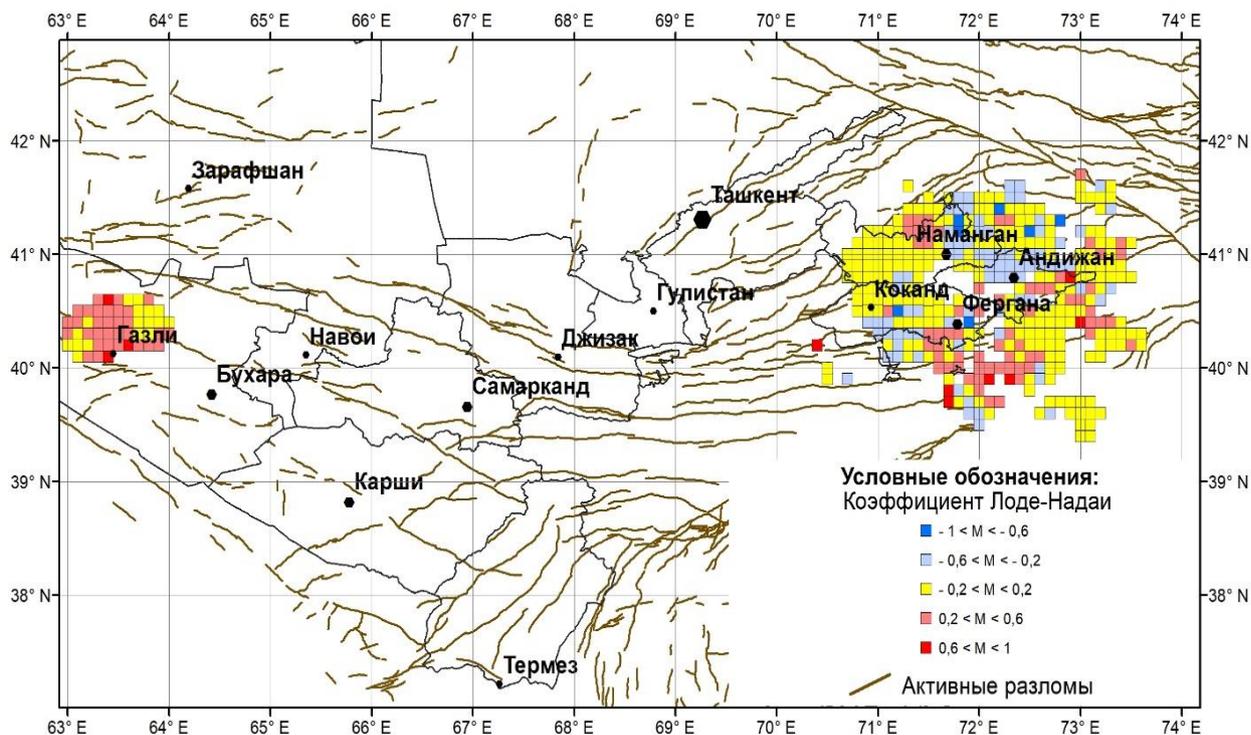


Рис. 12. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \geq 11$ км

Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния

По результатам реконструкции, проведенной по всей совокупности механизмов очагов землетрясений из каталога МОЗ с минимальным числом событий в единичной однородной выборке $N \geq 5$ и максимальным радиусом $R \leq 60$ км круговой области, из которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена (рис. 13), преобладающим геодинамическим типом напряженного состояния для всей исследуемой территории является режим горизонтального сжатия. Области, характеризующиеся режимом горизонтального сдвига, расположены в центральной части Таласо-Ферганской сейсмоактивной зоны и на территории Южного Узбекистана в северной части Бабатаг-Кейкитауской сейсмогенной зоны. Небольшие участки, характеризующиеся режимом горизонтального сдвига, расположены также в северо-восточной части сейсмоактивных структур Приташкентского района и на отдельных сегментах Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны за пределами восточной части территории Узбекистана. Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального растяжения, расположено за Туркестанским хребтом и в пределах Алайской долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близгоризонтальна и ориентирована в направлении простирания Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкостр структур и близвертикальна.

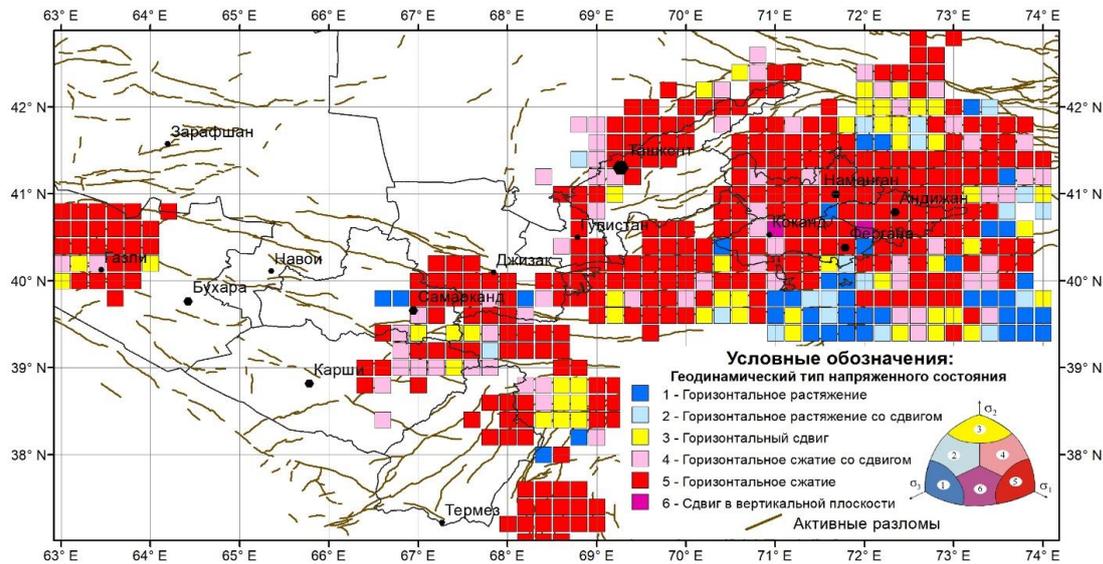


Рис. 13. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

По результатам более детальной реконструкции, проведенной по механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений (см. рис. 14), расположение областей, характеризующихся различными геодинамическими типами напряженного состояния, существенно не изменилось. Несколько увеличилась область горизонтального сдвига в Газлийской очаговой зоне и небольшое число доменов с этим геодинамическим типом напряженного состояния появилось к западу от г. Ташкент.

На той части территории, где удалось провести детальную реконструкцию по механизмам очагов сильных землетрясений, отмечаются только два типа напряженного состояния – режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига (см. рис. 15). Последним типом характеризуются западная часть Газлийской очаговой зоны и область, территориально расположенная между Туркестанским и Алайским хребтами.

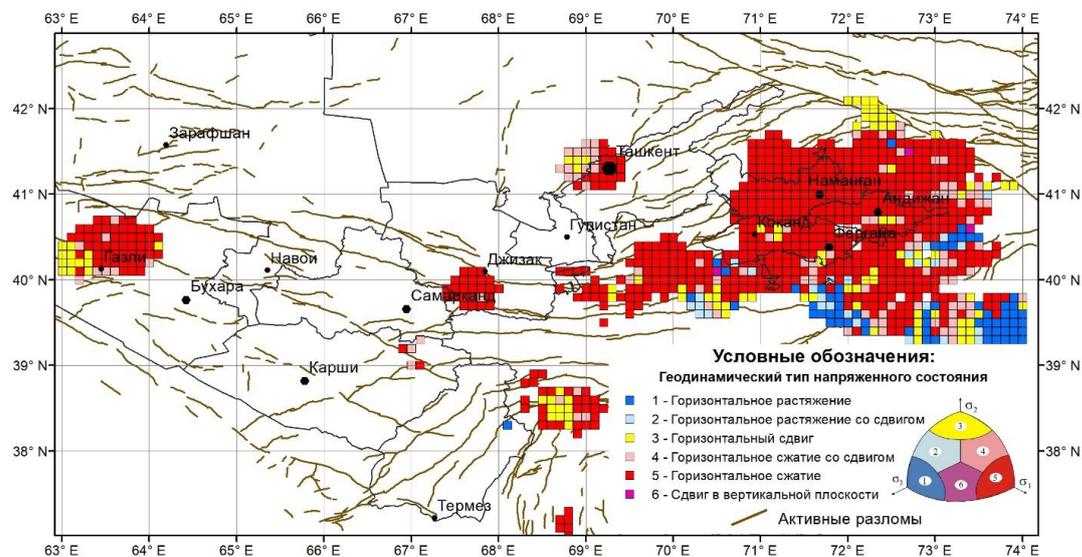


Рис. 14. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции по землетрясениям с $M \leq 4.5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

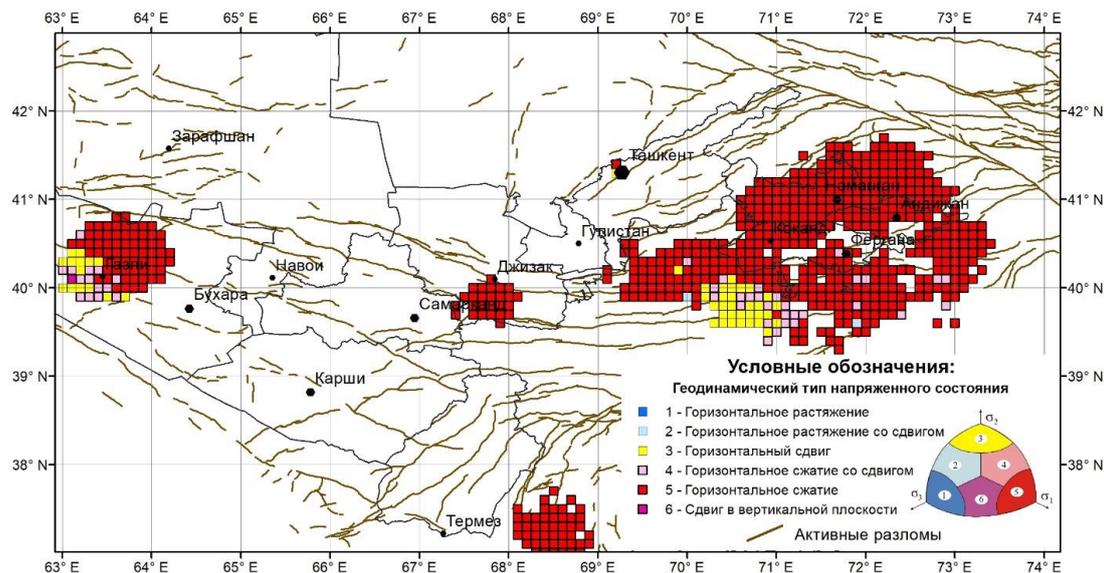


Рис. 15. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции по землетрясениям с $M \geq 5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

Анализируя особенности изменения распределения геодинамических типов напряженного состояния земной коры в зависимости от глубины сейсмоактивного слоя (рис. 16 и рис. 17), следует сказать, что реконструкцию поля напряжений для Приташкентского района по имеющимся данным удалось осуществить только в диапазоне глубин 0-10 км. Преобладающим для данной территории является режим горизонтального сжатия со сдвигом. Направление главной оси напряжения максимального сжатия σ_3 ориентировано в близширотном направлении, а ось минимального сжатия σ_1 имеет направление на юго-юго-запад. Погружение обеих осей σ_1 и σ_3 для большинства доменов Приташкентского района достаточно пологое. К западу от Ташкента находится несколько доменов, характеризующихся режимом горизонтального сдвига.

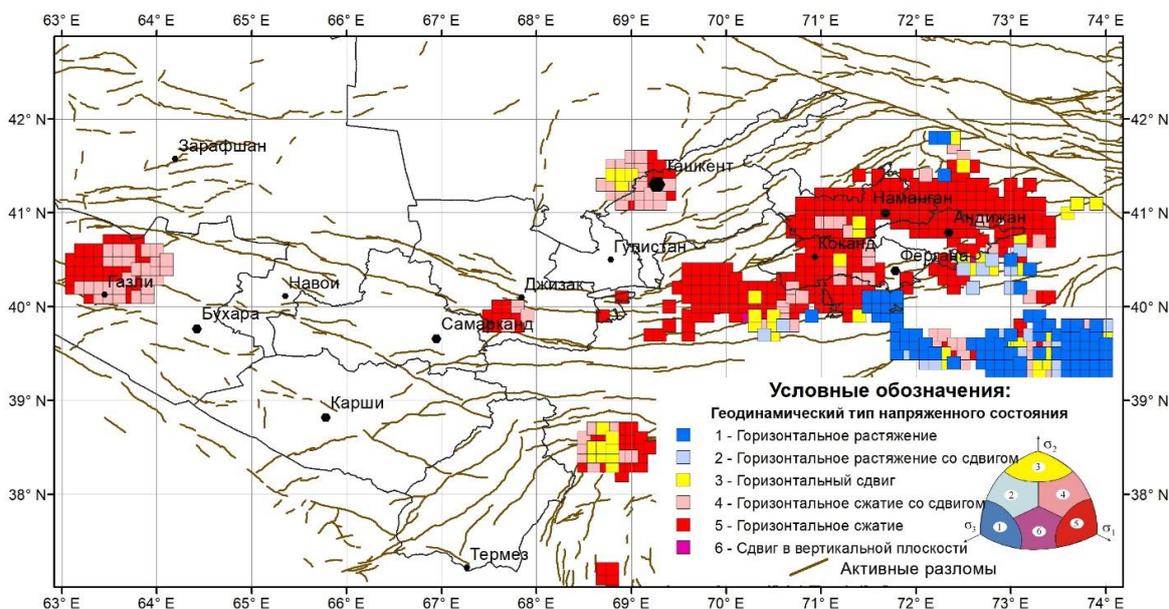


Рис. 16. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \leq 10$ км

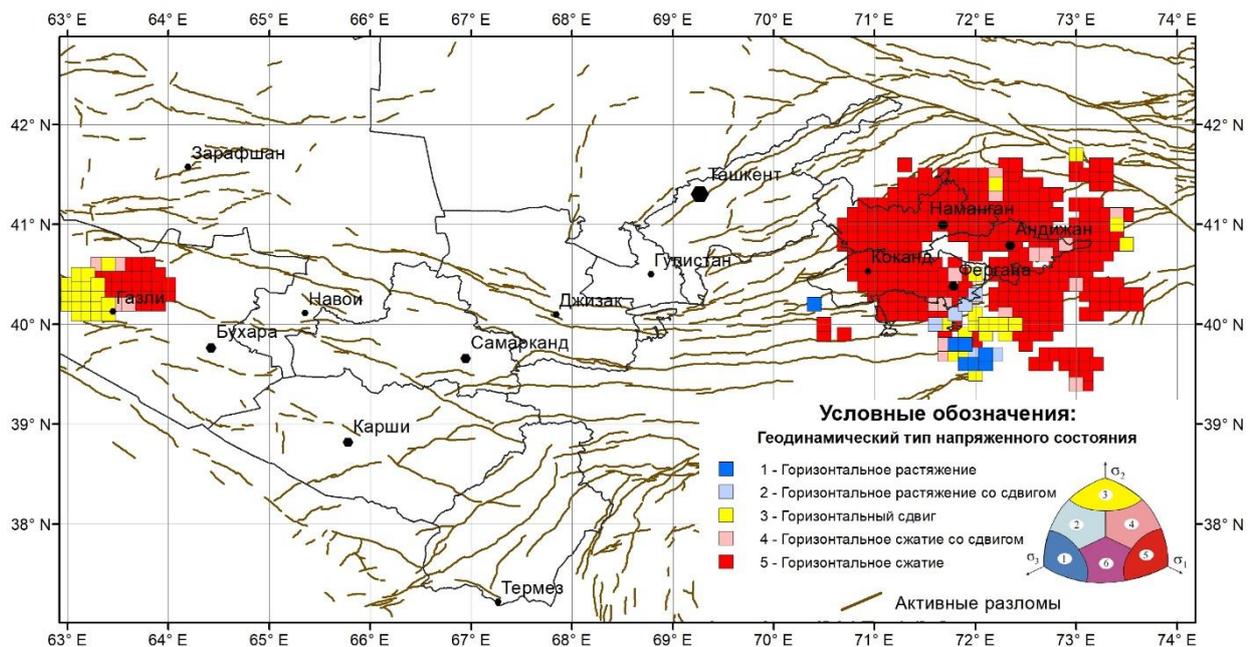


Рис. 17. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$, максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км для глубин землетрясений $H \geq 11$ км

Тип геодинамического режима Газлийской очаговой зоны сильно меняется с глубиной. Для всего сейсмоактивного слоя в целом юго-западная часть зоны характеризуется режимом горизонтального сдвига, а восточная – горизонтальным сжатием. На малых глубинах (0-10 км) западная часть зоны находится в режиме горизонтального сжатия, а восточная – в режиме горизонтального сжатия со сдвигом. На больших глубинах западная часть Газлийской очаговой зоны характеризуется режимом горизонтального сдвига, а восточная часть – горизонтальным сжатием. Ось главного сжатия σ_3 ориентирована в юго-восточном направлении и практически близ горизонтальна для всех исследуемых доменов. Направление оси σ_3 слабо меняется с глубиной. Для оси минимального сжатия σ_1 картина существенно иная. С приближением к дневной поверхности для Газлийской очаговой зоны уменьшается разброс в вариациях азимутов и углов погружения. Она ориентирована в северо-восточном направлении и имеет угол погружения порядка 30^0-40^0 к горизонту. Для больших глубин восточная часть Газлийской очаговой зоны ось максимального сжатия имеет ориентацию на север и практически близ вертикальна.

В Южной части Узбекистана (северная часть Бабатаг-Кейкитауской структуры) внутри области горизонтального сжатия выделяется значительная по размерам область горизонтального сдвига. При этом, ось максимального сжатия σ_3 характеризуется близ горизонтальным погружением и, практически везде, ориентирована в широтном направлении вкост простираения Гиссарских структур. Ось минимального сжатия σ_1 в кольцевой части данной области, характеризующейся режимом горизонтального сжатия, практически близ вертикальна и имеет северо-западную ориентацию. В центральной части области, характеризующейся режимом горизонтального сдвига, ось σ_1 близ горизонтальна и ориентирована вдоль простираения Гиссарских структур.

В центральной и восточной части Ферганской межгорной впадины ось минимального сжатия σ_1 близ вертикальна. Западная часть впадины характеризуется близ горизонтальным погружением оси σ_1 и азимутом в направлении на юго-запад.

Практически для всех доменов Ферганской межгорной впадины ось максимального сжатия σ_3 близ горизонтальна. Для концевых участков впадины эта ось имеет меридиональное направление, а в центральной части впадины она ориентирована в юго-восточном направлении. Эта особенность прослеживается для различных глубин сейсмоактивного слоя. Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся Ферганская впадина характеризуется режимом горизонтального сжатия. В центральной части впадины отмечается несколько доменов, находящихся в режиме горизонтального сдвига.

Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального сдвига, расположено в центральной и юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 имеет близ широтное направление, а ось максимального сжатия σ_3 близ меридиональное. Обе оси характеризуются малым углом погружения от линии горизонта.

Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального растяжения, расположены за Алайским хребтом в пределах одноименной долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близ горизонтальна и ориентирована в направлении простирания Южно-Тянь-Шанской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкрест структур и близ вертикальна.

Тип геодинамического режима исследуемой территории, также, как и коэффициент Лодэ – Надаи, существенно меняется с глубиной. С увеличением глубины, доля доменов, характеризующихся режимом горизонтального сжатия, становится больше.

Относительные величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления. Одним из результатов второго этапа реконструкции напряжений, проводимых методом катакластического анализа, является определение относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства: $p^* = p - p_{фл}$, где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$). В рамках данного метода предполагается, что в областях, характеризующихся высокой сейсмической активностью, массивы горных пород находятся в напряженном состоянии, близком к предельному. Из соотношений Кулона – Мора это определяет прямо пропорциональную связь между эффективными нормальными σ_1^* и касательными τ_n напряжениями на плоскости хрупкого разрыва [4] и, следовательно, между их относительными величинами p^*/τ_f и τ/τ_f , полученными нормированием значений p^* и τ на прочность сцепления массивов горных пород τ_f (в предположении, что последняя не сильно варьирует в пределах исследуемой территории).

На рисунках 18 - 20 показано площадное распределение относительных величин эффективного давления p^*/τ_f для некоторых вариантов проведенной реконструкции (в силу сказанного выше поведение величины τ/τ_f аналогично изменениям p^*/τ_f и потому далее не приводится).

Для первых двух вариантов реконструкции (по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе $R \leq 60$ км и по землетрясениям с $M \leq 4.5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км) распределение по площади повышенных, умеренных и пониженных значений параметра p^*/τ_f достаточно мозаичное (см. рис. 18 и рис. 19). По результатам реконструкции с привлечением механизмов очагов сильных землетрясений (рис. 20) можно отметить, что области с различным значением относительных величин эффективного давления p^*/τ_f структурированы значительно лучше и чередуются между собой на территории Восточного Узбекистана в пределах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон. В западной части территории Узбекистана пониженными значениями величин эффективного давления p^*/τ_f характеризуется Газлийская очаговая зона.

В работах [3, 12, 13] отмечается, что сильные землетрясения, как правило, происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. Это связано с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, а это создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения. С целью проверки данного положения в исследуемом регионе мы нанесли на карту нормированных значений эффективного давления эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, произошедших на территории Узбекистана начиная с исторических времен. В целом, опираясь на результаты реконструкции, проведенной с большим уровнем детальности (см. рис. 20), можно отметить, что распределение таких землетрясений не противоречит выводам этих работ, установленным при исследовании других сейсмоактивных регионов. В этой связи обращают на себя внимание достаточно протяженные участки пониженных значений нормированных значений эффективного давления p^*/τ_f в пределах высокопотенциальных зон на территории Восточного Узбекистана (см. рис. 20), которые получены по результатам реконструкции с привлечением механизмов очагов сильных землетрясений. Если учесть, что землетрясения с магнитудой более 5, как правило, реализуются в сейсмоактивном слое, расположенном на глубинах ниже 10 км, то можно предположить, что показанное на рис. 20 в распределение относительных величин эффективного давления эффективного давления p^*/τ_f , отражает напряженное состояние именно этого сейсмоактивного слоя. Чередова-

ние в его пределах связанных площадных образований с повышенными и пониженными значениями величины p^*/τ_f , достаточно хорошо согласуется с установленными ранее авторами настоящего исследования особенностями площадного группирования сильных землетрясений, произошедших с исторического периода времени по сей день, в компактных областях [14], в которых, по всей видимости, реализованы оптимальные условия для крупномасштабного разрушения. Для более конкретного тектонофизического районирования разломов земной коры по степени сейсмической опасности его отдельных участков необходимы специальные исследования кулоновских напряжений на их поверхности, что требует данных об углах погружения разломов [15].

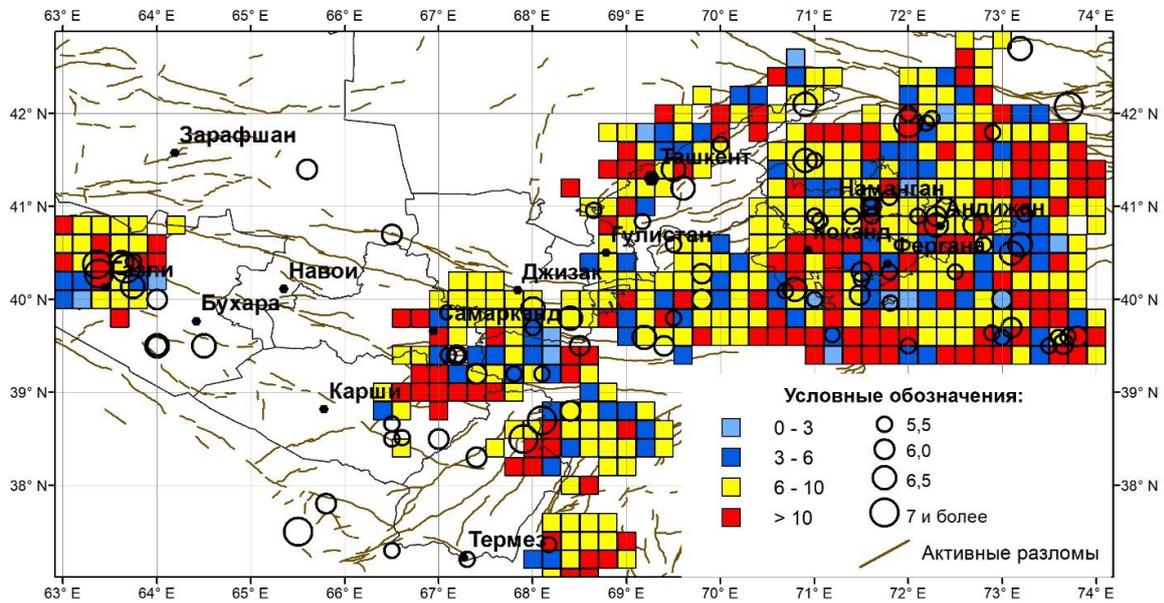


Рис. 18. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления величины эффективного давления (p^*/τ_f) при реконструкции по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе $R \leq 60$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

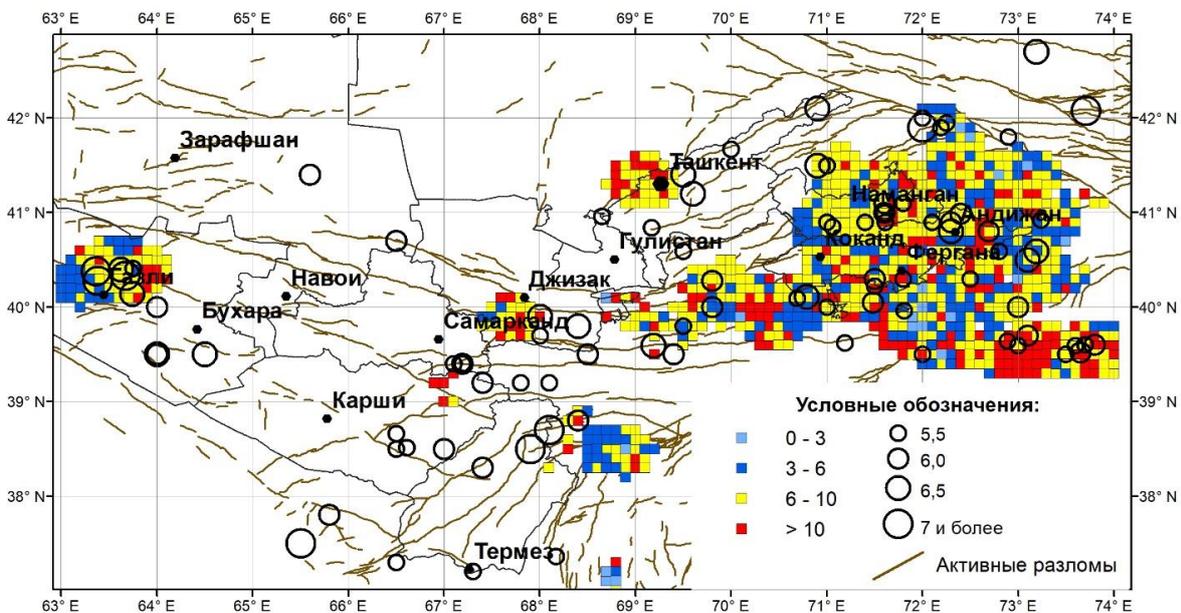


Рис. 19. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления величины эффективного давления (p^*/τ_f) при реконструкции по землетрясениям с $M \leq 4.5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

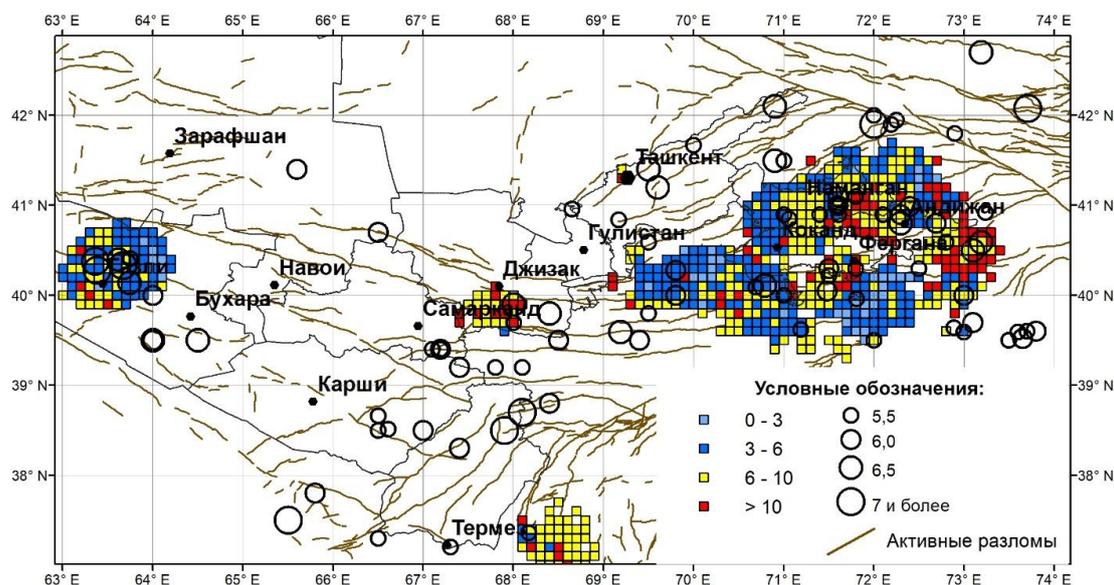


Рис. 20. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления величины эффективного давления (p^*/T_f) при реконструкции по землетрясениям с $M \geq 5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км круговой области, с которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для единичного домена

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования сводятся к следующему.

Методом катакластического анализа разрывных смещений, разработанным в лаборатории «Фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики» ИФЗ РАН, проведено два этапа реконструкции поля напряжений, в результате которых для ряда сейсмоактивных областей территории Узбекистана получена послойная картина напряженного состояния массивов горных пород.

Анализ пространственного положения осей главных напряжений показал, что угол погружения оси минимального сжатия σ_1 существенно меняется с глубиной. На малых глубинах (0-10 км) отмечается большой разброс (от 0° до 80°) в углах погружения оси σ_1 . На глубинах более 10 км для большинства доменов ось σ_1 субвертикальна. Наибольшие вариации азимута оси минимального сжатия с увеличением глубины отмечаются в районе Алайского хребта (от субширотного на малых глубинах до субмеридионального на больших) и в восточной части Газлийской очаговой зоны (от северо-восточного до строго меридионального).

Угол погружения оси главного сжатия σ_3 ведет себя более стабильно при изменении глубины сейсмоактивного слоя. Как для всего сейсмоактивного слоя в целом, так и для различных глубин, для большинства доменов ось σ_3 близгоризонтальна. В большинстве случаев простираение оси максимального сжатия практически перпендикулярно направлению структур. Эта особенность нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают.

Анализ распределения коэффициента Лоде – Надаи, рассчитанного для всего сейсмоактивного слоя в целом, показал, что преобладающим для исследуемой территории является напряженное состояние близкое к чистому сдвигу ($0,2 < \mu_\sigma < 0,2$). Эта же особенность отмечается и для верхнего (0-10 км) сейсмоактивного слоя. С увеличением глубины домены с напряженным состоянием близким к одноосному сжатию, одноосному растяжению и чистому сдвигу распределены примерно в равных долях. При этом большая часть доменов с напряженным состоянием близким к одноосному растяжению располагается в пределах Ферганской межгорной впадины. Области повышенных значений параметра μ , что соответствует напряженному состоянию близкому к одноосному сжатию, расположены на отдельных сегментах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон, а также в очаговой зоне Газли.

Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся исследуемая территория характеризуется режимом горизонтального сжатия. Домены, находящиеся в режиме горизонтального сдвига, расположены в центральной и юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома.

Для верхнего сейсмоактивного слоя (0-10 км) выделяются значительные по размерам области, характеризующиеся режимом горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. Первые распо-

ложены за Алайским хребтом в пределах одноименной долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близ горизонтальна и ориентирована в направлении простирания Южно-Тянь-Шанской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкост структур и близ вертикальна. Области с режимом горизонтального сдвига расположены в северной части Бабатаг-Кейкитауской структуры, в северо-восточной части сейсмоактивных структур Приташкентского района и на отдельных сегментах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

По всей исследуемой территории с увеличением глубины доля доменов, характеризующихся режимом горизонтального сжатия, по отношению ко всей области, где проведена реконструкция, возрастает.

По результатам реконструкции с привлечением механизмов очагов сильных землетрясений установлено, что области с различным значением относительных величин эффективного давления p^*/τ_f хорошо структурированы и чередуются между собой на территории Восточного Узбекистана в пределах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон. В западной части территории Узбекистана пониженными значениями величин эффективного давления p^*/τ_f характеризуется Газлийская очаговая зона. Сильные землетрясения, как правило, происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. Чередование площадных образований с повышенными и пониженными значениями величины p^*/τ_f хорошо согласуется с установленными ранее авторами настоящего исследования особенностями площадного группирования сильных землетрясений, произошедших с исторического периода времени по сей день, в компактных областях, в которых реализованы оптимальные условия для крупномасштабного разрушения.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и государственного гранта фундаментальных исследований ФА-Ф8-007 Министерства инновационного развития Республики Узбекистан, а также Концепции Академии наук Республики Узбекистан по фундаментальным и прикладным исследованиям на 2021-2024 годы.

Литература

1. Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. - М.: Изд-во АН СССР - 1985. - 408 с.
2. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. - М.: Наука - 1990. - 190 с.
3. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние, благоприятное для крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // Докл. РАН, 2007. - Т. 416, № 5. - С. 106–109.
4. Ребецкий Ю.Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмоструктурных деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании // Докл. РАН. 1997. - Т. 354, № 1. - С. 101–104.
5. Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. - Ташкент: ФАН. - 1974. - 216 с.
6. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмоструктурный метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. - Ташкент: Гидроингео, 2002. - С. 59–74.
7. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика, 2017. - Т. 8. № 4. - С. 711–736. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0314).
8. Землетрясения Средней Азии и Казахстана. Душанбе: Дониш, 1979-1988 гг.
9. Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. - Ташкент: ФАН, 1987. - 144 с.
10. Eksrom G., Nettles M. Global CMT web page; <http://www.globalcmt.org/> (accessed April 17, 2014).
11. Ребецкий Ю.Л., Ибрагимов Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А. Напряженное состояние сейсмоактивных областей Узбекистана // Вопросы инженерной сейсмологии, 2020. - Т. 47. № 3. - С. 28–52. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.3-2>.
12. Rebetsky Y.L., Tatevossian R.E. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bulletin de la Societe Geologique de France 2013. - V.184. № 4–5. - P. 335–346.
13. Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // Геология и геофизика, 2016. - Т. 57. № 3. - С. 496–520.
14. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимов Т.Л., Мирзаев М.А. Синоптический долгосрочный прогноз мест ожидаемой сейсмической активизации на территории Узбекистана // Геориск. 2017. № 2. - С. 20–28.
15. Rebetsky Yu.L., Kuzikov S.I. Active faults of the northern Tien Shan: tectonophysical zoning of seismic risk // Russian Geology and Geophysics, 2016. - 57 (6), 967–983. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.004>.

ZILZILALARNI PROGNOZLASH

УДК 550.38.550.343(375.1)

Муминов М.Ю.,* Сагдуллаева К.А., Нарходжаева Н.М, Мирзоев М.З.****

*Институт сейсмологии АН РУз г. Ташкент. muminov.mirzoid@mail.ru

** Республиканский Центр сейсмопрогностического мониторинга МЧС РУз.

АНОМАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ УЗБЕКИСТАНА

Mo'minov M.Yu., * Sagdullaeva K.A., * Narxojaeva N., ** Mirzoidov M.Z.**

* O'z R FA Seysmologiya instituti.

** O'z FVV respublika seysmik prognoz monitoring markazi

O'zbekistonning seysmofaol hududlarida yer magnit maydonining anomal o'zgarishlari

Аннотация. O'zbekistonning seysmofaol hududlarida keyingi 50 yil davomida olingan yer magnit maydoni anomal o'zgarishlarining xususiyatlari tadqiq etildi. Magnit maydonining texnogen va tabiiy jarayonlar bilan bog'liq anomal variatsiyalari keltirildi. O'rta muddatli anomal o'zgarishlarning sababchisi muhitdagi tektonik harakatlarning kuchlanishi orqali tushuntirildi. Zilzilalar tayyorlanish jarayonida muhitning geometrik shakli va fizik xossalari o'zgaradi va ular o'z navbatida muhitning elektr qarshiligi va magnit maydonining o'zgarishiga olib keladi

Калит so'zlar: anomalija, yer magnit maydoni variatsiyasi, darakchi, zilzilalarni prognoz qilish, faol uzilish, zilzila, sezgirlik, deformatsiya, kuchlanganlik, tektonik tugun.

Муминов М.Ю., * Сагдуллаева К.А., * Нарходжаева Н.М., ** М.З.Мирзоев **

*Институт Сейсмологии АН РУз г. Ташкент. muminov.mirzoid@mail.ru

** Республиканский Центр сейсмопрогностического мониторинга МЧС РУз.

Аномальные вариации геомагнитного поля в сейсмоактивных районах Узбекистана.

Аннотация. Проанализированы особенности проявления аномальных вариаций геомагнитного поля, выявленные за последние 50 лет в сейсмоактивных районах Узбекистана. Приведены примеры аномальных вариаций геомагнитного поля, обусловленные техногенными и естественными процессами. Проявления среднепериодных аномалий связаны с изменением поля тектонических напряжений среды. В процессе подготовки землетрясений меняются геометрические и физические параметры среды, и они, в свою очередь, приводят к изменению омического сопротивления и, соответственно, магнитного поля на поверхности земли.

Ключевые слова: аномалия, вариация геомагнитного поля, предвестник, прогнозирование землетрясений, активизированный разлом, чувствительность, деформация, напряжение, тектонический узел

Muminov M.Yu., * Sagdullaeva K.A., * Narkhodzhaeva N.M., ** Mirzoidov M.Z. **

* Institute of Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

** Republican Center for Seismoprediction monitoring of the Ministry of Emergency situation of the Republic of Uzbekistan.

Anomalous variations of the geomagnetic field in the seismoactive regions of Uzbekistan.

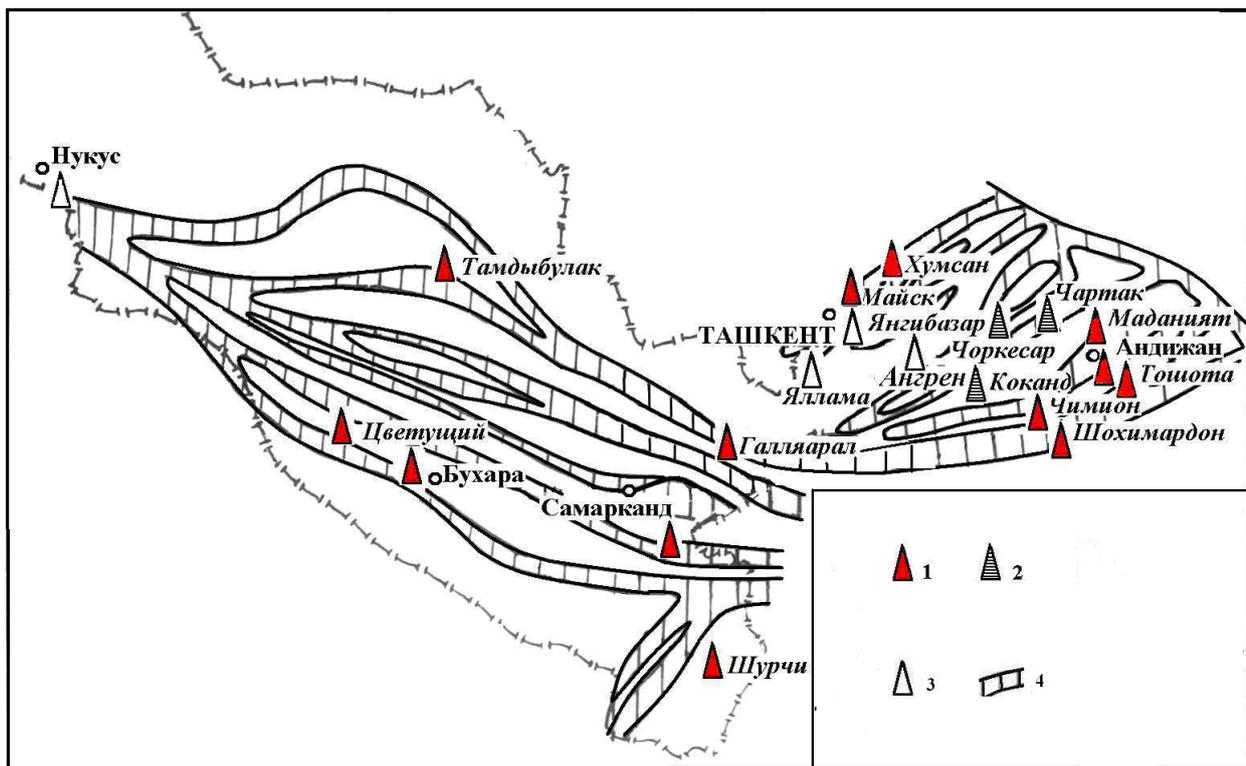
Annotation. The features of the manifestation of anomalous variations of the geomagnetic field revealed over the past 50 years in the seismically active regions of Uzbekistan are analyzed. Examples of anomalous variations of the geomagnetic field caused by man-made and natural processes are given. The nature of medium-period anomalies is associated with changes in the field of tectonic stresses of the medium. In the process of preparing for earthquakes, the geometric and physical parameters of the environment change, and they in turn lead to a change in the ohmic resistance and, accordingly, the magnetic field on the earth's surface. Annotation

Keywords: anomaly, geomagnetic field variation, precursor, earthquake prediction, activated fault, sensitivity, deformation, stress, tectonic node

Исследования вариаций напряженно-деформированного состояния сейсмо-тектонических структур Узбекистана методами повторных маршрутных, площадных и стационарных наблюдений проводятся с 1968 года [1, 2]. Профиля маршрутных наблюдений были заложены вдоль и поперек основных тектонических структур и активных региональных разломов земной коры. Площадные наблюдения проводились на участках аномальных проявлений, выявленных маршрутными геомагнитными съемками, или в аномальных зонах, выделенных другими комплексами про-

гностических методов. Использовался метод синхронных наблюдений. Стационарные наблюдения проводились в различных геолого-геофизических условиях высокоточными (чувствительность $\pm 0,1$ нТл.) протонными магнитометрами (ТМП, МПП-01М, МВ-01 и др.). Общее количество повторных маршрутных и площадных наблюдений на Ташкентском, Ферганском, Кызылкумском полигонах Узбекистана превысило 1110 точек, а стационарных наблюдений более 37. Из 37 стационарных наблюдений в 12 магнитометры функционировали на комплексных сейсмопрогностических станциях (КСПС). Остальные функционировали автономно или в комплексе с другими геофизическими методами (ЭМИ, ЭТП и др.) [1,2] (Рис. 1).

За 50-летний период геомагнитных исследований выделены многочисленные (более 50) особые случаи аномальных изменений геомагнитного поля, заслуживающие внимания, которые в два и более раз превышали точность съемки ($\sigma \geq 2$). Так же к особым случаям отнесены случаи, отсутствия предвестника в период проведения геомагнитных измерений. Анализируя эти случаи, можно отметить в каких геолого-геофизических условиях часто обнаруживаются аномальные вариации геомагнитного поля, а в каких они реже, и в каких их трудно обнаружить. Этот показатель в основном характеризует чувствительность места установки регистратора к различным геодинамическим процессам в зависимости от геолого-геофизических условий района.



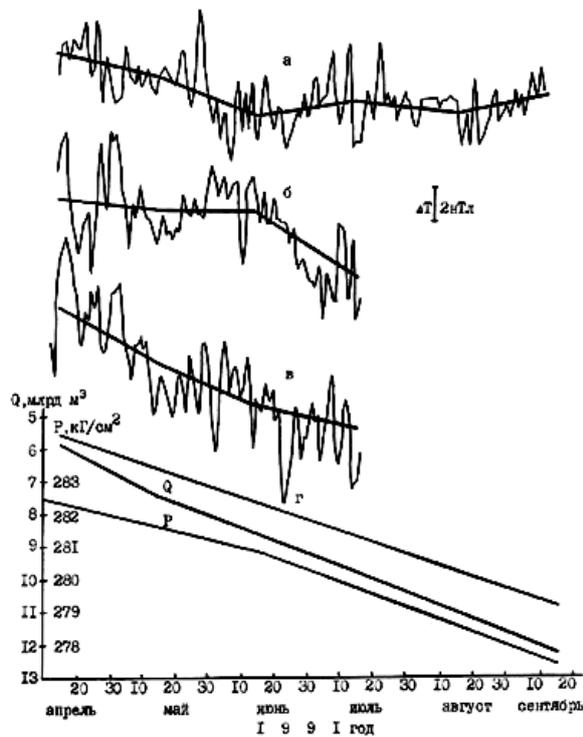
Условные обозначения: 1-бухтообразные; 2-специфические ступени; 3-никакие; 4- сейсмогенные зоны по Р.Н.Ибрагимову и др.

Рис.1. Схема расположения стационарных геомагнитных прогностических станций Института Сейсмологии АН РУз и дифференциации наиболее часто регистрируемых форм среднеперiodных предвестниковых аномалий на них в 1978-2021 гг.

Статистика показывает, что из 50 вышеупомянутых случаев: в 6 % случаях аномальные изменения геомагнитного поля зафиксировали в контурах подземного газохранилища и залежей газового месторождения [3,4]. Обнаружение аномальных вариаций геомагнитного поля над разрабатываемыми газовыми месторождениями, газо- и водохранилищами является результатом целенаправленного исследования в районах техногенных объектов [1,2]. Эти эксперименты позволяют натурно моделировать магнитоупругий эффект в природных условиях. Изучение характерных изменений геомагнитного поля в условиях контролируемых изменений нагрузок при техногенных воздействиях на земную кору (при заполнении крупных водохранилищ, подземных газохранилищ,

разработке нефтегазовых месторождений) позволяет однозначно интерпретировать результаты исследований. Интенсивность выявленных аномальных изменений на месторождении Шуртан составила 7 - 9 нТл (рис. 2). Коэффициент корреляции между аномальными изменениями ΔT и параметрами режима эксплуатации месторождения (объем добытого газа, пластовое давление) составил 0,98 [2-4]. Возможной природой проявления аномалий геомагнитного поля над разрабатываемыми газовыми месторождениями являются изменения физических свойств (объем, флюидонасыщенность, проницаемость, электропроводность и т.д) нефтегазосодержащих пористых отложений месторождения в результате изменения пластового давления или же сеймотектонических напряжений.

В одном случае (2%), аномальность связывается с переменным режимом пластового давления газа в Полторацком газохранилище [1-5] (Рис. 3). Другое аномальное изменение - с переменным режимом пластового давления и соответствующими электрокинетическими эффектами в газохранилище [1,5]. Изменение давления в подземном куполе (глубина 600-800 м) от 6 до 9 МПа вызвало синусоидальные изменения поля на поверхности земли с амплитудой порядка 1,5 нТл. Эти изменения хорошо коррелируют с режимом эксплуатации газохранилища (рис 3).



Условные обозначения: а) Вариации ΔT между станциями Шуртан-1 и «Улугбек» ($R=180\text{км}$) б) то же самое между ст Шуртан-2 и «Улугбек» б) Средние изменения на пунктах повторных наблюдений, расположенных на площади месторождения Шуртан, относительно ст «Улугбек».

Рис.2. Локальные изменения геомагнитного поля на территории газоконденсатного месторождения Шуртан.

На практике имеются случаи, когда разработка месторождения не вызвала значимых вариаций магнитного поля на поверхности земли. В этих случаях дебит нефти или газа (соответственно изменение поля напряжений) недостаточны для того, чтобы вызвать вариации магнитного поля на поверхности земли, или мощность покрывающего продуктивного пласта мала, чтобы реагировать на изменение поля напряжений. На рис.4 приведены временные ряды

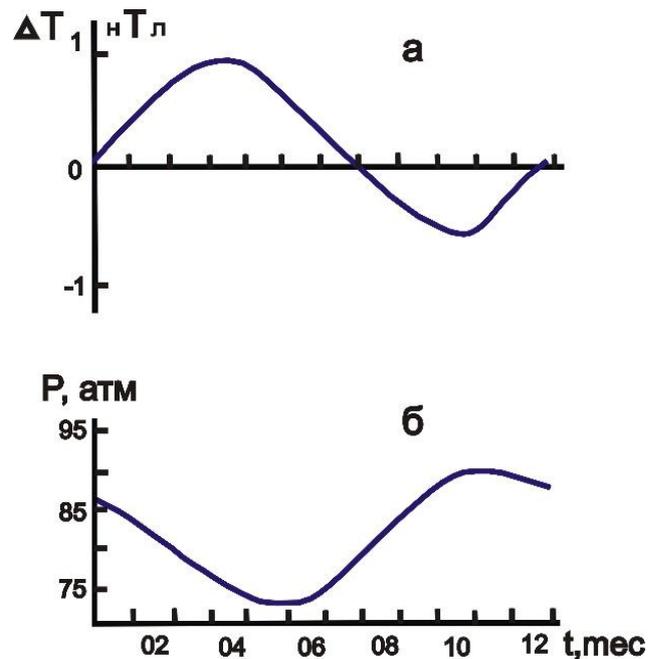


Рис. 3. Локальное аномальное изменение геомагнитного поля, связанное с режимом эксплуатации Полторацкого газохранилища [1,5]

изменения общего объема добычи нефти и воды из эксплуатируемой скважины (продуктивный пласт на глубине $h=200-250$ м) месторождения Чимион и магнитного поля, измеренного недалеко (300 м) от неё. Как видно из графика, вариации магнитного поля не зависят от изменения общей добычи нефти и воды месторождения Чимион (рис.4). Аномальное повышение магнитного поля, наблюдавшееся с октября 2017 года, в действительности было обусловлено более глубинными геодинамическими процессами, происходящими на границе блоков, т.е. подготовкой сильного ($M=5.8$) землетрясения 29.03.2018 года, а не приповерхностными явлениями (эксплуатацией месторождения). Ежемесячный отбор нефти и газа в объеме первые тысячи m^3 / в месяц не вызывал существенных изменений вариаций магнитного поля прогностической станции Чимион. Изменение пластового давления в рассматриваемом случае настолько мало, что не вызывает значимых изменений магнитного поля на поверхности земли. Это означает, что большинство ранее наблюдаемых средне- и короткопериодных аномалий магнитного поля на ст. Чимион было вызвано упругими сеймотектоническими напряжениями.

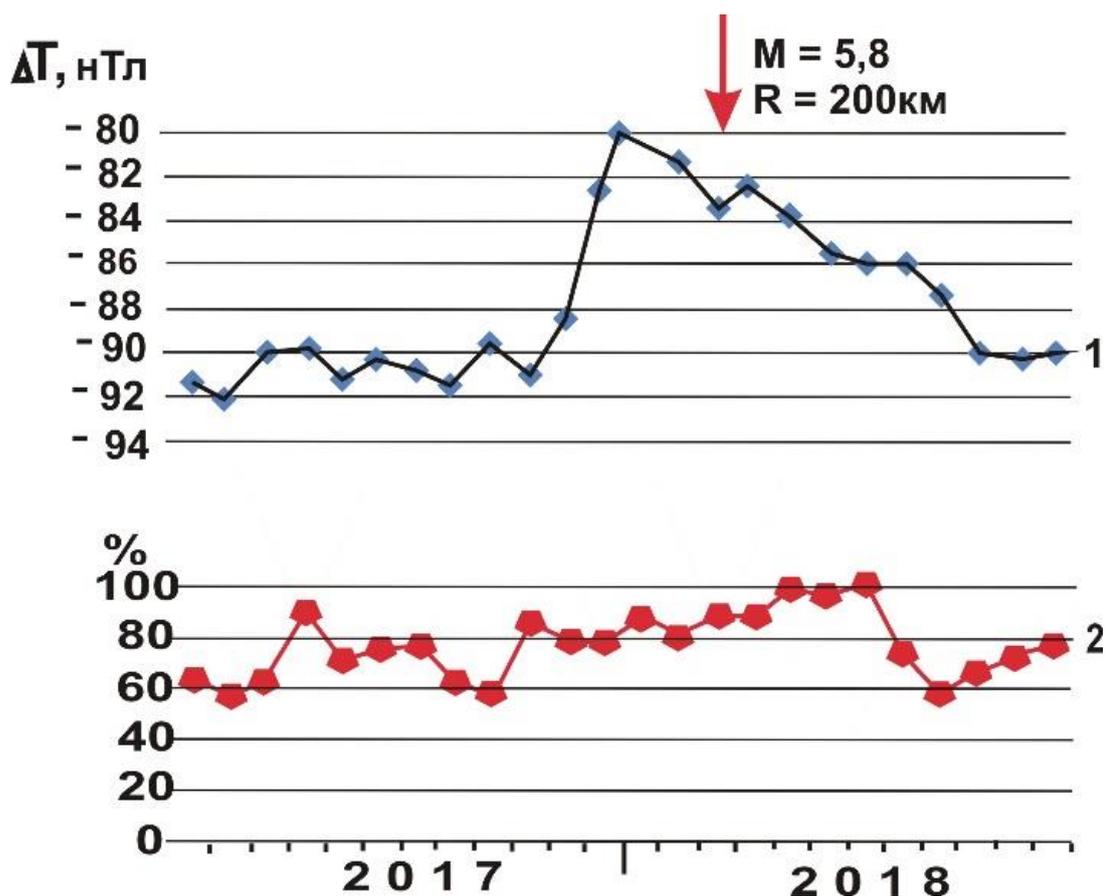


Рис.4. График сопоставления ежемесячных вариаций геомагнитного поля(1) и изменение объема добычи нефти и воды (2) в месторождении Чимион. Стрелкой показан момент возникновения землетрясения с $M= 5.8$ в Южно-Тянь- Шаньской сейсмогенной зоне

В другом случае аномальность связывается с переменным режимом объема воды на Чарвакском водохранилище [2,6] (рис.5). На Чарвакском водохранилище максимальный эффект составил 6 нТл при изменении объема воды на $10^9 m^3$ [4,6] (рис.5). Примерно аналогичные магнитные эффекты получены вблизи известных водохранилищ Азат (Армения), Токтагуль (Киргизия), Талбинго (Австралия) и др.

Из литературных данных известно, что при подготовке землетрясений средней силы ($M=5.0$) в очаге накапливаются избыточные давления порядка 5-10 МПа и более. В исследуемых нами техногенных объектах приращение избыточного давления составляет до 3-5 МПа, что вызывает аномалию в магнитном поле на земной поверхности порядка 1-7 нТл. Если учесть относи-

тельно неглубокое расположение техногенных объектов и воздействия на них относительно малыми избыточными давлениями, чем тектоническое землетрясение, то окажутся реальными регистрация аномалий интенсивностью 1-7 и более нТл.

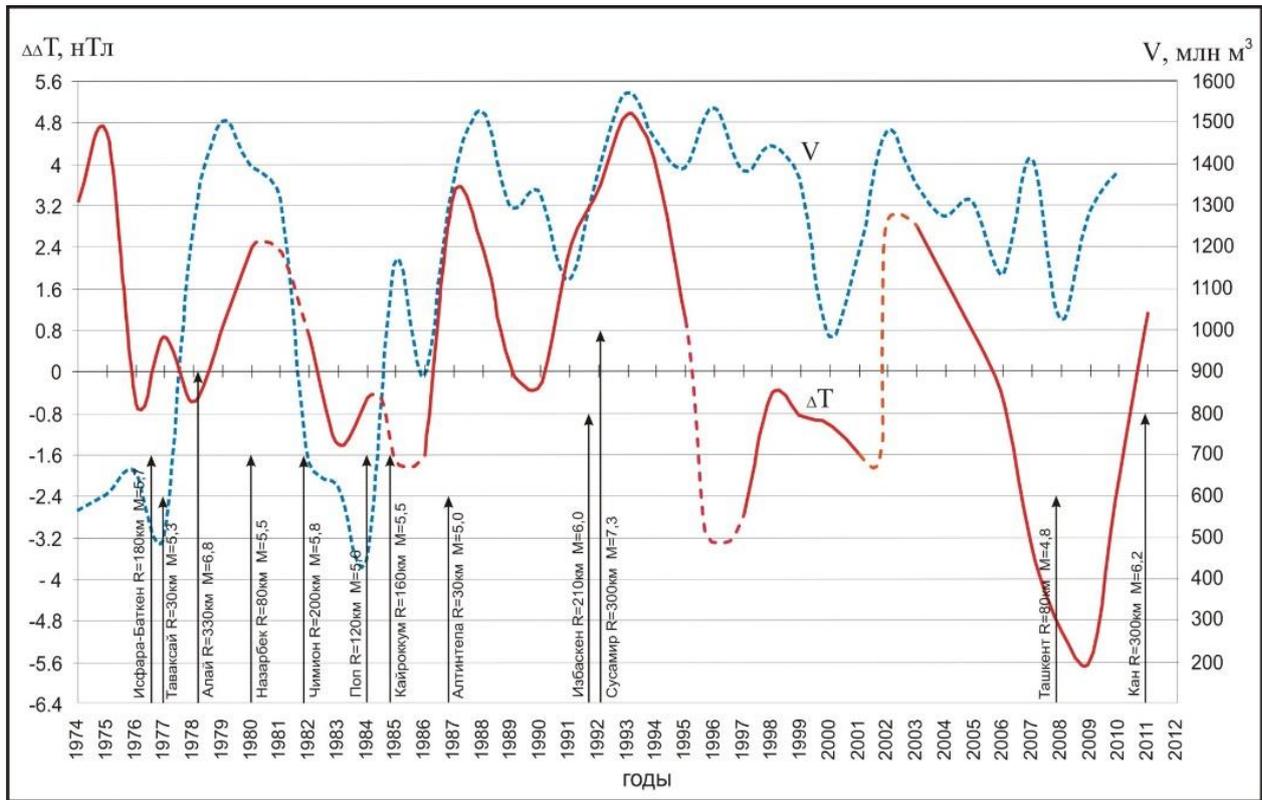


Рис. 5. Аномальные изменения геомагнитного поля на Чарвакском полигоне

В двух случаях (4%) аномальность связывается с возможным скоплением статического электрического поля в очаговой зоне готовящегося сильного землетрясения. Пример изменения амплитуд 1-3 часовых бухтообразных вариаций на ст. Чимион относительно obs. Янгибазар и ст. Маданият приведен на рис. 6 [6].

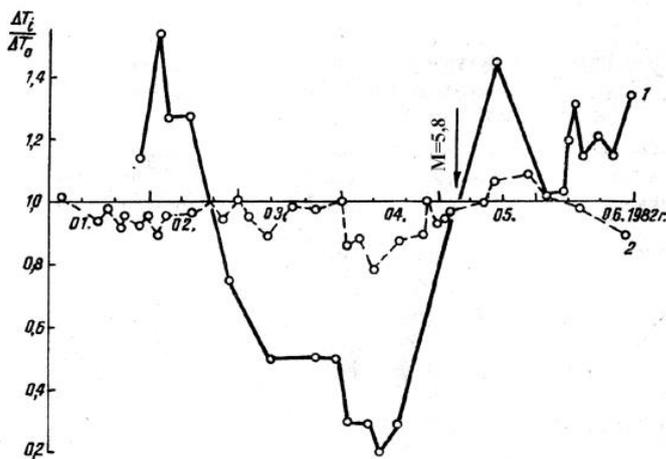


Рис 6. Аномальные изменения отношения амплитуд бухтообразных вариаций на ст. Чимион (1) относительно станции Маданият (2) по К.Н.Абдуллабекову [6]

Аномальные искажения вариаций внешнего магнитного поля были зарегистрированы дважды над очагами Газлийских (1976 года) и Чимионского (1982 года) землетрясений в период их активизации (рис.6).

В более 60% случаях выявленные аномальные изменения геомагнитного поля с большой вероятностью можно связывать с геодинамическими

процессами, в частности, с современными движениями земной коры, тектоническими землетрясениями и т. д.. На рис.7 приведено изменение магнитного поля ($\Delta\Delta T$) и высот земной поверхности ($\Delta\Delta h$) на отрезке профиля Газлийского полигона.

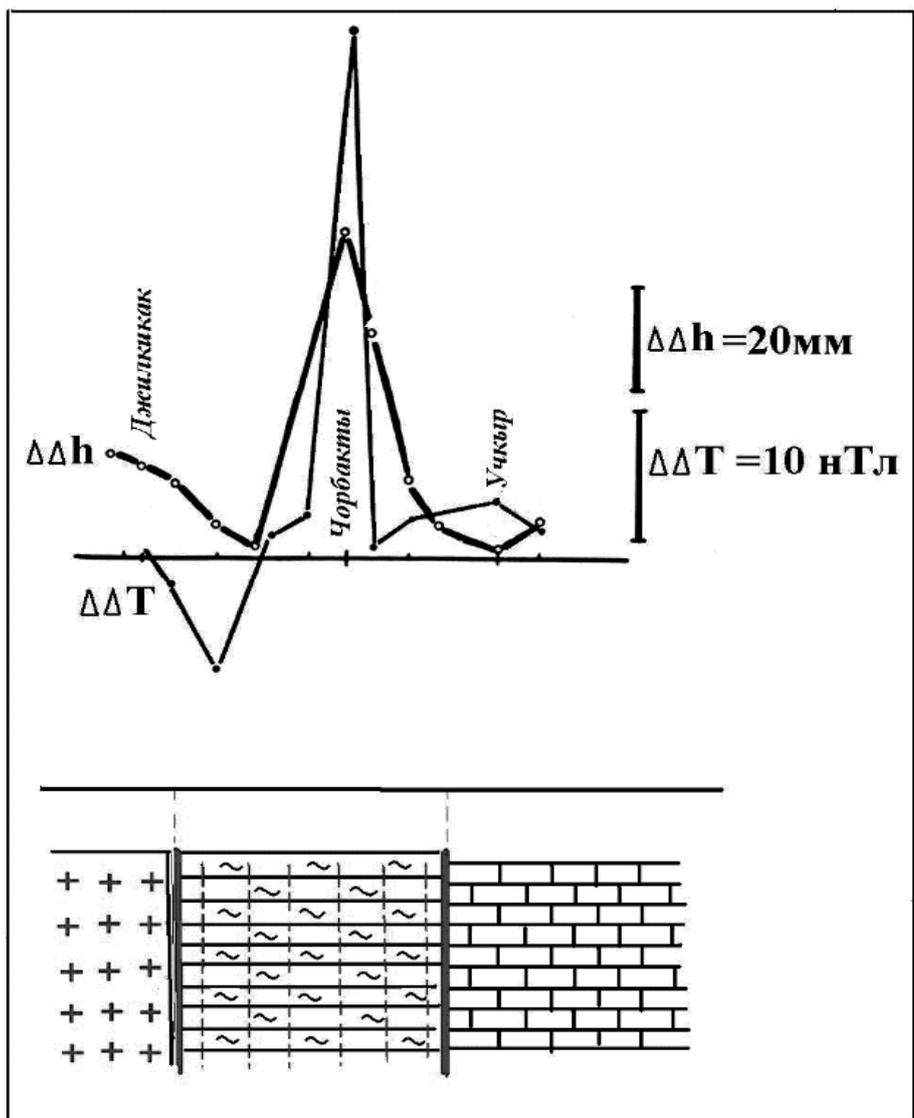


Рис.7. Межцикловые изменения магнитного поля ($\Delta\Delta T$) и высот земной поверхности ($\Delta\Delta h$) на отрезке профиля Газлийского полигона (1980-1985 гг.)

Аналогичные аномальные изменения магнитного поля с современными движениями в Восточной Фергане отмечались в период подготовки Алайского землетрясения (01.11.1978 года) с $M=6.8$ [6,7].

В более 55% случаях выявленные по результатам повторных маршрутных, площадных съемок и стационарных наблюдений аномальные изменения геомагнитного поля связываются с процессами подготовки тектонических землетрясений. На рис.8-10 приведены характерные примеры предвестниковых аномалий, связанных с процессами подготовки и свершения землетрясения.

Геомагнитные предвестниковые аномалии в большинстве случаев проявляются в зонах динамического влияния активизированных разломов – в пределах сейсмогенных зон (рис.8), на границах крупных тектонических блоков и узлов (рис.9 и 10). Предвестниковые аномалии землетрясений в пространстве и во времени проявляются в различных конфигурациях. В пространстве они проявляются аномальными изменениями на некотором отрезке маршрута или в виде дифференцированных изменений по площади (рис. 8-9). Во времени предвестниковые аномалии проявляются в виде динамики дифференцированных профильных или площадных изменений во времени (рис. 8-9), бухтообразные (рис.10), специфические ступени (рис. 11) и другие формы временного ряда.

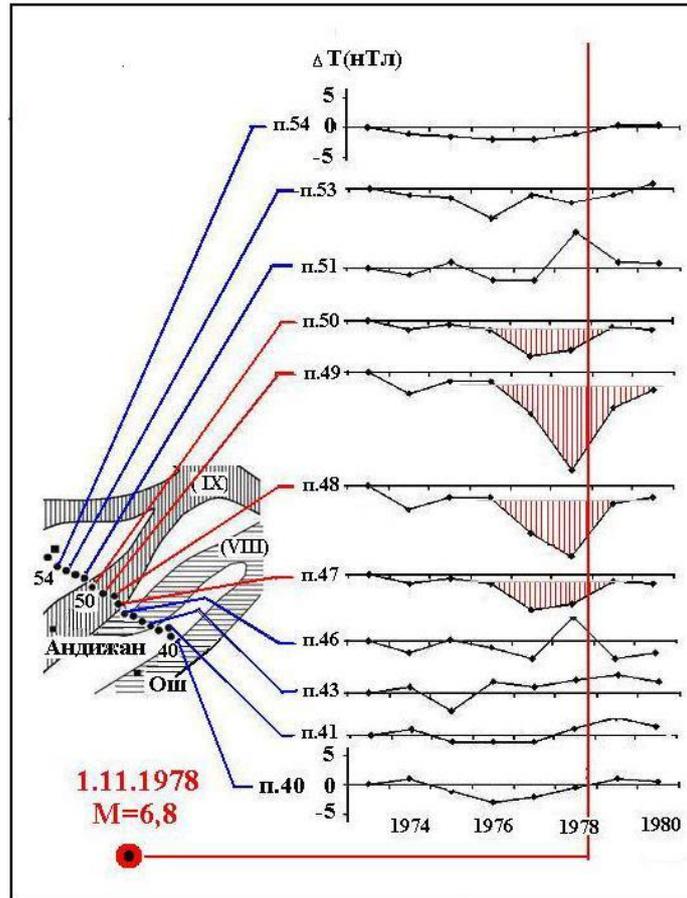


Рис.8. Дифференциация предвестниковых аномалий магнитного поля (ΔT) по маршруту, пересекающему Южно-Ферганскую флексурно-разрывную зону и одноимённую 9 бальную сейсмогенную зону в 1973-1980 гг., связанную с Алайским землетрясением 01. 11. 1978 г.[8]

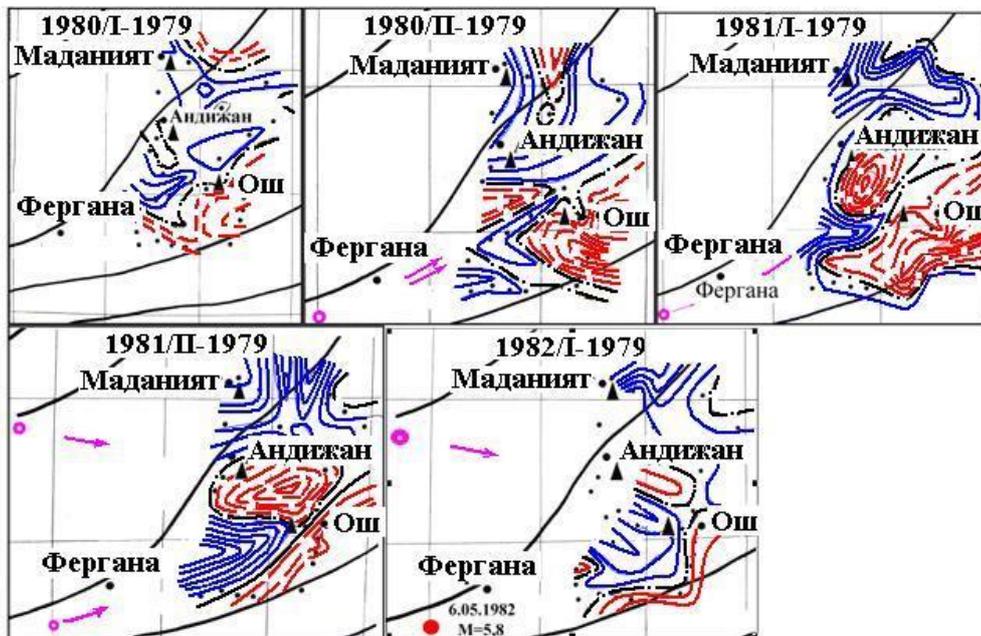


Рис. 9. Динамика предвестниковых аномалий магнитного поля на Ходжабадском полигоне в период подготовки и свершения Чимионского землетрясения 06.05.1982 г. [9]. Изолинии построены по среднеполугодовым значениям относительно уровня 1979 года

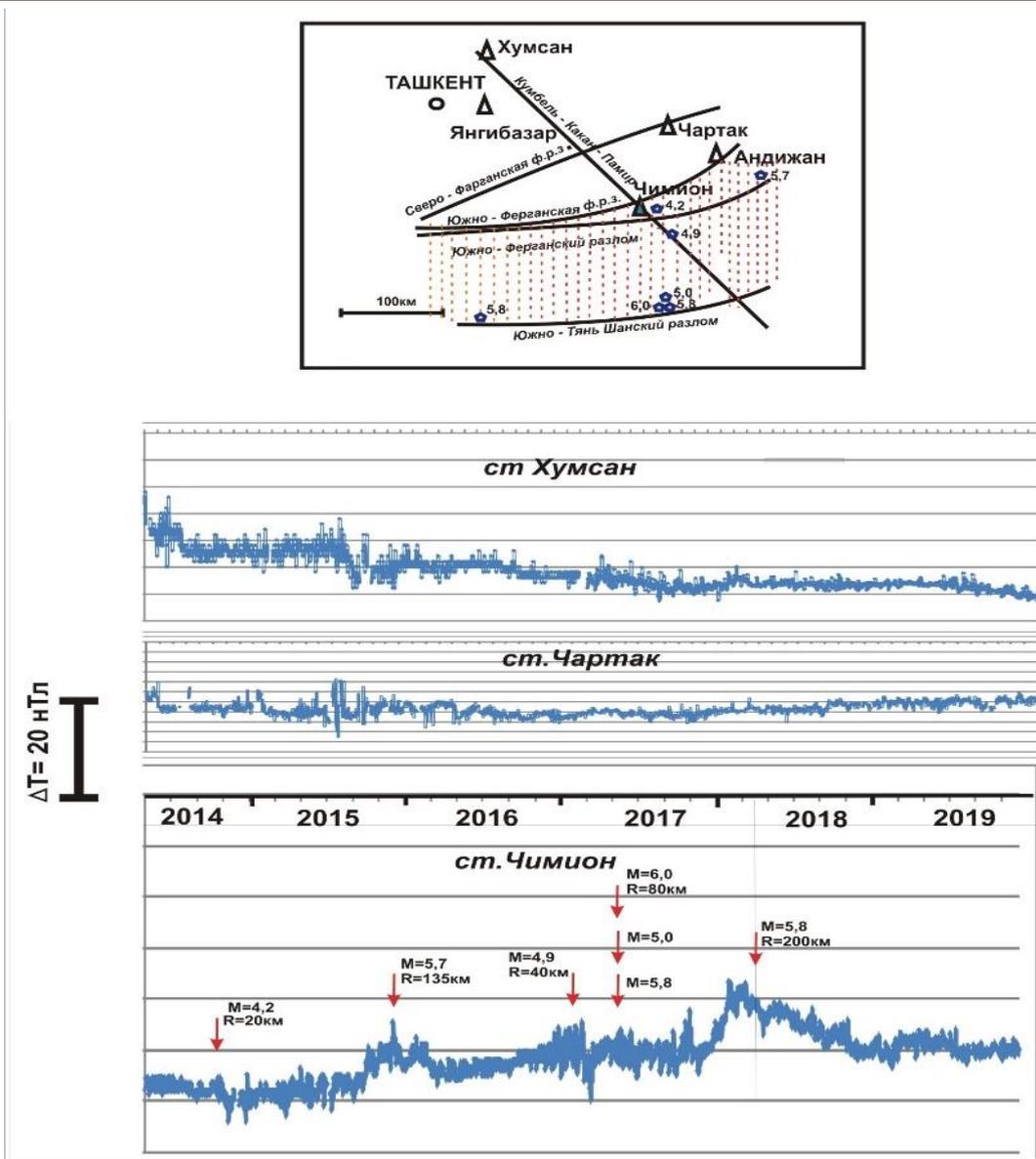


Рис.10. Вариации магнитного поля на ст. Хумсан, Чартак и Чимион относительно obs. Янгибазар в 2014 – 2019 гг. с моментами возникновения землетрясений средних магнитуд и сильных землетрясений, произошедших в зоне чувствительности прогностической станции Чимион (выделенная область)

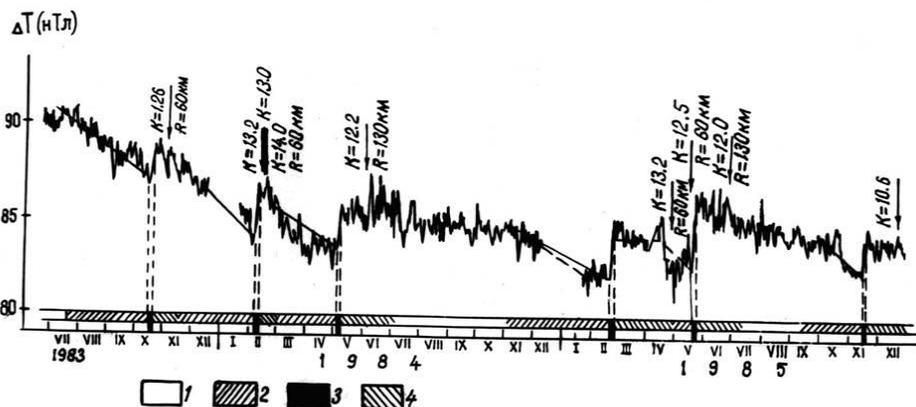


Рис. 11. Специфические ступенчатые предвестниковые аномалии геомагнитного поля, наблюдавшиеся на ст. Чартак в 1983-1985 гг.

Стрелками указаны моменты возникновения землетрясений, произошедших в Северной Фергане, с надписями соответствующего им энергетического класса (К) и эпицентрального расстояния (R)

Схема расположения стационарных геомагнитных прогностических станций Института Сейсмологии АН РУз и дифференциация наиболее часто регистрируемых форм среднепериодных предвестниковых аномалий на них приведены на рис.11. Как видно из рисунка, предвестниковые аномалии бухтообразной формы обнаруживаются на всех магнитометрических станциях Узбекистана, кроме ст. Чартак, Чаркесар и Коканд. Последние, находящиеся в Центральной и Северной частях Ферганской долины, расположены в геолого - тектоническом отношении на окраине Чаткало – Кураминского блока над массивами коренных пород. Необходимо отметить, что на станции Хумсан, расположенной в северо-восточной части Чаткало-Кураминского блока, наблюдаются предвестниковые аномалии землетрясений как бухтообразной, так и специфической ступенчатой формы.

На практике наиболее часто, в 36 случаях, землетрясениям предшествуют среднепериодные бухтообразные аномалии. Это обстоятельство позволило определить эмпирическую зависимость длительности времени проявления предвестника от силы землетрясения в виде $\lg \Delta T_a = 0,27M + 0,84$ при $r = 0,83$ [10] (рис. 12). Эта эмпирическая зависимость более 30-ти лет успешно используется в прогнозировании землетрясений, позволяя при этом определить силу предстоящего землетрясения с погрешность $\sigma = \pm 0,2M$.

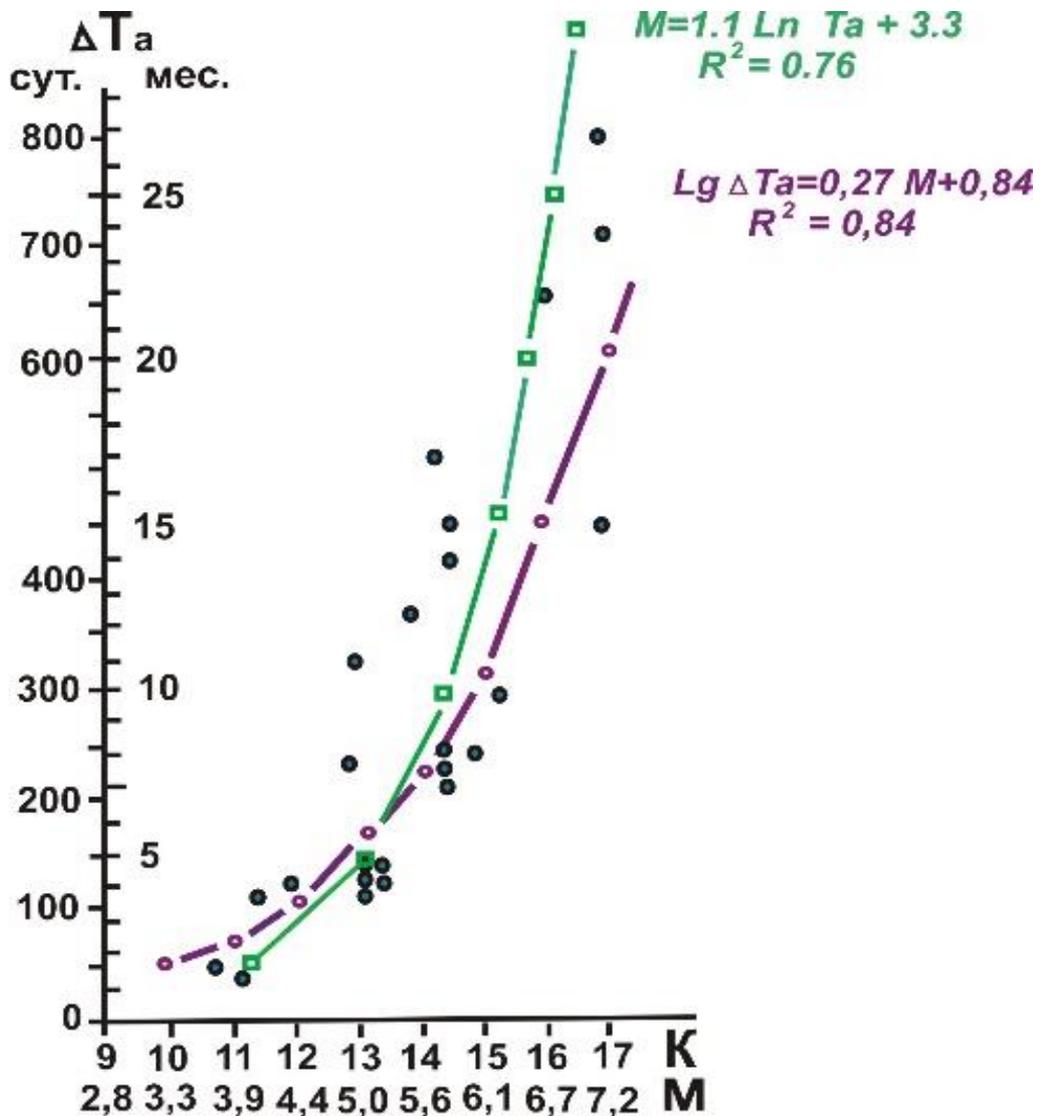


Рис. 12. Зависимость длительности времени проявления предвестника от силы землетрясения [10]

При определении места возникновения прогнозируемого землетрясения используются также зависимость дальности распространения предвестника от силы землетрясения $lgR=0,35M+0,04$, которая определена для Гармско-Душанбинского полигона в 1979 году [11] М.А.Садовским и др. и новая зависимость $lgR=0,201M + 1$, которая определена в 2014 году К.Н.Абдуллабековым и А.И.Туйчиевым (рис 13) [12]. В этих зависимостях среда распространения предвестника принимается как однородная. На практике геологическая среда, по которой распространяется предвестниковый сигнал, сильно разнородная от места к месту, в одном случае геологическая среда благоприятствует распространению сигнала, а в другом - поглощает предвестниковый сигнал. Вышеприведенные и другие часто используемые

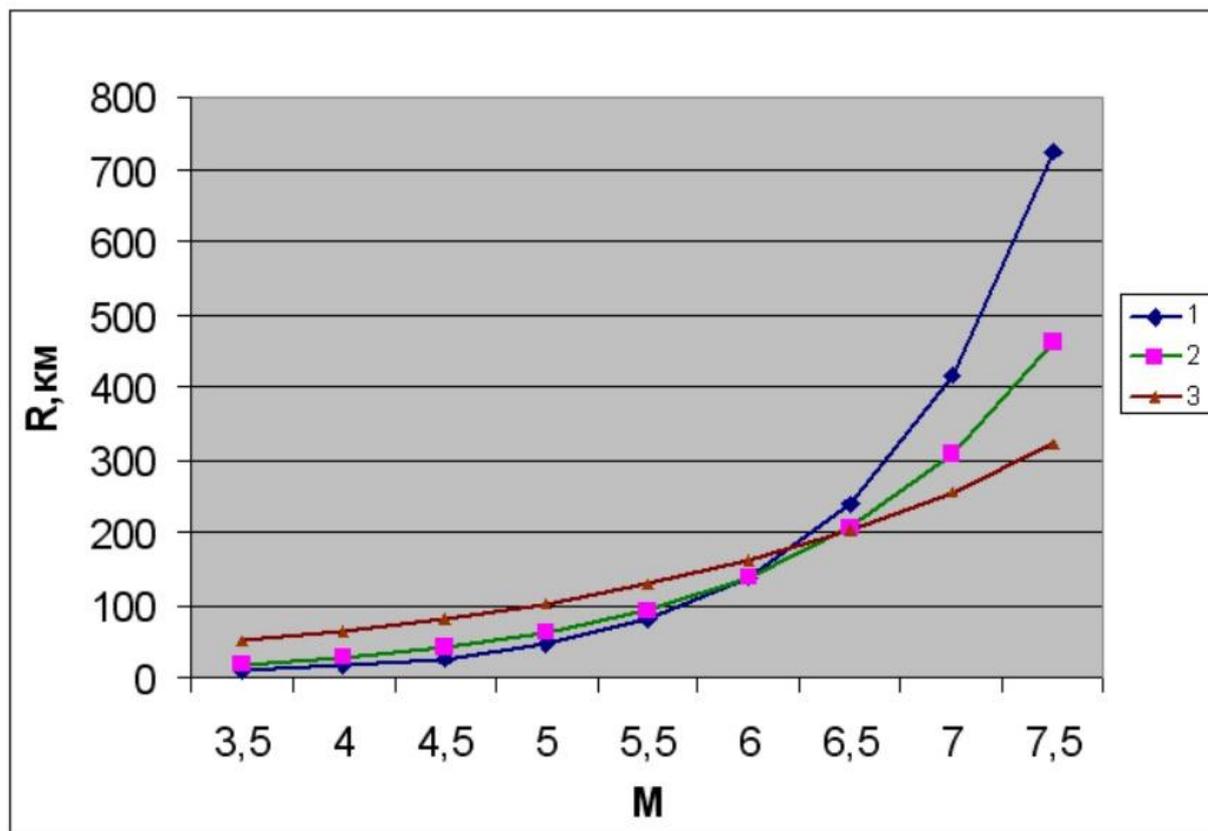


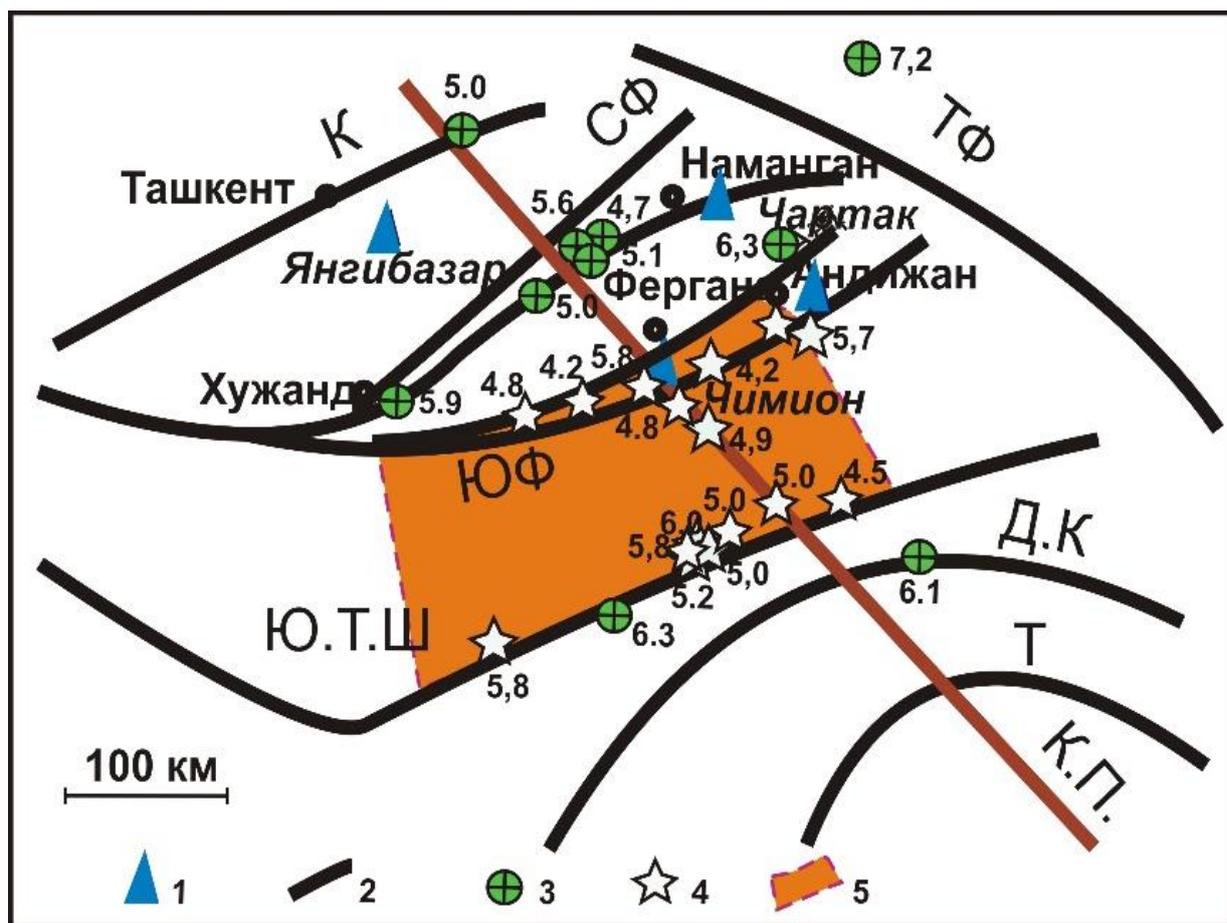
Рис.13. Зависимости дальности распространения предвестника от силы землетрясения

1. $lgR=0,48M-0,74$
2. $lgR=0,35M+0,04$ [13]
3. $lgR=0,201M+1$ [12]

зависимости, например, кратность размера очага по В.И. Уломову [13] (1977), $R=e^M$ по И.П.Добровольскому [14] и другие можно использовать при оценке силы и места возникновения землетрясения приблизительно, в случае отсутствия других оценочных факторов или критериев для конкретных прогностических станций.

Геомагнитный предвестник не распространяется в виде аномалии магнитного поля от очага готовящегося землетрясения к пункту наблюдения, а возбуждается изменением поля тектонических напряжений в нижних слоях земной коры ($h=6-50$ км) непосредственно под участком регистрации предвестниковой аномалии. К примеру, на рис.14 приведена зона чувствительности среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений $M \geq 4,5$ для Чимионской станции. Как видно из рис.14, станция Чимион регистрирует предвестниковые сигналы только от землетрясений с $M \geq 4,5$ внутри блока, ограниченного Южно-Ферганским разломом и одноименной флексурно-разрывной зоной с севера и Южно-Тянь-Шанским разломом с юга. Имеющийся многолетний материал не позволяет точно установить Восточную и

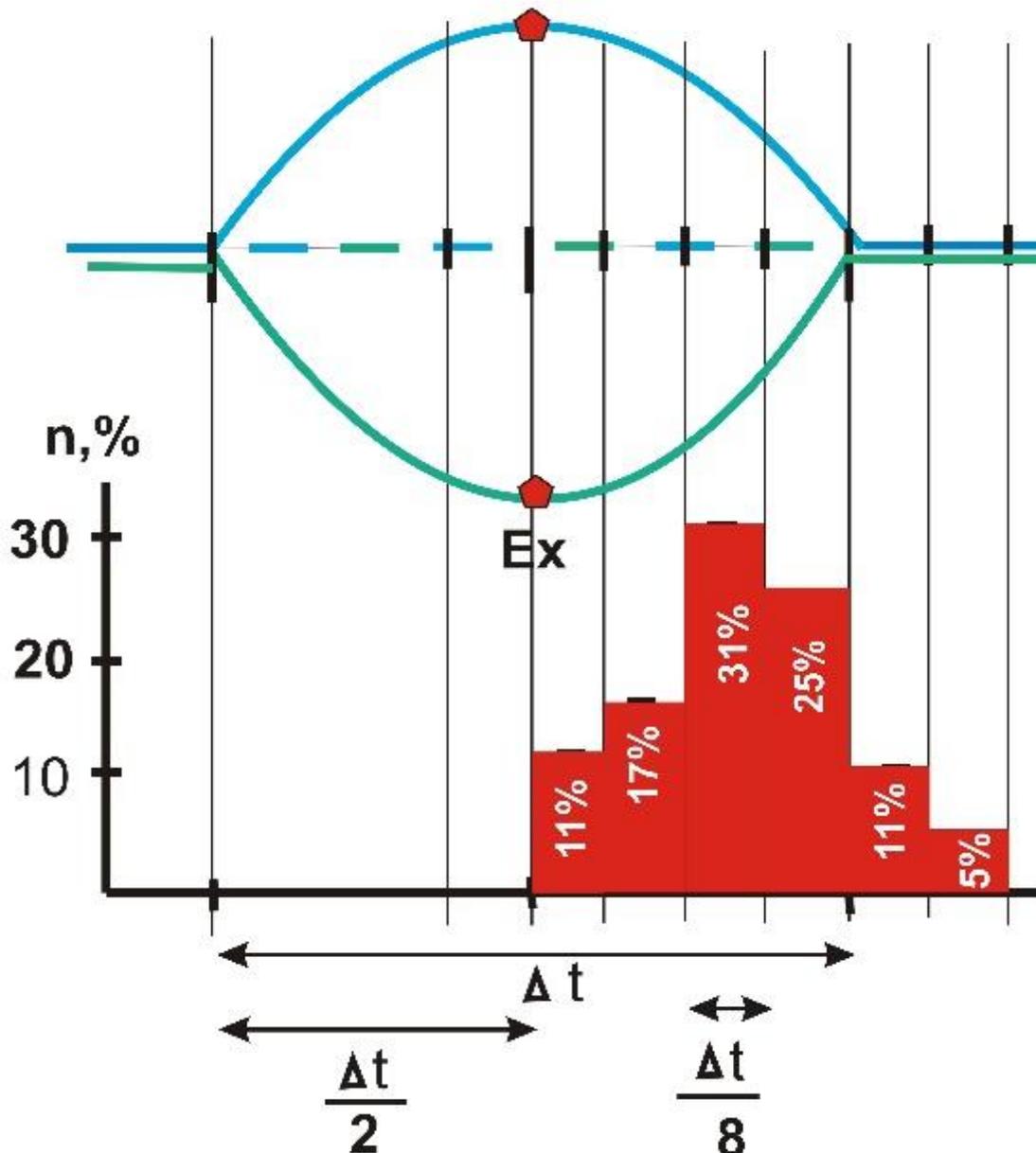
Западную границы этого блока. Из рисунка 14 так же можно легко определить значимую чувствительность этой станции на землетрясения, возникающие в зонах динамического влияния активизированных разломов и пересекающего их Кумбель-Памирского регионального линейamenta. Предвестники внутривлачных и мелких ($M \leq 4.5$) землетрясений не чувствуются ст. Чимион (иногда и другими магнитометрическими прогностическими станциями) или чувствуются в редких случаях в зависимости от пространственного расположения очага землетрясения относительно станции наблюдений. Многолетняя статистика, полученная от прогностических станций, показывает, что для того, чтобы возбудить предвестниковый сигнал на поверхности земли с вероятностью $r \geq 0,5$, необходимо землетрясение с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$) и выше. Интересно отметить, что энергетический порог чувствительности среднепериодных предвестниковых аномалий бухтообразной формы $K \geq 12$, является порогом чувствительности так же предвестниковых аномалий формы «специфической ступени», часто отмечаемых в Северной Фергане (рис. 1).



Условные обозначения: 1-магнитометрическая станция (МПП-1); 2 – региональные разломы, флексурно - разрывные зоны: - ТФ - Таласо - Ферганский; КП - отрезок Кумбель - Коканд - Памирского разломов; К- Каржантауский; СФ - Северо-Ферганский; СФф.р.з- Северо - Ферганская флексурно-разрывная зона; ЮФф.р.з.- Южно - Ферганская флексурно-разрывная зона; ЮФ - Южно - Ферганский; ЮТ - Южно - Тянь-Шаньский; Дарбаз-каракульский; Т-Тальдисуйский. 3.- эпицентры землетрясений с указанием силы, от которых не зарегистрированы предвестники; 4- эпицентры землетрясений с указанием силы, от которых зарегистрированы предвестники; 5- зона чувствительности среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений Чимионской станции по материалам 1981-1992 и 2009-2021 гг.

Рис.14. Зона чувствительности среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений $M \geq 4.5$ Чимионской станции

По вышеотмеченным 36 случаям так же установлено вероятное время возникновения землетрясения (в %) в зависимости от стадии развития предвестникового аномального хода (рис.15)



Условные обозначения: Пятиугольник - экстремум (Ex) положительной или отрицательной предвестниковой аномалии; Δt - длительность проявления предвестниковой аномалии

Рис.15. Вероятное время возникновения землетрясения в зависимости от стадии развития среднепериодной бухтообразной геомагнитной предвестниковой аномалии (из 36 случаев в процентах).

Как видно из рис.15, до достижения экстремального значения предвестникового хода землетрясение не происходит. После смены знака вероятность времени возникновения землетрясения увеличивается ближе к завершению аномального хода, особенно во второй ее половине, т.е. в третьей и четвертой четверти восстановительного периода (31% + 25% = 56%). Значит по бухтообразным аномалиям можно прогнозировать момент землетрясения с точностью, в среднем, соизмеримой с половиной длительности всего периода аномальных проявле-

ний. Этот показатель для среднепериодных составляет от нескольких месяцев до года. Необходимо отметить, что появление короткопериодной аномалии в завершающейся стадии среднепериодных аномалий существенно повысит точность прогнозирования времени землетрясения. Природа отмеченных среднепериодных предвестников при землетрясениях связана с деформационными процессами между блоками земной коры (особенно межблочная среда). Изменение напряженно-деформированного состояния, в свою очередь, приводит к изменению физических свойств горных пород, что вызывает предвестниковые вариации геомагнитного поля [15]. Схожесть форм наблюдаемых бухтообразных предвестниковых аномалий магнитного поля и приращения упругой потенциальной энергии в моделях подготовки тектонического землетрясения [14] лишней раз указывает на то, что источниками среднепериодных предвестниковых аномалий магнитного поля являются именно изменения упругой потенциальной энергии в процессе подготовки тектонического землетрясения.

Опыт предыдущих исследований показывает, что не все бухтообразные аномалии являются предвестниками землетрясений. Примерно в 15 % случаях аномалии не были вызваны конкретным землетрясением в зоне чувствительности прогностической станции. Необходимо отметить, что не все землетрясения, удовлетворяющие принятым нами условиям, могут вызвать предвестниковую аномалию. Статистика показывает, что примерно 15-20 % землетрясений, возникающих в зоне чувствительности прогностических станций, происходит бесследно, не вызывая значимых предвестниковых аномалий в геомагнитном поле. Причиной отсутствия предвестника может быть несоответствие ранее принятым нами «условий» или недостаток точности наблюдений и методики обработки данных.

Относительно низкую чувствительность (15%) к геодинамическим процессам имеют станции, находящиеся вблизи активизированных разломов и установленные непосредственно над массивами коренных пород (ст. Ташата, Шахмардан, Чаркесар, Коканд и Каратепо) [16,17] (рис.1).

Примерно в 12% случаях не были выявлены аномалии, связанные с геодинамическими процессами. В этих случаях пункты наблюдения располагались внутри блоков земной коры на некотором удалении от активизированных разломов (обс. Ягибазар и ст. Хаватаг) или станции функционировали непродолжительное время, в течение которого в зоне их чувствительности не отмечались значимые геодинамические процессы (ст. Ангрен и Яллама). [16,17] (Рис.1).

Выводы:

На основе 50-летних исследований проанализированы особенности проявления аномальных вариаций геомагнитного поля в сейсмоактивных районах Узбекистана. Отмечены аномальные вариации геомагнитного поля, обусловленные техногенными и естественными процессами.

Аномальные вариации геомагнитного поля, предшествующие сильным землетрясениям, преимущественно отмечаются в зонах динамического влияния активизированных разломов, ограничивающих различного ранга блоки земной коры. Большинство среднепериодных магнитных предвестников образуются на месте регистрации вариаций магнитного поля на глубинах 6-40 км.

Проявления среднепериодных геомагнитных предвестниковых аномалий связаны с изменением поля тектонических напряжений среды, где установлен регистратор предвестника. В процессе подготовки землетрясений меняются геометрические и физические параметры среды, и они, в свою очередь, приводят к изменению омического сопротивления и, соответственно, магнитного поля на поверхности земли.

Анализ многолетних геомагнитных исследований и полученные результаты могут быть успешно применены в практическом прогнозировании землетрясений, а также для оптимизации сети прогностических наблюдений.

Литература

1. Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х. Вариации геомагнитного поля сейсмоактивных районов. «Фан», Ташкент, 1975, 127 с.
2. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Коллектив «Фан», Ташкент, 1983, 135 с.
3. Абдуллабеков К.Н., Султанходжаев А.Н. Геохимические и геофизические предвестники Назарбекского землетрясения 11 декабря 1980г. // Узбекский геологический журнал. 1982, №5, стр.33-39.
4. Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Туйчиев А.И. Результаты многолетних исследований аномальных вариаций геомагнитного поля, обусловленных сейсмогеодинамическими и техногенными процессами. Геология и минеральные ресурсы. 2016, №4, стр.56-60.
5. Абдуллабеков К.Н., Султанбеков Р.И. О роли электрокинетических явлений в возникновении некоторых локальных изменений геомагнитного поля. // Районирование сейсмической опасности и поиски предвестников землетрясений. Изд-во "ФАН" АН УзССР, Ташкент, 1978, стр.60-67.
6. Абдуллабеков К.Н. Электромагнитные явления в земной коре. «Фан», Ташкент, 1989. 132с.
7. Муминов М.Ю., Абдуллабеков К.Н., Шапиро В.А. Предварительные результаты геомагнитных исследований на Ферганском геодинамическом полигоне. Узбекский геологический журнал. 1979, №2, стр.26-29.
8. Муминов М.Ю. Особенности формирования и распространения геомагнитных предвестников землетрясений. Геология и минеральные ресурсы. 2012, №1, стр 33-39
9. Муминов М.Ю., Шапиро В.А., Хаджиев Т.Х., Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Трапезников Ю.А. Пространственно-временные изменения магнитного поля в Восточной Фергане – отражение динамики сейсмотектонического процесса региона. ДАН СССР, 1991, Т.316, № 4, стр.879-883
10. Муминов М.Ю. Пространственно-временные особенности проявления сейсмомагнитного эффекта в Узбекистане и их использование в прогнозировании землетрясений. Автореферат диссертации канд. физ-мат наук. Ташкент, 1990. с.18
11. Садовский М.А., Негматуллаев С.Х., Нерсесов И.А., Сквородкин Ю.П. Тектономагнитные исследования на Душанбинском и Гармском полигонах ДАН СССР - 1979 - Т. 249. 2. (стр. 326-328.)
12. Абдуллабеков К.Н., Туйчиев А.И. Особенности проявления предвестников землетрясений с расстоянием. // Геология и минеральные ресурсы-2015.-№6.-С.36-40.)
13. Уломов В.И. Методика поиска прогностических признаков землетрясений. // Информ. сообщ.- АН УзССР № 186.-Т.: Фан, 1977.- 11
14. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. –М 1991, С.217.
15. Муминов М.Ю., Шоякубова М. Возможности прогнозирования времени возникновения землетрясений магнитометрическими методами Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии. Посвящается 150 летию Ташкентской научно- исследовательской геофизической обсерватории. 15-16 октября 2018 г., г.Ташкент, Узбекистан.2018.Ташкент с. 112-115.
16. Муминов М.Ю. Типизация геомагнитных предвестников землетрясений. Сб.Проблемы сейсмологии в Узбекистане. Т. ИС АН РУз, №9,2012, с.26-35.
17. Муминов М.Ю., Расулов Д.Х., Киргизбаев С.Б. Возможные источники образования аномальных вариаций геомагнитного поля при землетрясениях. ЎЗМУ хабарлари. Тошкент. "Университет". 2016., 3/1. с.171-175 .

SEYSMOTEKTONIKA VA GEODINAMIKA

УДК 550.34

Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А.

Институт сейсмологии АН РУз, Республика Узбекистан, atabekovi@mail.ru

КИНЕМАТИКА БЛОКОВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Sodiqov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A.

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Seismologiya instituti.

Matematik modellashtirish natijalari bo'yicha g'arbiy Tyan-Shanning yuqori qobig'idagi bloklarning kinematikasi

Annotatsiya. Seysmik faol yoriqlarni hisobga olgan holda, g'arbiy Tyan-Shan hududida yer po'stining yuqori qismining stress holati va geodinamikasini tahlil qilish maqsadida plastik asosda joylashgan og'ir vaznli bir jinsli elastik prizmalar asosida qurilgan matematik model yaratildi. Negotektonik harakatlarning faol yoriqlari va amplitudalarini hisobga olgan holda Farg'ona havzasi uchun hisoblab chiqilgan model, geologik-geofizik va seysmotektonik ma'lumotlardan aniqlangan bloklarning fazoviy holati va o'lchamlari jihatidan yaqin. Harakat vektorlari yo'nalishining o'rta qiyamatlari bo'yicha Farg'ona havzasi bloklarga bo'lindi. Bloklarning chegaralari tektonik zo'riqishlarning konsentratsiyasi zonalari sifatida qabul qilindi va vektorlarning yo'nalishlari orasidagi farqlanish burchagi bloklardagi kuchlanish darajasini tahmin qilishga imkon berdi.

Kalit so'zlar: g'arbiy Tyan-Shan; matematik model; kuchlanish; neotektonik harakat.

Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А.

Институт сейсмологии АН РУз, Республика Узбекистан

Кинематика блоков верхней части земной коры западного тянь-шаня по результатам математического моделирования

Аннотация. Для анализа напряженного состояния и геодинамики верхней части земной коры территории Западного Тянь-Шаня с учетом сейсмоактивных разломов построена математическая модель на основе упругих весомых кусочно-однородных призм, которые покоятся на пластическом основании. Рассчитанная на ее основе с учетом активных разломов и амплитуд неотектонических движений модель для Ферганской впадины близка по пространственному положению и размерам блокам, выделенным по геолого-геофизическим и сейсотектоническим данным. По усредненным значениям направления векторов движений Ферганская впадина разделена на блоки. Границы блоков принимаются зонами наибольшей концентрации тектонических напряжений, а угол расхождения между направлениями векторов позволяет оценить степень напряженности блоков.

Ключевые слова: Западный Тянь-Шань; математическая модель; напряжение; неотектоническое движения.

Sodiqov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A.

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

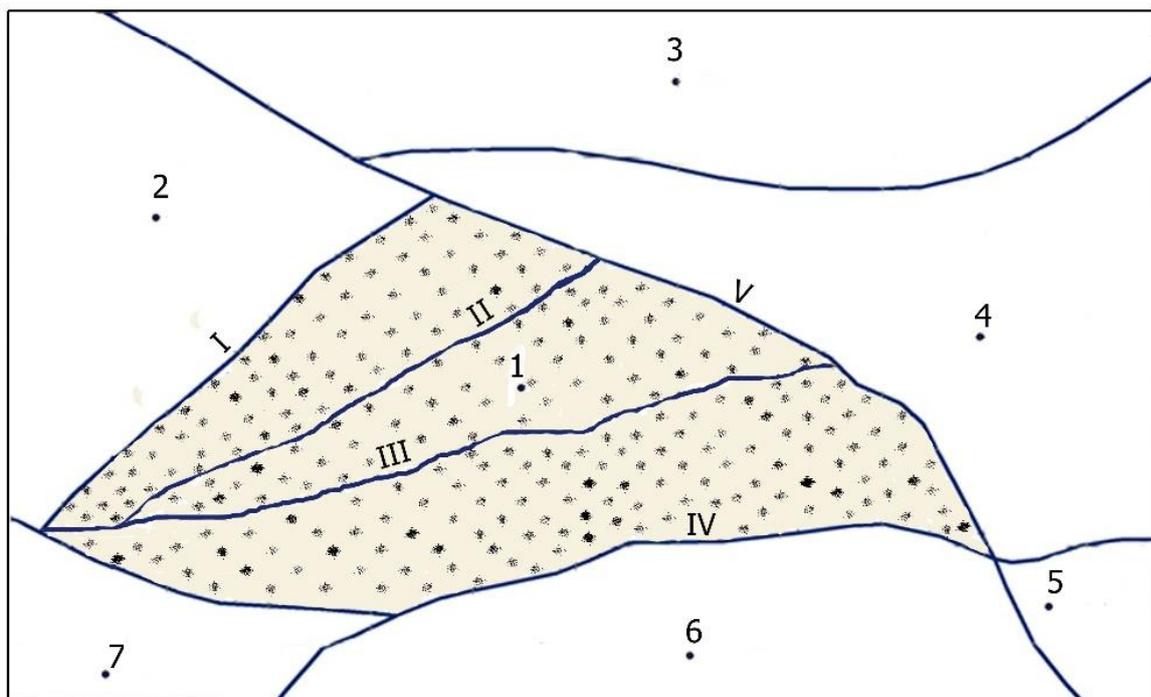
Kinematics of blocks in the upper crust of the western tian-shan by the results of mathematical modeling

Annotation. To analyze the stress state and geodynamics of the upper part of the earth's crust in the territory of the Western Tien Shan, taking into account seismically active faults, a mathematical model was built on the basis of elastic weighty piecewise-homogeneous prisms, which rest on a plastic foundation. The model calculated on its basis for the Fergana Basin, taking into account active faults and amplitudes of neotectonic movements, is close, in terms of the spatial position and sizes of blocks identified from geological-geophysical and seismotectonic data. According to the averaged values of the direction of the motion vectors, the Fergana depression is divided into blocks. The boundaries of the blocks are taken by the zones of the highest concentration of tectonic stresses, and the angle of divergence between the directions of the vectors makes it possible to estimate the degree of tension in the blocks.

Key words: Western Tien Shan; mathematical model; voltage; neotectonic movement.

В настоящее время актуальными задачами сейсотектоники и сейсмогеодинамики являются ряд следующих задач: изучение разного ранга блоков земной коры и их ограничивающих разломов, ответственных за генерацию сильных землетрясений; оценка напряженно-деформированного состояния этих блоков, обуславливающего характер взаимодействия между

ними; прогноз вероятного механизма очагов сильных землетрясений. В качестве объекта для решения отдельных из вышеназванных задач, нами выбрана территория Западного Тянь-Шаня. Сейсмически активные разломы Западного Тянь-Шаня изучены достаточно хорошо [1.2]. Механизмы очагов землетрясений Западного Тянь-Шаня и прилегающих регионов, в целом, согласуются с сейсмотектоникой и сейсмогеодинамикой исследуемого района [2]. Перечислим некоторые особенности напряженного состояния рассматриваемой территории во взаимосвязи с ее окружением. Установлено, что для Южного Тянь-Шаня преобладает горизонтальное сжатие, ориентированное вкрест простирания структур [3]. В системе блоковых перемещений в Памире и Тянь-Шане преобладающими движениями являются взбросы и взбросо-сдвиги с углами падения 50° и 60° [4]. Развитие земной коры Северного и Южного Тянь-Шаня в фанерозое характеризуется неоднократной сменой субмеридионального сжатия и субмеридионального растяжения [5]. Для четвертичного и современного этапов определены суммарное поле напряжений, при котором ось сжатия ориентирована субмеридионально, а ось растяжения - субширотно, причем обе оси субгоризонтальны. Отмечается, что различия механизмов очагов сильных и слабых землетрясений, вероятно обусловлены тектоническими процессами



Условные обозначения: МП-микроплиты: 1 – Западно-Тянь-Шаньская; 2 – Сырдарьинская; 3 - Казахская; 4 – Центрально-Тянь-Шаньская; 5 – Таримская. Район исследования оттенён штриховкой; 6 – Памирская; 7 - Каракумо-Таджикская; Разрывные нарушения: I-Аксу-Майдантал-Боганалинские; II-Северо-Ферганский; III-Южно-Ферганский; IV-Гиссаро-Кокшаальский; V-Таласо-Ферганский.

Рис.1. Схема расположения микроплит в зоне коллизии сходящихся Евразийской и Индостанской тектонических плит.

и в большей степени отражают региональную составляющую современного поля напряжений. В районах Гиндукуша и Горного Бадахшана преобладает субгоризонтальное сжатие в субмеридиональном направлении [6]. Ось растяжения приближается к горизонтальному положению, что характерно для сдвиговой деформации. На Западном Памире главная ось сжатия ориентирована в субмеридиональном направлении, но ее угол с вертикалью составляет 40° - 50° . Для Южного Тянь-Шаня характерно, в целом, близгоризонтальное и субмеридиональное сжатие [7]. Для Чаткало-Кураминского региона такой согласованности в ориентации осей

напряжений не наблюдается. Здесь выделяются субмеридиональные, северо-восточные, субширотные и северо-западные ориентации. При землетрясениях 13.08.1958 г.; 28.05.1971 г. и 11.01.1974 г. преобладали растягивающие усилия. Это все свидетельствует о сложном характере взаимодействия внутриблочных структур, развивающихся в субмеридиональной ориентации сжимающих напряжений действующих в пределах Западного Тянь-Шаня. На основе изучения пространственного положения и относительного соотношения осей сжатия и растяжения землетрясений, произошедших в пределах Средней Азии с 1966 по 1986 гг., следует сделать вывод, что земная кора Средней Азии находится в условиях субмеридионального сжатия, и лишь в области сочленения Ферганского и Алайского хребтов наблюдаются растягивающие напряжения [7]. Похожие результаты имеются для Киргизской части Тянь-Шаня [8]. При этих условиях возникают подвижки надвигового и сдвиго-надвигового типа. Анализ сеймотектонической деформации (СТД) в интервале глубин 5-15 км показывает, что направление сжимающих напряжений в Северном Памире ориентировано в северо-западном направлении, тогда как на Алае оно ближе к субмеридиональному. СТД в Северном Памире имеют сдвиговый и транспрессивный взбросо-сдвиговый характер [9]. Таким образом, можно утверждать, что сеймотектонические движения на исследуемой территории происходят в поле одновременно действующих субмеридиональных и субгоризонтальных напряжений. Западный Тянь-Шань располагается в зоне коллизии Евразийской и Индостанской тектонических плит. К настоящему времени известны модели, основанные на принципах тектоники плит и характеризующие внутреннюю структуру зоны коллизии [10-13]. Общая схема микроплит в зоне коллизии Евразийской и Индостанской тектонических плит, их границы и направления движений приведены на рис.2. На этом рисунке район исследований располагается в центральной части и образует Западно-Тянь-Шаньскую микроплиту (ЗТШМП). С ней граничат Восточно-Тянь-Шаньская (ЦТШМП), Таримская (ТМП), Памирская (ПМП), расположенные в зоне коллизии, а также Каракумо-Таджикская (КТМП), Сырдарьинская (СМП), Казахская (КМП), образующие южную, приколлизийную часть Евразийской плиты. При формировании Ферганской впадины и ее горного обрамления решающую роль сыграли внешние (Таласо-Ферганский, Гиссаро-Кокшаальский глубинные разломы и система Аксу-Майдантал-Боганалинских разломов северо-восточного простирания) и внутренние - Северо-Ферганский и Южно-Ферганский разломы (рис.2). Наша цель составить математическую модель напряженного состояния верхней части земной коры ЗТШМП, которая может отражать вышеприведенные особенности региона, чтобы в дальнейшем с помощью составленной модели решать вопросы сейсмического районирования. Для этой цели использована модель напряженного состояния Центральной Азии, основанная на тезисе о том, что напряженное состояние земной коры Центральной Азии является последствием столкновения Евразийской плиты, с одной стороны, и, с другой, Индийской и Аравийской плит [10-13]. В этой модели использованы физические особенности Центральной Азии, такие как современный рельеф и глубина залегания поверхности Мохо, поскольку именно они дают представление о геодинамике земной коры. Также учтены расположения структурно-контролирующих, сейсмически активных разрывных нарушений. Математическая модель строилась на основе упругих весомых кусочно-однородных призм, на которые разделена земная кора, покоящихся на пластическом основании. Схемы математического моделирования напряженно-деформированного состояния на основе механики сплошных сред опубликованы в [14-17], и в этой связи мы сочли возможным их не приводить. Отметим только, что для рассматриваемой модели в качестве граничных условий выступают напряжения на границах Ферганской впадины, которые были получены ранее как напряжения во внутренних точках при решении задачи о напряженном состоянии Центрально-Азиатского региона. По результатам расчетов построено поле скоростей перемещения (рис.2).

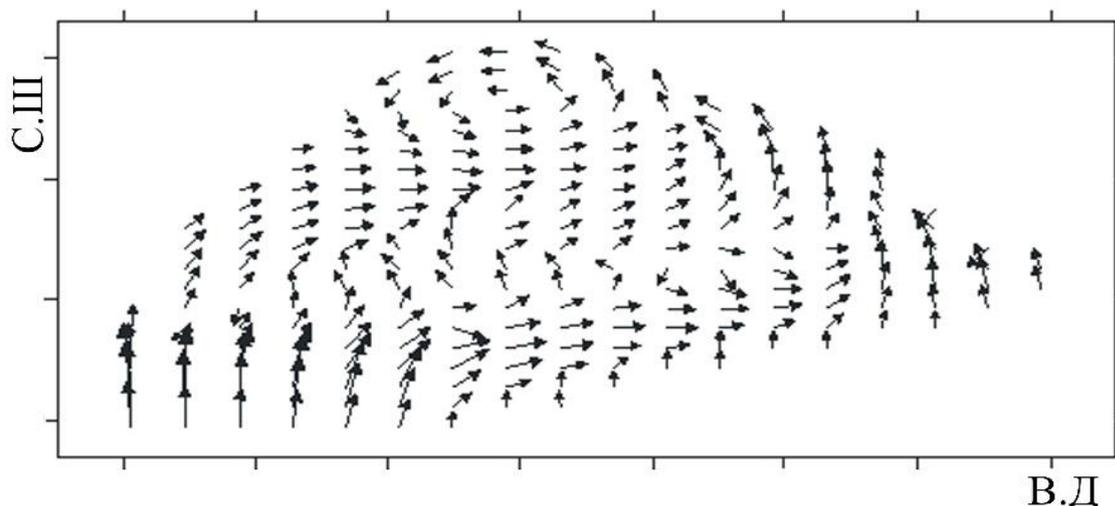


Рис. 2. Поле скоростей по результатам математической модели

Полученное поле скоростей сгруппировано по направлениям движения (рис.3). В результате исследуемая территория разделилась на несколько участков с характерным средним направлением движения. Сопоставление этого рисунка с комплексом геолого-геофизических материалов позволяет нам утверждать, что эти участки соответствуют реальным блокам верхней части земной коры ЗТШМП. Результаты численного решения также сопоставляются с очагами землетрясений по каталогу УНТЦ с 1902 по 2017 ($M \geq 3.0$) (рис. 4). Многие очаги располагаются по границам выделенных блоков. Из рисунка также следует, что наибольшим напряженным состоянием отличается южная внешняя граница ЗТШМП, соответствующая Гиссаро-Коокшальскому разлому. Необходимо отметить, что границы блоков, выделенных в результате моделирования, удовлетворительно согласуются с ранее выделенными сейсмически активными разломами (рис.4), и на этих границах локализуется основная часть эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ (Рис.3).

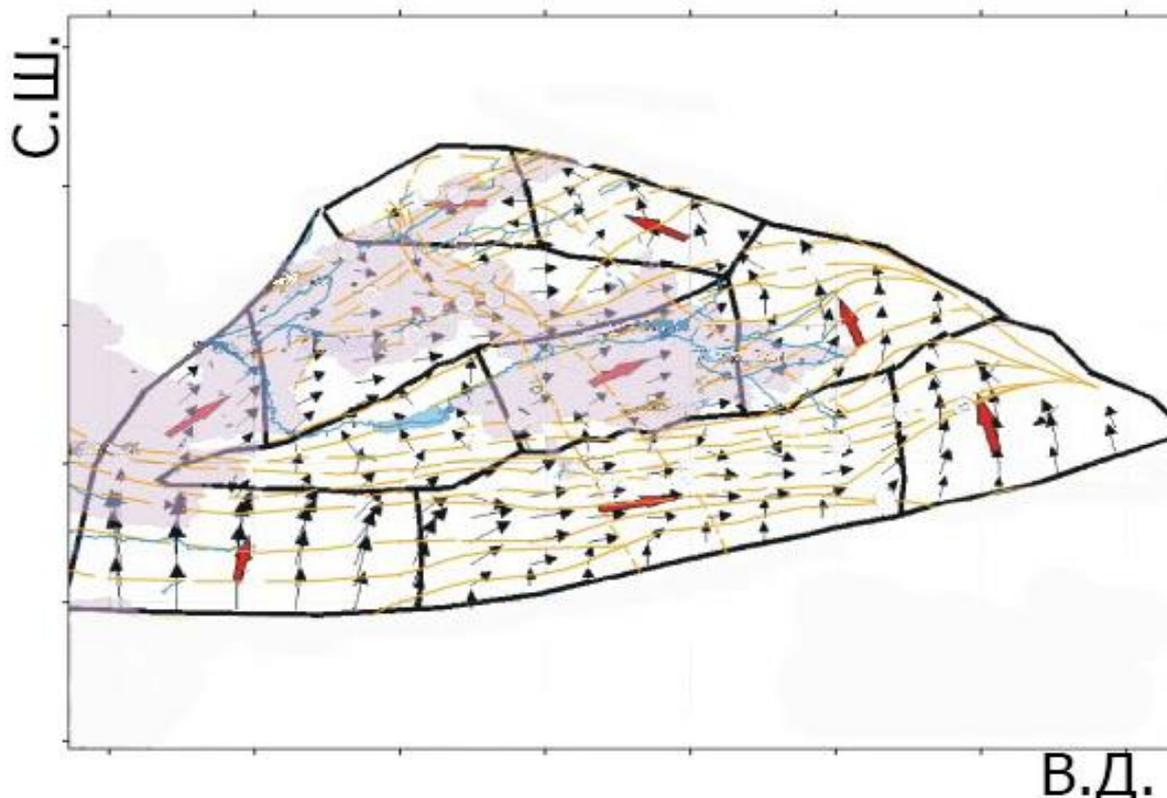


Рис.3. Блоки, различающиеся по направлению поля скоростей.

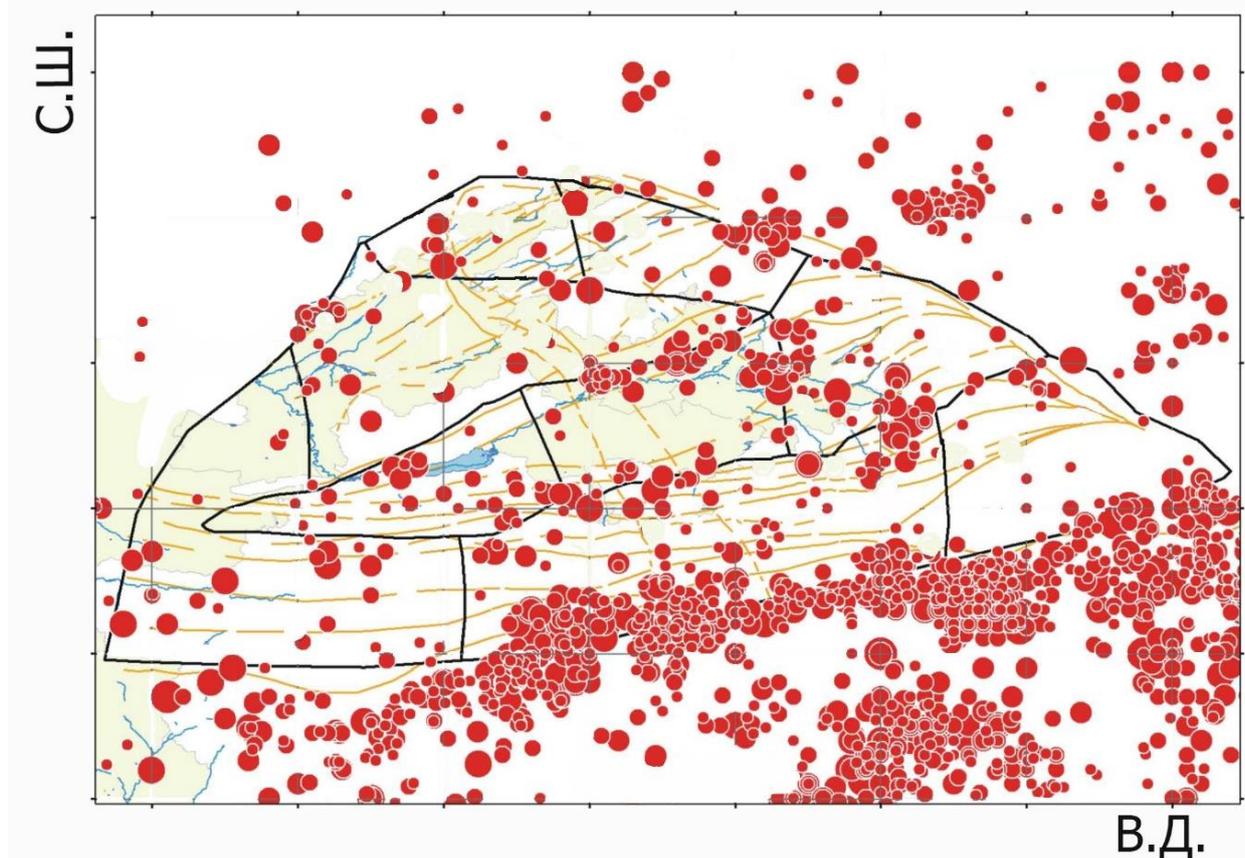


Рис. 4. Схема сопоставления эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ и блоков, сгруппированных по направлениям поля скоростей.

Известно, что по всей протяженности Гиссаро-Кокшаальского разлома, являющегося границей между Западно-Тянь-Шаньской, Каракумо-Таджикской и Памирской микролитами, и в зоне Таласо-Ферганского разлома, которая является границей между Западно-Тянь-Шаньской и Центрально-Тянь-Шаньской микролитами, преобладают сжимающие напряжения. В отличие от этого внутри ЗТШМП распределение напряжений достаточно разнообразное. Блоки ЗТШМП имеют более высокую прочность и эффективную упругую жесткость в сравнении с разломными зонами, а разломные зоны выполняют также роль места сброса энергии накопленных деформаций. Большая часть сил внешнего воздействия в пределах ЗТШМП расходуется во внутренних сейсмоактивных разломных зонах. В отличие от этого, в ЦТШМП основная часть энергии высвобождается в ее граничных зонах. Далее мы сопоставили границы блоков, выделенных по результатам математического моделирования, с границами блоков, выделенных по материалам комплекса геолого-геофизических, сеймотектонических, неотектонических и современных вертикальных тектонических движений, глубинного строения, дешифрирования космофотоснимков (рис.5).

Если учесть, что границы блоков по геолого-геофизическим данным обусловлены активными разломами и указывают выход разломов на дневную поверхность, а границы векторных полей, выделенные на основе моделирования, носят усредненный характер, то наблюдаемые расхождения вполне допустимы. Границы блоков принимаются зонами наибольшей концентрации тектонических напряжений, а угол расхождения между векторами, хотя и качественно, позволяет оценить степень напряженности. Чем больше угол расхождения векторных полей, тем больше вероятность повышенных тектонических напряжений. Согласованность направления движения блоков с региональным полем тектонических напряжений, создаваемым коллизией Индостанской и Азиатской плит, вполне логична. Направления векторов, несогласных с региональным полем напряжений, требуют более детального анализа.

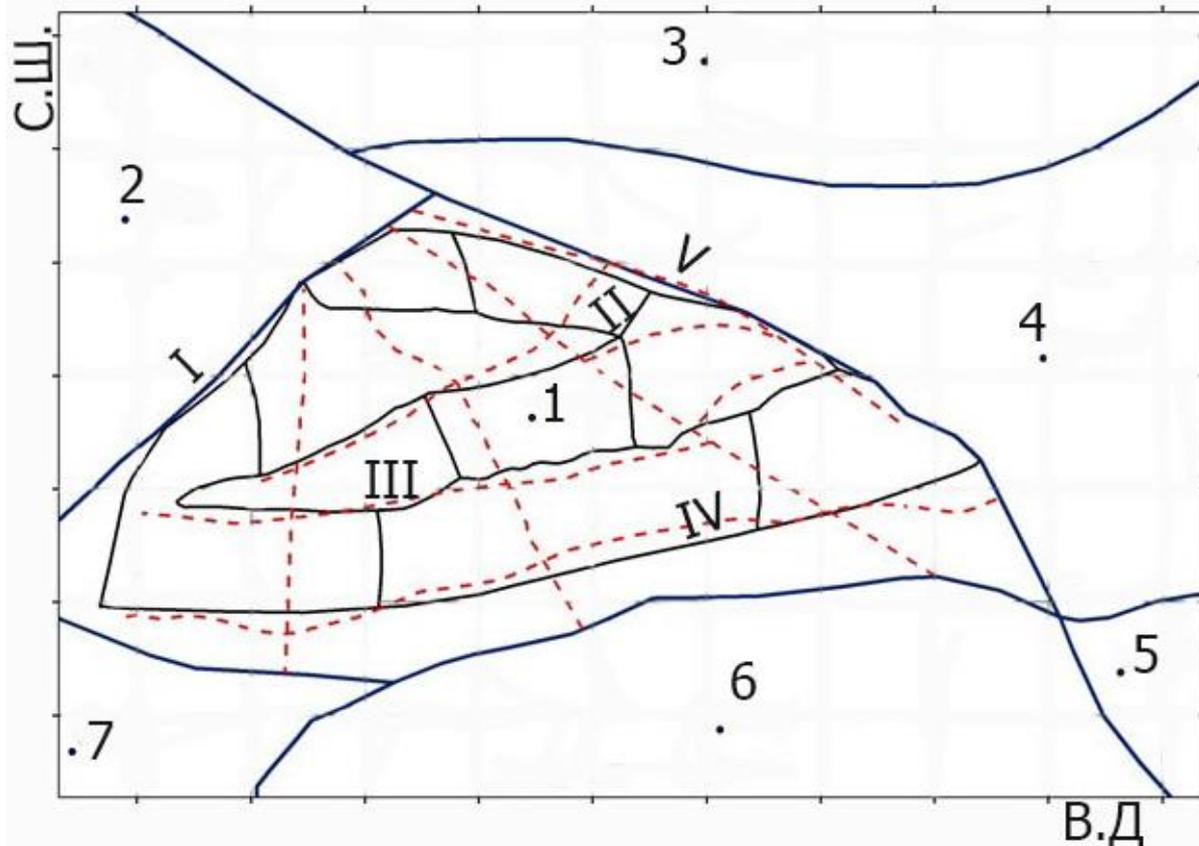


Рис.5. Схема сопоставления границ блоков, выделенных по геолого-геофизическим данным (красные линии), и векторным полям (линии черного цвета).

Заключение.1. Для анализа движения верхней части земной коры ЗТШМП, с учетом сейсмоактивных разломов, использована математическая модель на основе упругих весомых кусочно-однородных призм, которые покоятся на пластическом основании. Рассчитанная на ее основе модель для Ферганской впадины, с учетом активных разломов и амплитуд неотектонических движений, близка по пространственному положению и размерам блокам, выделенным по геолого-геофизическим и сеймотектоническим данным. Границы блоков соответствуют зонам наибольшей концентрации тектонических напряжений. Направления векторов в среднем совпадают с направлениями движения блоков, а угол расхождения между векторами качественно позволяет оценить степень напряженности. Чем больше угол расхождения, тем больше напряженность на границе блоков.

2. В реалии основной причиной разнообразия поля напряжений блоков ЗТШМП является раздробленность его разломами. Чередование разнонаправленных осей напряжений блоков свидетельствует об определяющей роли зон разломов в процессе перераспределения напряжений.

3. Схема векторов движений позволяет также провести предварительный анализ исследуемой территории по направлениям движений и выделенных на этой основе блоков ЗТШМП. Согласованность направления движений блоков с региональным полем тектонических напряжений, создаваемых коллизией Индостанской и Евразийской плит, вполне объяснима. Направления векторов, несогласных с региональным полем напряжений, требуют более детального анализа.

4. Значительная часть сил внешнего воздействия в пределах ЗТШМП расходуется во внутренних сейсмически активных разломах. В ВТШМП основная часть энергии высвобождается в ее граничных зонах.

5. Результаты исследования позволяют качественно оценить степень напряженности и вероятный механизм подвижек в зонах разломов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (гранты № **ФА-Ф8-006**).

Благодарности. Авторы благодарят Шукурова З. и Равшанова Н. за оказанную помощь при подготовке графических материалов.

Литература

1. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 312с.
2. Далимов Т.Н., Троицкий В.И. Эволюционная геология. Ташкент: Университет, 2005. 504с.
3. Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. Ташкент, ФАН, 1978. 144с.
4. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования. М. Части 1,2,3 1: Научный мир, 2005, С.19-261.
5. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М., Недра, 1988, 492с.
6. Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Ходжаев А.К. К сейсмогеодинамике Западного Тянь-Шаня. Сборник докладов международной научной конференции. Ташкент. 2018, С.262-272.
7. Каталоги механизмов очагов землетрясений Средней Азии и Казахстана ($K \geq 10$) за 1979-1982гг. Душанбе: Дониш, 1981-1984гг.. ($K \geq 10$)
8. Широкова Е.И. О напряжениях, действующих в очагах землетрясений Средней Азии. Изв. АН СССР, сер. Геофиз., 1961, №6. С.876-881.
9. Балакина Л.М. Поле упругих напряжений Земли и механизмы очагов землетрясений. Сейсмология, №8, М.: Наука, 1972. 192с.
10. Крестников В.Н., Белоусов Т.П., Ермилин В.И. Четвертичная тектоника Памира и Тянь-Шаня. М.: Наука, 1979, 115с.
11. Юнга С.А. Напряженное состояние земной коры в Средней Азии. В кн. Современная динамика литосферы континентов. Подвижные пояса. М. Недра. 1995. С.354-362.
12. Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. Фан, Ташкент, 1987.
13. Кальметьева З.А. Сейсмичность: Пространственно-временное распределение, механизмы очагов и природа землетрясений. В кн. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования. М.: Научный мир, 2005, С.136-157.
14. Сычева Н.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня. Физика Земли. 2005, №11, с.62-78.
15. Атабеков И.У. Математическая модель тектонических течений в литосфере Центральной Азии. Проблемы сейсмологии, 2019, №1 стр. 24-33.
16. Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А., Кузиев Ф.Н. Особенности современной геодинамики области взаимодействия Туранской эпипалеозойской плиты и западной части эпиплатформенного орогена Тянь-Шаня. Проблемы сейсмологии, 2019 №1, стр. 33-40.
17. Atabekov I., Earth Core's stresses variation in Central Asian earthquake's region. // Geodesy and Geodynamics, Volume 11, Issue 4, 2020. pp.293-299, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.12.005>.
18. Атабеков И.У. Опыт моделирования сейсмотектонического течения земной коры Центральной Азии. // Физика Земли. 2021. №1. с.122-132 DOI: 10.31857/S0002333721010014 [Atabekov I.U. Experience of Modeling the Seismotectonic Flow of the Earth's Crust in Central Asia. // IZVESTIYA, Physics of the Solid Earth. 2021. vol. 57. № 1. pp.110-119 DOI: 10.1134/S1069351321010018]

Атабаев Д.Х., Гоипов А.Б., Атабаев Б.Д.

Национальный Университет Узбекистана, г.Ташкент, Республика Узбекистан

ГЛУБИННАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЮЖНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ (Западный Узбекистан)

Otabaev D.X., G'oirov A.B., Otaboiev B.D.

O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent sh., O'zbekiston Respublikasi

Janubiy Tyan-Shanning chuqur geologo-geofizik modeli (g'arbiy O'zbekiston)

Аннотация: Мақоллада janubiy Tyan-Shan hududini kesib o'tuvchi, kenglik yig'ilishi bo'yicha zilzilalarning to'liqlar almashinuv usuli bo'yicha mintaqaviy seismolog tadqiqotchilar natijalari keltirilgan. Aniqlangan mintaqaviy chuqur yer yoriqlari malum bo'lgan madaniy konlarni chuqurlikda hosil bo'lishini o'rganishda va bir qator yangi madaniy ob'ektlarni izlab topishda muhim ahamiyatga ega.

Калит so'zlar. Tyan-Shan, model, yer yorig'i, ZTAU, ChSZ, MTZ, ma'dan konlari, yer qobig'i.

Атабаев Д.Х., Гоипов А.Б., Атабаев Б.Д.

Национальный Университет Узбекистана, г.Ташкент, Республика Узбекистан

Глубинная геолого-геофизическая модель южного Тянь-Шаня (западный Узбекистан)

Аннотация. В статье приведены результаты региональных сейсмологических исследований методом обменных волн землетрясений для территории, пересекающей Южный Тянь-Шань в широтном направлении. Выявленные региональные глубинные разломы имеют большое значение при изучении глубинного заложения известных рудных месторождений и поиске ряда новых рудных объектов.

Ключевые слова. Тянь-Шань, модель, разлом, МОБЗ, ГСЗ, МТЗ, рудных месторождений, земная кора.

Атабаев Д. Х., Гоиров А. В., Атабаев В. Д.

Deep geological and geophysical model of the southern tien shan (western Uzbekistan).

Annotation. The article presents the results of regional seismological works by the method of converted waves of earthquakes in the latitudinal direction, crossing the territory of the Southern Tien Shan. The identified regional deep faults are of great importance in the study of the deep location of known ore deposits and the search for a number of new ore objects.

Keywords. Tien Shan, model, fault, ECWM, DSS, MTS, ore deposits, crust.

Введение.

В пределах зоны сочленения Туранской плиты с орогенными сооружениями Южного Тянь-Шаня проведены широкомасштабные региональные сейсмологические работы методом обменных волн землетрясений (МОБЗ) по трем региональным профилям общей протяженностью 730,5 пог. км (профиль II-II приведен на рис. 1).

В задачу региональных работ МОБЗ входило: изучение морфологических черт рельефа, выявление плотностных и скоростных неоднородностей в земной коре и определение глубин залегания палеозойского фундамента, особенностей консолидированной коры и поверхности Мохоровичича [1-2]. Уделялось внимание и вопросам, связанным с разрывными нарушениями и вертикальными и горизонтальными перемещениями горных масс.

В данной статье обосновывается формирование земной коры Южного Тянь-Шаня через интерпретацию региональных геофизических профилей, проведенную разными авторами.

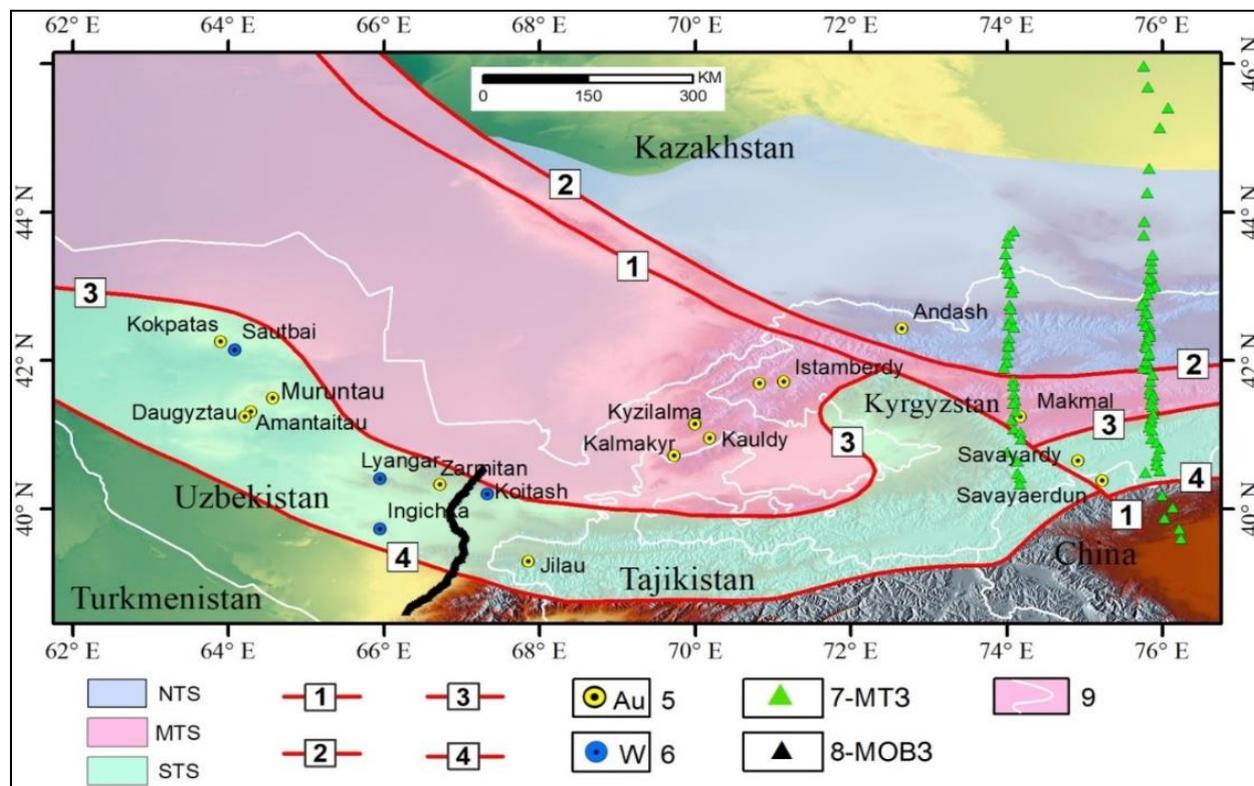
Методика работ.

Геодинамическими исследованиями Южного Тянь-Шаня на территории Республики Узбекистан в разное время занимались Т.Н.Далимов, Р.Н.Абдуллаев, М.А.Ахмеджанов, А.К.Бухарин [6], С.С.Шульц, Ю.С.Бискэ [4], В.С.Буртман [5], П.А.Мухин, Ш.Ш.Сабдюшев, Х.У.Узаков, В.В.Михайлов, Р.Х.Миркамалов и др [9].

Территория Южного Тянь-Шаня, известная в геологической литературе как складчатая система Южного Тянь-Шаня, занимает промежуточное положение между двумя жесткими массивами – Сырдарьинским на севере и Каракум-Таджикским на юге и образовалась на месте Туркестанского океана, раскрытого в Кызылкумском сегменте не позже 750 млн. лет [4].

Складчатая система Южного Тянь-Шаня простирается через Узбекистан, Таджикистан, Казахстан, Кыргызстан, Северный Китай и является одним из наиболее важных золоторудных поясов, в котором было обнаружено несколько месторождений мирового класса – сверхбольших и крупных. К ним относятся Мурунтау и Кальмакыр (Узбекистан), Кумтор (Кыргызстан), Даугызтау, Ауминзатау (Узбекистан) и Джилау (Таджикистан) [12], а также ряд вольфрамовых месторождений, таких как Койташ, Лянгар, Ингичка [13].

К полузакрытым и закрытым территориям Южного Тянь-Шаня относятся Центральный Кызылкумский и Нуратинский регионы, расположенные в Узбекистане, где выявленные рудные месторождения (золото, серебро, вольфрам и другие металлы) палеозойского структурного этажа обнажаются в горах Букантау, Тамдытау, Кульджуктау, Бельтау, Аристантау и Нуратау. На рис. 1 показаны части Южного Тянь-Шаня на территории Средней Азии.



Условные обозначения: NTS – Северный Тянь-Шань; CTS – Срединный Тянь-Шань; STS – Южный Тянь-Шань; 1 – Таласо-Ферганский сдвиговый разлом; 2 – Линия Николаева – Северо-Налатинский разлом; 3 – Ат-Башы-Инылчек-Южно-Налатский разлом; 4 – Северный Таримский разлом (на востоке) и Предкызылкумский разлом (на западе); 5 – крупные и средние золоторудные месторождения; 6 – вольфрамовые месторождения; 7 – пункты приема субмеридиональных профилей глубинного МТЗ через Тянь-Шань (74° и 76° в. д.) по данным Баталева и др., 2011 (глубинные разрезы по профилю МТЗ приведены на рис. 2); 8 – пункты приема МОВЗ регионального профиля II-II (Гузар-Учкулач) по данным Д.Х.Атабаева, 2012 (разрезы МОВЗ приведены на рис. 3); 9 – государственные границы

Рис. 1. Геодинамическое районирование Тянь-Шаньского орогенного пояса на территории Средней Азии (с изменениями по Lei et al., 2018 [12]; Миркамалов и др., 2019 [9]; Vo et al., 2020 [11]) и их пересекающие региональные геофизические профили.

Южный Тянь-Шань по всей его длине возник в среднем-позднем карбоне благодаря коллизии и покровно-надвиговой тектонике, прежде всего надвигом в южном направлении от края Казахстана (пояс Букантау-Кокшаал-Халыктау) [4]. Восточнее Таласо-Ферганского правостороннего сдвига общее северное направление сжатия со стороны Тарима вызвало поднятие Тянь-Шаня [3].

В позднем девоне и раннем карбоне максимальное раскрытие Туркестанского океана, вероятно, связано с плюмовой активностью [7]. Магматические флюиды мигрировали вверх и предоставили многочисленные рудообразующие металлы, такие как W и Mo [13].

Рудный потенциал Южного Тянь-Шаня повышает к себе интерес при изучении глубинного заложения формирования земной коры и ее тектонических элементов: глубинные разломы и надвиги, которые связаны с рудогенерирующими процессами.

В данном случае глубинными геофизическими методами являются глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), метод обменных волн землетрясений (МОВЗ) и глубинное магнитотеллурическое зондирование (МТЗ).

Выполнение региональных исследований для территории, пересекающей Южный Тянь-Шань в широтном направлении, было начато 50 лет назад методом ГСЗ, например: Фараб-Тамдыбулак, Термез-Алмалык и Карабекаул-Кайташ. Технология и чувствительность геофизических приборов на тот период времени значительно отличались от современных.

В последнее время в различных регионах мира проведены региональные геофизические исследования с применением современных приборов МТЗ и МОВЗ, которые определили границы и физические параметры отражающих зон субдукции и надвиговой тектоники земной коры.

Например, в результате работ, выполненных в Киргизском Тянь-Шане методом МТЗ по глубинным профилям вдоль меридианов 74° и 76° в.д., в разрезах земной коры выделены проводящие объекты, соответствующие ограничениям Ат-Башинской аккреционно-коллизии и Исык-Кульского микроконтинента (рис. 2) [3].

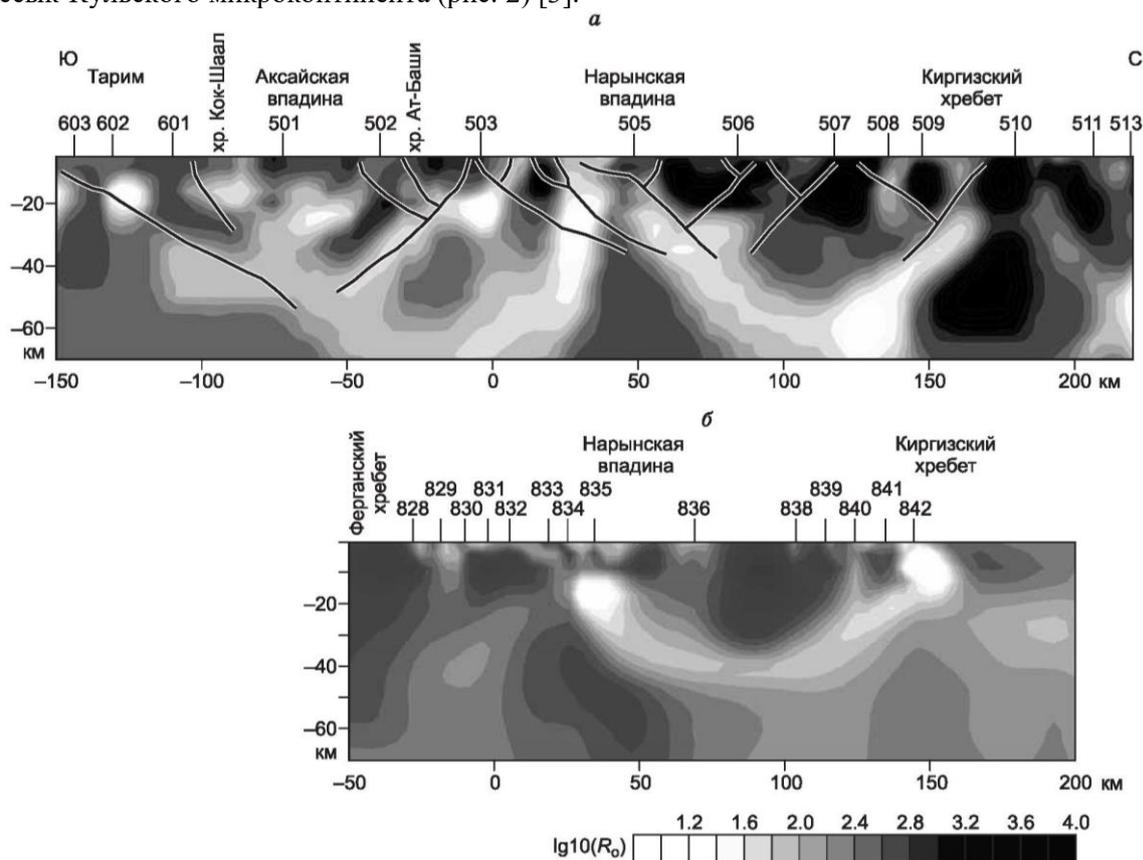


Рис.2. Сечение Исык-Кульского микроконтинента по данным глубинного магнитотеллурического зондирования по региональным профилям вдоль меридианов 76° в.д. (а) и 74° в.д. (б) (сопротивление в логарифмическом масштабе в $\text{ом}^*\text{м}$).

На рис.2 четко отображаются зоны субдукции по Киргизской территории Тянь-Шаня, с изменением сопротивлений на глубину, погружающихся до 60 км и более. Данная глубинная геодинамическая ситуация схожа с территорией Узбекского Тянь-Шаня, которая установлена проведенными сейсмологическими исследованиями методом МОВЗ.

Результаты и их обсуждение.

В последнее время для изучения земной коры и геодинамической обстановки Южного Тянь-Шаня на территории Республики Узбекистан авторами выполнялись глубинные геофизические исследования методом МОВЗ.

Так, профиль II-II простирается с юго-запада на северо-восток вдоль линии Гузар – Шахрисабз – Самарканд – Челак – Учкулач. Расстояние между пунктами приема составляет 2,5 км на профиле, расположенном в пересекающихся зонах Западного Тянь-Шаня (рис. 1 и рис. 2).

Профиль пересекает крупные тектонические единицы, такие как Кашкадарьинский прогиб, западные отроги Зеравшанского хребта, Зеравшанскую долину и горы Нуратау. Структурами высшего порядка в пределах Кашкадарьинской впадины являются Китабская синклиналь и Шуранское поднятие, которые, в свою очередь, подразделяются на ряд антиклинальных поднятий и синклинальных прогибов, а также меньшие по размерам структуры – локальные антиклинали. Далее на север профиль пересекает западные отроги Зеравшанского хребта по Китабскому перевалу, проходит по Зеравшанской впадине, пересекая одноименный глубинный разлом. В сегменте Нуратинских гор профиль проходит через Каракчитаускую антиклиналь, Чакарскую синклиналь и осевую часть Нуратинского хребта в районе перевала Саурбель и Ханбандытаг. На временном и глубинном сейсмогеологическом разрезе (рис. 3) выделяются обменнообразующие границы, которые приурочены к поверхностям Мохоровичича, нижней и верхней части консолидированной коры, кровле кристаллического фундамента и кровле палеозойского фундамента [1].

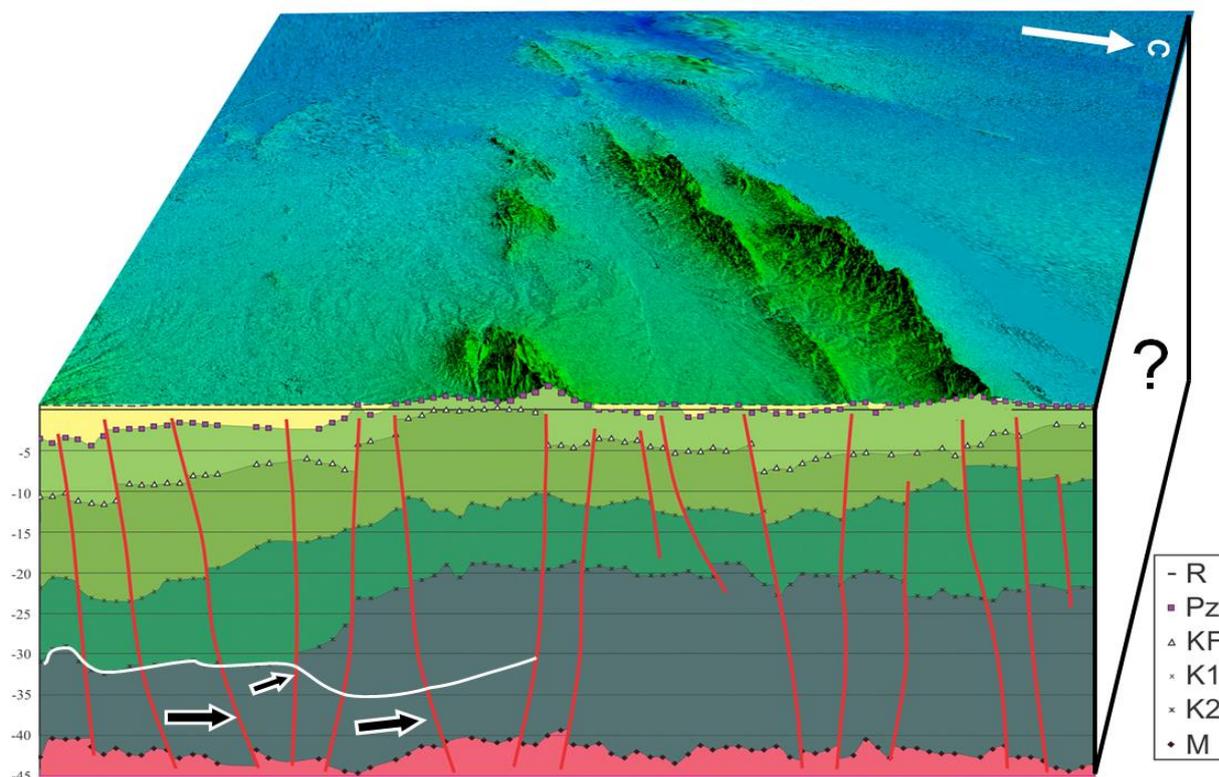


Рис. 3. Сейсмогеологическая и 3D модель рельефа субдукции Южного Тянь-Шаня на основе отражающих зон по профилю МОВЗ II-II. R-рельеф; Pz-верхняя часть палеозойского фундамента; KF-консолидированная кора; K1, K2-верхний и нижний слой земной коры; M-граница Мохоровичича

Из рис. 3 видно, что каждая обменнообразующая граница скоростей изменяется на разных глубинах, и на южной границе Тянь-Шаня увеличивается толщина кристаллического фундамента, также здесь наблюдается зона субдукции, соответствующая зоне K₂. Однако белая граница проведена условно для указания предполагаемой толщины опускающегося слоя, эти зоны в сейсмическом поле не отражаются в виде меняющихся границ за счет однородного состава, но отражаются резким увеличением мощности кристаллического фундамента, и не вызывает сомнения факт, что данной зоне соответствует граница формирования Южного Тянь-Шаня.

Поверхность Мохоровичича на этом профиле МОВЗ фиксируется повсеместно под каждым пикетом. На временном разрезе в ЮЗ части профиля ПК 0 (Гузар) поверхности Мохоровичича соответствует разница времен $\Delta t_{p-ps} = 6-5,8$ сек, что на сейсмогеологическом разрезе отвечает глубине залегания в 42 км. Далее на СВ глубина поверхности «М» увеличивается и достигает максимального значения в ПК 25 (Китаб) ($\Delta t_{p-ps} = 6,3$ сек, $H = 45$ км). В тектоническом плане это место

соответствует северному борту Кашкадарьинского прогиба, здесь на временном и глубинном разрезах отмечается Бухаро-Гиссарский глубинный разлом. Затем в промежутке ПК 28-40 (Зеравшанский хребет) поверхность «М» поднимается ($\Delta t_{p-ps} = 6,0$ сек, $H = 40$ км). Начиная с ПК 41, профиль проходит через Зеравшанскую впадину, здесь поверхность «М» опускается ($\Delta t_{p-ps} = 6,2$ сек, $H = 43$ км). Далее на СВ граница «М» постепенно погружается, достигая своего максимума под Северо-Нуратинским хребтом ($\Delta t_{p-ps} = 6,4$ сек, $H = 45$ км). Необходимо отметить, что если под Северо-Нуратинским хребтом наблюдается утолщение земной коры, то под западным окончанием Зеравшанского хребта этого не наблюдалось [2].

Вторая обменнообразующая поверхность «К_{II}» расположена между верхней и нижней частями консолидированной коры, которая прослеживается на ПК 0-15 $\Delta t_{p-ps} = 4,5-4,8$ сек, что в пересчете на глубину составляет от 30 до 32 км. На этом промежутке поверхность залегает параллельно относительно нижележащей границы. Амплитуда вертикальных перемещений незначительна. Начиная с ПК 21 до ПК 30, эта граница резко поднимается ($\Delta t_{p-ps} = 3,1$ сек, $H = 20$ км). Далее на СВ до ПК 67 граница базальтового слоя почти горизонтальная, и только под Северо-Нуратинским хребтом ПК 67-80 она погружается до глубины 23 км.

Третья обменнообразующая граница «К_I», параллельная нижележащей, прослеживается до ПК 15 и залегает на глубинах до 20 км, она приурочена к кровле гранитного слоя. Здесь также отмечается резкий подъем на ПК 30. В целом, эта граница повторяет форму нижележащего слоя.

Следующая граница, залегающая на глубине от 6 до 10 км, скорее соответствует кровле кристаллического фундамента. Она прослеживается на $\Delta t_{p-ps} = 1,1-2,0$ сек. Эта граница также повторяет форму нижележащих границ.

Кровля палеозойского фундамента, как и граница «М», четко выделяется на временном разрезе. Отметим, что её глубина в пределах Бешкентского и Кашкадарьинского прогибов максимальна и составляет до 5 км. Затем в Зеравшанском мегантиклинории ПК 28 кровля палеозойского фундамента выходит на дневную поверхность. Далее на временном разрезе она появляется на ПК 40. В Зеравшанской впадине глубина кровли этого слоя составляет до 2,5 км ($\Delta t_{p-ps} = 0,3-0,5$ сек).

На временных и сейсмогеологических разрезах под ПК 2, 5, 10, 19, 25, 27, 40, 44, 55, 64, 73 и 77 выделяются разрывные нарушения, пересекающие границу «М». На ПК 10 Учбаш-Каршинская флексурно-разрывная зона падает в СВ направлении и отделяет Кашкадарьинскую впадину с юга от Бешкентского прогиба. С севера Кашкадарьинский прогиб отделяется от мегантиклинали Зеравшанского хребта Бухаро-Гиссарским ПК 20 и Предкызылкумскими ПК 25 разломами. Оба эти разлома падают в ЮЗ направлении. По южному борту Зеравшанского хребта ПК 30 выделяется Южно-Тянь-Шаньский глубинный разлом, отделяющий Каракумо-Таджикский краевой массив от Южно-Тянь-Шаньской геосинклинали. Падение этого разлома СВ. На ПК 45 отчетливо выделяется Зеравшанский разлом ЮЗ падения, разделяющий Зеравшанскую впадину на южный и северный борты. Зеравшанская впадина с севера ограничена продолжением Южно-Туркестанского разлома СВ падения (ПК 55). Южно-Нуратинский разлом ЮВ падения выделяется на ПК 65. Далее к СВ на ПК 74 и 77 отчетливо выделяются Северо-Нуратинский и Кызылкумо-Южно-Ферганский глубинные разломы СВ падения соответственно.

Северо-Нуратинский разлом (сутурная зона) является Нуратинским сегментом одной из важнейших структурных линий Средней Азии. Эта линия известна как система Букантау-Южноферганских глубинных разломов, протягивающихся более чем на 1000 км из Южной Ферганы через Нуратинские горы в Кызылкумы и являющихся одним из главных тектонических элементов палеозойских сооружений Средней Азии [6], разделяющих системы Срединного и Южного Тянь-Шаня.

По характеру разломов можно сказать, что вовлечение в поднятие Зеравшанского хребта создает напряжение в северном и южном направлениях. В результате Pz отложения Зеравшанской мегантиклинали надвинуты на юге на Кашкадарьинский прогиб, а на севере на отложения Зеравшанской впадины. Похожая картина наблюдается и на северном борте Зеравшанской впадины. Таким образом, мегантиклиналь Зеравшанского хребта и антиклиналь Южного Нуратау представляют собой горсты, а Кашкадарьинская и Зеравшанская впадины – грабен синклинали [1].

Непосредственно зона Северо-Нуратинского разлома представляет собой систему встречных покровов, перемещавшихся со стороны Туркестанского и Зеравшанского бассейнов. В составе покровов распознаются структуры океанического дна (офиолитовый комплекс), островные дуги и пассивные окраины. Кроме того, в составе последних участвуют различные формации осадочного

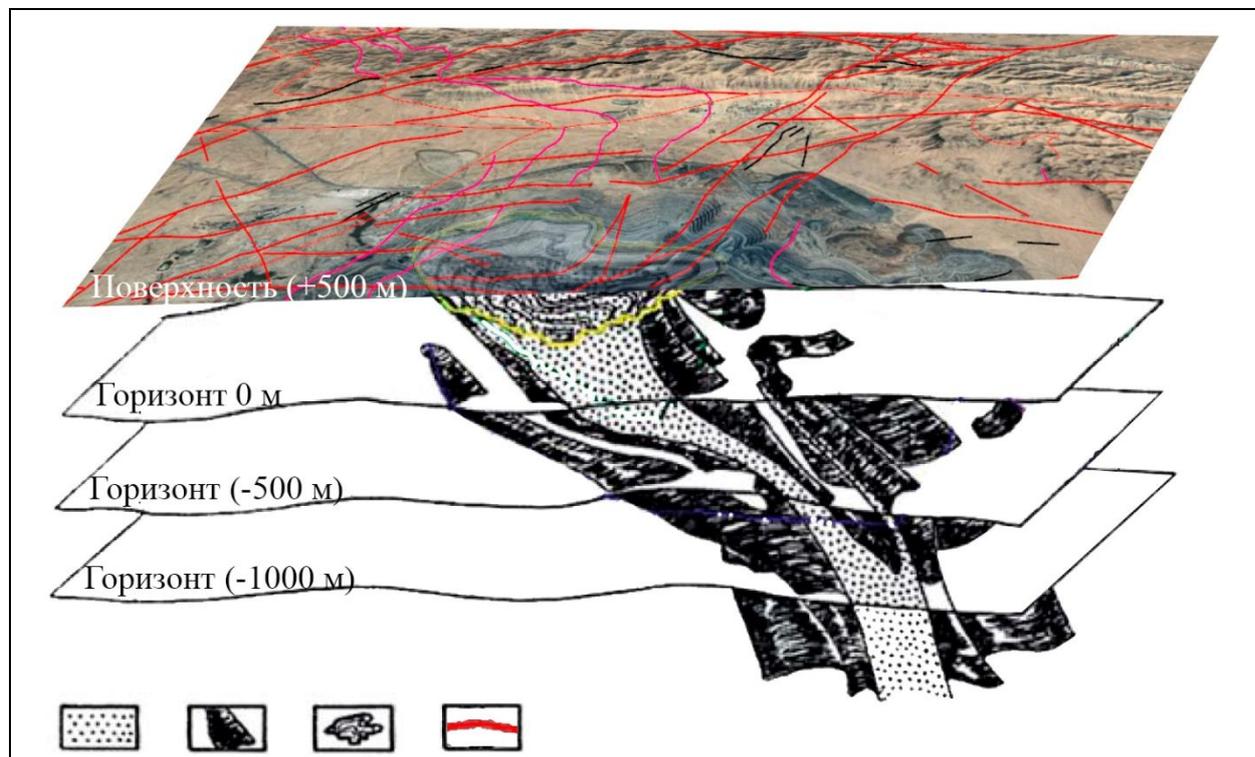
чехла, сорванные с основания микроконтинентов и перемещенные на различные расстояния. Современное строение Южного Тянь-Шаня отражает реализацию позднепалеозойских коллизионных процессов, вызвавших поглощение океанической коры и стрессовое напряжение сходящихся Киргизско-Казахстанского и Таджикско-Каракумского микроконтинентов [4].

Зона Северо-Нуратинского глубинного разлома представляет собой структуру регионального характера, имеющую специфическое строение. В ее пределах выделяются различные тектонические пластины, блоки и макроблоды фрагментов разреза терригенных, терригенно-карбонатных, карбонатных, метавулканогенных, кремнисто-карбонатных образований. Зона характеризуется системой сближенных продольных пограничных разрывов, часто взбросо-сдвигового характера и является, видимо, рудоподводящей, а иногда и рудовмещающей структурой некоторых проявлений минерализации золота, серебра, свинца, железа, марганца.

Сложное строение Северо-Нуратинского глубинного разлома, длительность формирования, рудоконтролирующая и рудовмещающая природа ставят его в ряд наиболее перспективных структур на обнаружение новых золоторудных объектов [10].

Исследователями установлено, что крупные месторождения имеют глубинное заложение, связанные крупными разломами, которые являются каналами миграции и концентрации флюидопотоков. Зона региональных разломов формируют региональную пространственную систему, вдоль которой происходит горизонтальное и вертикальное движение флюидопотоков и закономерное размещение полезных ископаемых.

Ниже приведена глубинная геолого-космоструктурная модель Мурунтауского рудного поля.



Условные обозначения: 1-золоторудная минерализация по поверхности, в контуре карьера и в вертикальной плоскости Южного разлома; 2-внешний контур золоторудного штокверка; 3-контур карьера; 4-разломы, установленные по геологическим данным.

Рис.4. Глубинная геолого-космоструктурная модель Мурунтауского рудного поля.

Месторождения Мурунтау - это крупный штокверк с сочетанием пологозалегающих субсогласных и крутопадающих секущих рудных зон, которые в общем объеме распределены неравномерно, обуславливая структурно-морфологические особенности различных залежей и тел. Мурунтауское рудное поле, таким образом, представляет собой складчато-блоковую постройку в углесодержащей терригенной толще [8].

Необходимо отметить, что вдоль зон глубинных разломов происходит конвекция теплового потока, осуществляемая по каналам глубинного тепломассопереноса (ГТМП), существование и положение которых определяется зонами глубинных разломов. Расположение нефтегазовых месторождений над ГТМП связано с благоприятными условиями для миграции углеводородов, а также участием в процессе образования нефти и газа самих конвективных потоков, миксгенетическая концепция генерации нефти и газа разработана А.А. Абидовым и другими.

Выводы.

Таким образом, выявленные зоны региональных (глубинных) разломов, которые выделены по данным МОВЗ, являются каналами миграции и концентрации флюидопотоков, формирующими региональную пространственную систему, вдоль которой происходит горизонтальная миграция и концентрация вертикального движения флюидопотоков. Исследование глубинного пространственного заложения таких зон разломов имеет важное значение для выявления закономерностей размещения рудных месторождений, а также месторождений углеводородов.

Новейший орогенез Тянь-Шаня относится к ряду континентальных рифтовых процессов, но реализуется в условиях регионального бокового сжатия, связанного с давлением ближайшей, в данном случае Индостанской, континентальной плиты. Легкое, частично расплавленное, горячее вещество мантии в связи с поглощением Срединно-океанического хребта в зоне субдукции потеряло возможность выхода к поверхности Земли. Эти легкие массы с большой температурой неизбежно должны были остановиться под поверхностью Мохоровичича в виде плюмов. В результате действия этого тепла породы земной коры разуплотнились. Таким образом, эпиплатформенный орогенез Тянь-Шаня – это континентальный рифтогенез при общем горизонтальном сжатии.

Литература

1. Атабаев Д.Х., Долгополов Ф.Г. Применение метода обменных волн землетрясений для геодинамического районирования территории Узбекистана и сопредельных стран // Вестник НУУз. Спец. вып. - 2013. - С. 5-9.
2. Атабаев Д.Х., Абдуллаев Н.К. Региональные сейсмологические наблюдения МОВЗ вдоль профиля II-II на территории Республики Узбекистан // Тр. Междунар. геол.-геофиз. конф. ГеоЕвразия - 2019 «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». - М., 2019. - С. 18-22.
3. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Егорова В.В., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Геоэлектрическая структура литосферы Центрального и Южного Тянь-Шаня в сопоставлении с петрологическим анализом и лабораторными исследованиями нижнекоровых и верхнемантийных ксенолитов // Геология и геофизика. - 2011. - Т. 52 (12). - С. 2022-2031.
4. Бискэ Ю.С. Южный Тянь-Шань: к новому геологическому синтезу // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. - 2018. - Т. 63. - Вып. 4. - С. 416-462. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.403>
5. Буртман В.С. Структурная эволюция палеозойских складчатых систем (варисциды Тянь-Шаня и каледониды Северной Европы) // Труды ГИН. Вып. 289. - М.: Наука, 1976. - 153 с.
6. Бухарин А.К., Брежнев В.Д., Масленникова И.А., Пятков А.К. и др. Тектоника Западного Тянь-Шаня. - М.: Наука, 1989. - 151 с.
7. Добрецов Н.Л., Буслов М.М. О проблемах геодинамики, тектоники и металлогении складчатых поясов // Геология и геофизика. - 2011. - Т. 52. - № 12. - С. 1911-1926.
8. Золоторудное месторождение Мурунтау. / (под ред. Т.Ш.Шаякубов). Изд-во. «Фан» Ташкент. 1998г. 539с.
9. Миркамалов Р.Х., Чирикин В.В., Диваев Ф.К. Геодинамические реконструкции орогенного пояса Западного Тянь-Шаня и прогноз эндогенных отложений в породах фундамента (рекомендации). - Т.: ГП «ИМП», 2019. - 162 с.
10. Харин А.В., Темуров Б.З. Строение и рудоносность зоны Северо-Нуратинского разлома // Тез. Междунар. науч.-техн. конф. «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития геологической отрасли Республики Узбекистан». - Т.: ГП «ИМП», 2016. - С. 168-174.
11. Bo, Zu & Xue, Chunji & Seltmann, Reimar & Dolgopolova, Alla & Chi, Guoxiang & Li, Chao. (2020). Geology, geochronology, and S-Pb-Os geochemistry of the Alastuo gold deposit, West Tianshan, NW China. *Mineralium Deposita*. 55. 1-18. 10.1007/s00126-019-00948-7.
12. Liu, Lei & Feng, Jilu & Han, Ling & Zhou, Jun & Xu, Xinliang & Liu, Rui. (2018). Mineral mapping using spaceborne Tiangong-1 hyperspectral imagery and ASTER data: A case study of alteration detection in support of regional geological survey at Jintanzi-Malianquan area, Beishan, Gansu Province, China. *Geological Journal*. 53. 372-383. 10.1002/gj.3260.
13. Zhou, Z.-J.; Chen, Z.-L.; Nurtaev, B.; Shukurov, S.; Han, F.-B.; Wang, Z.-X.; Xiao, W.-F.; Yu, X.-Q. Re-Os Geochronology and Sulfur Isotopes of the Lyangar W-Mo Deposit: Implications for Permian Tectonic Setting in South Tianshan Orogen, Uzbekistan. *Minerals* 2019, 9, 534. <https://doi.org/10.3390/min9090534>

MUHANDISLIK SEYSMOLOGIYASI

УДК 624.04

Ибрагимов А.Х.

Институт сейсмологии АН РУз

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ibragimov A. X.

O'zR FA seysmologiya instituti

Binolar va inshootlarning seysmik chidamliligini baholashning zamonaviy usullarini ko'rib chiqish

Annotatsiya. Maqolada binolar va inshootlarning holati va seysmik mustahkamligini baholashning zamonaviy usullari - dinamik yuklanish usullari, shuningdek tabiiy tebranishlarni passiv ro'yxatdan o'tkazish usullari va ularni tahlil qilish muhokama qilingan.

Kalit so'zlar: tebranish, mikroizim, dinamik yuk, modal tahlil

Ибрагимов А.Х.

Институт сейсмологии АН РУз

Обзор современных методов оценки сейсмостойкости зданий и сооружений

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы оценки состояния и сейсмической устойчивости зданий и сооружений – методы динамического нагружения, а также методы пассивной регистрации собственных колебаний и их анализ.

Ключевые слова: вибрация, микросейсмы, динамическая нагрузка, модальный анализ

Ibragimov A.Kh.

Institute of seismology Academy of Sciences

Overview of modern methods for assessment of seismic resistance of buildings and structures

Annotation. The article considers modern methods of assessing the state and seismic stability of buildings and structures - methods of dynamic loading, as well as methods of passive recording of natural oscillations and their analysis.

Keywords: vibration, microseisms, dynamic load, modal analysis

Изучение сейсмической опасности актуально практически для всей без исключения территории Узбекистана, где даже на относительно спокойных в геологическом отношении территориях имели место достаточно сильные и разрушительные землетрясения. При этом значительную площадь страны занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8-9 балльные зоны.

По своим экономическим, социальным и экологическим последствиям землетрясения занимают ведущее место среди природных катастроф. Дальнейшая урбанизация городских поселений, усложнение их инженерной инфраструктуры, уточнение сейсмической опасности, как правило, в сторону ее повышения, физический и сейсмический износ конструкций зданий – все это с неизбежностью приводит к дефициту сейсмостойкости застройки. Ни одна самая развитая страна не в состоянии довести свой строительный фонд до уровня современных требований норм сейсмостойкого строительства.

Эксплуатируемые здания и сооружения имеют различный возраст, техническое состояние и зачастую исходно проектировались либо вообще без учета сейсмического воздействия, либо на воздействие более низкой интенсивности, чем требуется по современным нормам. Поэтому проектирование усиления таких зданий и реализация таких проектов являются важнейшими задачами современной индустрии, которые перед ней ставит государство.

Профессор Университета Колорадо Роджер Билхэм [1] опубликовал свой доклад, в котором говорилось, что при современном росте урбанизации и увеличении населения к середине XXI века потребуются более миллиарда жилых строений, а человечество столкнется с новым оружием массового уничтожения — таким оружием станет... обыкновенный жилой дом. Объясняя свой парадоксальный вывод, ученый ссылается на то, что власти и архитекторы не уделяли и не будут в будущем уделять должного внимания возведению сейсмостойчивых зданий, а также укреплению

уже имеющихся. Причина банальна — для строительства таких зданий требуются существенно большие затраты.

После того, как в 2010 году случилась страшная трагедия на Гаити, ученые отметили, что многих жертв можно было бы избежать, если бы на острове уделялось должное внимание строительству сейсмоустойчивых зданий. Роджер Билхэм [2] заявил, что свою роль в появлении такого количества жертв сыграло безответственное строительство. Здания, не рассчитанные на столь мощный удар, складывались как картонные домики, становясь могилами для людей.

Обычные жилые дома, возведенные десятки лет назад, похвастаться высочайшим качеством, как правило, не могут. Да и выстроены они были зачастую с самыми разнообразными отклонениями от проектов: там плиты как следует не соединили, тут использовали цемент не той марки, которая предусмотрена техническими условиями, зато построили побыстрее и получили премию за перевыполнение плана. Значит, необходимо выявить состояние "скороспелок". Традиционные методы диагностики не позволяют быстро охватить весь гигантский массив работы - обследовать нужно тысячи зданий, включая и промышленные, и жилые.

Необходимость оценки дефицита сейсмостойкости зданий и конструкций возникает после сильных землетрясений и динамических воздействий другого происхождения.

К общей основе методов оценки сейсмической устойчивости зданий и конструкций относится выделение какого – либо характерного параметра и мониторинг его изменений.

На сегодняшний день применяются следующие методы экспериментального определения сейсмостойкости зданий и сооружений:

1. Вибрационный метод.
2. Взрывной метод.
3. Метод «сброс нагрузки».
4. Ударный метод.
5. Испытания моделей здания.
6. Метод диагностики микросейсмических колебаний.

1. Вибрационный метод. Вибрационный метод заключается в возбуждении и исследовании вынужденных колебаний объекта. В качестве возбудителя чаще всего применяют центробежный вибратор, в котором создается неуравновешенная центробежная сила при вращении эксцентрично расположенных грузов. Вибромашина либо жестко крепится к зданию, либо располагается на грунте рядом со зданием. В обоих случаях в здании возбуждаются вынужденные колебания. Чаще всего изучают направленные простые колебания, поэтому вибратор обычно имеет направленное действие, хотя известны случаи испытаний зданий ненаправленным вибратором. При динамических испытаниях с помощью вибрационных машин достижимы довольно высокие уровни напряженности конструкции, приближающиеся в отдельных случаях к эквивалентным расчетным для землетрясения силой 5-6, а в некоторых случаях до 9 баллов.

Исходя из рассмотренной информации о вибрационном методе испытаний можно сказать, что данный метод используют для сооружений, которые не эксплуатируются, расположены в нежилых или промышленных районах, так как воздействия вибромашин могут привести к потере несущей способности элементов конструкции испытываемого объекта, либо повредить близлежащие сооружения. Для объектов, расположенных в районах с густой застройкой, данный метод может быть применен только при степени повреждения не превышающей 3. Для реализации данного метода необходимы дорогостоящие вибромашин. Также процесс установки оборудования требует больших затрат времени и труда, что обусловлено весом вибромашин, их положением (на кровле, в заглублениях вблизи здания, зафиксированы на несущих стенах и т.д.)

2. Взрывной метод. Одним из наиболее эффективных экспериментальных методов исследования сейсмостойкости зданий и сооружений является метод сейсмозрывных воздействий. Сейсмометрические измерения колебаний зданий и сооружений при взрывных воздействиях позволяют изучать поведение зданий и сооружений в условиях, приближающихся к реальным. В практике сейсмозрывных испытаний зданий и сооружений применялись три различные модификации проведения взрывных работ:

- взрывы в водной среде в искусственно созданных или естественных водоемах, не имеющих народнохозяйственного значения;

- взрывы группированных зарядов в скважинах диаметром 100-150 мм, многорядные, линейно-рассредоточенные, с замедленным взрыванием между рядами;

- взрывы направленного сейсмического действия на испытываемый объект при использовании плоских линейно-протяженных зарядов с односторонним боковым воздушным промежутком.

При имитации сейсмических колебаний заданной интенсивности, соответствующих реальным землетрясениям, необходимо моделировать такие параметры воздействия, как максимальная амплитуда колебаний, их частотный состав, длительность и форма огибающей сейсмического процесса. Взрывы во влажных и жидких средах позволяют имитировать сейсмическое воздействие заданной интенсивности с наименьшими затратами и отличаются от взрывов в грунтовых средах простотой выполнения, значительным сокращением времени проведения эксперимента и возможностью многократного его повторения. Вместе с тем оценки преимущества взрывов в воде для создания сейсмического эффекта заданной интенсивности у разных исследователей оказываются различными

Специфика взрывного метода позволяет проводить испытания только на не эксплуатируемых сооружениях, вдали от населенных пунктов на открытой местности. Последствия испытаний могут привести к разрушению здания и повредить ближайшие сооружения [3].

3. Метод «сброса нагрузки». Особенность этого метода заключается в фрагментном исследовании здания, так как импульсная нагрузка прилагается к одному из несущих элементов каркаса здания. Импульсная нагрузка достигается посредством мгновенного приложения нагрузки. Этот эффект достигается следующим образом, к необходимой конструкции присоединяют высокопрочный трос, между тросом и машиной, которая создает натяжение троса, устраивают специально откалиброванные вставки, которые при движении машины разрушаются, обеспечивая импульс определенной величины. Испытания проводят в несколько этапов, на которых используют вставки различной прочности. По результатам испытаний можно давать рекомендации по усилению, как отдельных конструкций, так и здания в целом [4].

4. Ударный метод. Возбуждающий импульс может быть создан ударом по зданию грузом (обычно весом от 0,2 до 2,0 т) с маятниковым подвесом, падением тяжелого груза на грунт рядом со зданием. В этих случаях, применяя обычную современную высокочувствительную аппаратуру, можно записывать свободные колебания здания. По этим данным можно определять периоды и форму собственных колебаний здания, характеристики затухания, влияние грунта на работу здания и некоторые другие параметры. Этот метод исследований, однако, не может дать исчерпывающих данных о работе здания из-за невозможности точно определить величину возбуждающего импульса, а также весьма низкого уровня деформаций (напряжений). Существенным недостатком данного метода является трудоемкость анализа полученных колебаний, которые чаще всего представляют собой суперпозицию различных форм собственных колебаний [5]. Применение ударного метода вызывает слабые динамические нагрузки, которые не могут повлиять на целостность конструкции и здания в целом. Метод можно применять и к эксплуатируемым зданиям, и к объектам, которые еще не введены в эксплуатацию. Для проведения исследования нужен комплект высокочувствительной аппаратуры и корректная расстановка датчиков по сооружению. В зависимости от характера проведения эксперимента может потребоваться создание маятниковой системы, либо простейшее приложение нагрузки весом около 50 кг в определенной точке сооружения. Эксперимент можно повторять многократно для достижения наилучшего результата. С помощью этого метода можно определить общий характер работы и частоту собственных колебаний здания. Метод не дает полной картины работы здания при воздействии землетрясения

5. Испытание моделей зданий. Одним из самых распространенных является метод испытания моделей зданий. Его распространение во многих странах повлекло накопление большого опыта в проведении подобных испытаний. Колебания модели здания вызывается виброплатформой. Ее конструкция зависит от размеров и веса модели, движение платформы обеспечивается гидроцилиндрами на шарнирном соединении. Расстановка гидроцилиндров позволяет получить высокий спектр амплитуды и частот колебаний, а также вызывать Р и S волны. Также этот метод позволяет выполнять модели зданий любой формы и конструкции по подобиям существующих и проектируемых зданий.

Этот метод не дает полного представления работы полномасштабного здания, так как невозможно добиться точного соответствия распределения масс и работы узлов проектируемого здания. Испытания данным методом можно проводить в лаборатории, либо на полигоне. Макет сооружения, как правило, невозможно использовать повторно, после проведения эксперимента он

требует реставрации или полной замены. Кроме комплекта записывающей аппаратуры для эксперимента необходима виброплощадка и сам макет здания. Это влечет за собой иногда существенные финансовые и трудозатраты. Возможно воссоздать любую конфигурацию здания и влияющих на него нагрузок, что позволит определить характер работы будущего сооружения при землетрясении. Макет не может полностью воспроизвести жесткостные и массовые характеристики здания, что влечет за собой не точное представление о восприятии нагрузок полномасштабным сооружением.

6. Метод наблюдений микросейсмических колебаний. С развитием аппаратно-методической базы микросейсмические наблюдения приобретают все больший вес в геофизических исследованиях, причем преимущественно для практических применений. Это связано с их дешевизной и технологической простотой исполнения, а также с возможностью применения в практически любых ситуациях (например, для тела плотин, стесненных условий площадки и пр.). Все это делает микросейсмические наблюдения приоритетными для целей рекогносцировки перед детальными исследованиями и для долговременного мониторинга [6]

В настоящее время понятие «микросейсмические наблюдения» объединяет целый набор технологий, основанных на анализе волн разного генезиса и типов (эмиссия, техногенные сигналы, поверхностные волны и пр.). Существенно, что зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться различными способами, опирающимися на разные составляющие микросейсм, для получения принципиально разной информации о среде. Рассмотрим две составляющие среднечастотных (0,5-10 Гц) микросейсм: поверхностные волны Рэлея и техногенные монохроматические колебания (пики в спектре микросейсм), возбуждаемые в геологической среде при работе электрических машин. Примеры из практики иллюстрируют возможность комплексирования разных методик, а также использование техногенных пиков для структурных и геодинамических исследований. Из вышеизложенного следует, что использование микросейсм для решения строительных задач открывает большие возможности. Изучение микроколебаний, которые ранее относились к разряду помех, дает огромный материал для анализа. Это особенно важно при исследовании слабоактивных платформенных территорий. Главным преимуществом является возможность получить за короткое время богатую и достоверную информацию для анализа [7].

Анализ микросейсмических колебаний можно проводить на любом сооружении без вреда для него. Так как колебания возникают без вмешательства исследователей этот метод можно определить, как самый простой. Но процесс распознавания волн и определения их природы является весьма трудоемким. Микросейсмические волны могут дать довольно достоверную информацию о пространственной работе сооружения, а также возможных последствия при более сильном землетрясении.

Теперь рассмотрим следующие динамические характеристики инженерных сооружений, которые можно определить с помощью сейсмических методов:

1. Собственные частоты сооружений.
2. Собственные формы колебания.
3. Коэффициент динамического усиления колебаний.
4. Коэффициенты и тип затухания.
5. Скорость распространения сейсмических волн в конструкции (сейсмическая интерференция).

Всем инженерным сооружениям соответствует свой набор собственных частот, характеризующий определённый набор жесткости и массы. Любое изменение в жесткостных характеристиках и массе конструкции отражается в изменении собственных частот. Наличие локальных дефектов, повреждение или масштабные изменения конструкции приводит к изменению резонансной частоты системы. Вероятность присутствия повреждения сооружения можно оценить довольно просто, на основе изменений собственных частот. Зарубежные исследователи Коули и Адам [8] первыми предложили способ обнаружения повреждений в инженерных сооружениях на основе изменения собственных частот. Однако дать более точную информацию о положении и характере повреждения сложно. На самом деле, метод диагностики с использованием только собственных частот очень ограничен, что делает его практическое применение затруднительным. Подробная локализация требует оценки и анализа многочисленных собственных частот, что технически сложно, чтобы осуществлять на практике.

Период резонанса - основной параметр в сейсмическом дизайне структуры, таким образом, динамические параметры зданий в Бейруте (Ливан) были привлечены на основе окружающего ме-

тогда вибрации для оценки уязвимости и риска [9]. Ливан сталкивается с высокой сейсмической опасностью из-за плотной урбанизации в дополнение к отсутствию сейсмических норм и правил строительства. Для этого исследования записи вибрации были выполнены на 330 емкостно-резистивных датчиках, установленных на зданиях, извлеченные параметры периода статистически проанализированы, получена корреляция с физическими строительными параметрами (высота, горизонтальные размеры, возраст) и особенностями места (горные территории или осадочные породы). Исследование показывает, что (1) высота застройки или количество этажей (N) являются основным статистически значимым параметром для оценки фундаментального периода T ; (2) корреляция между T и N линейна и выражается: $T \approx N/23$ для горных участков и $N/18$ для осадочных пород; (3) измеренное демпфирование обратно пропорционально периоду: более высоким зданиям соответствует низкое демпфирование; (4) значительная переоценка периода существует в текущих строительных нормах и правилах. Однако часть большого несоответствия с рекомендациями строительных норм и правил может произойти из-за очень низкого уровня нагрузки.

Следующая работа [10] представляет современные методы определения смещения и относительного дрейфа для сейсмического контроля и оценки повреждения зданий. В большинстве случаев решения о безопасности зданий после сейсмических событий основаны на визуальных осмотрах структур. Инструментальные измерения в реальном времени, используя GPS или двойную интеграцию ускорения, предлагают жизнеспособную альтернативу. Соответствующие параметры, такие как тип связей и структурных особенностей (включая геометрию яруса), могут оцениваться, вычисляются дрейфы, соответствующие нескольким предварительно отобранным пороговым стадиям повреждения. Отношения дрейфа, определенные в реальном времени, могут сравниваться с этими порогами, для оценки степени повреждений. Этот подход продемонстрирован в трех зданиях стальной конструкции в Сан-Франциско, Калифорния. Недавно зарегистрированные данные сильного сотрясения из этих зданий указывают, что система мониторинга может быть полезным инструментом в быстрой оценке состояния зданий и других структур после землетрясения. Такие системы могут также использоваться для контроля риска, как метод, чтобы оценить основанные на работе процедуры дизайна и анализа, для долгосрочной оценки структурных особенностей здания и, как возможный долгосрочный инструмент обнаружения повреждения.

Беспроводной контроль [11] появился в последние годы в качестве многообещающей технологии, которая могла значительно повлиять на поле структурного контроля и управления активами инфраструктуры. Ключевая конструктивная особенность беспроводных модулей обнаружения - сочетание вычислительной мощности и датчиков; интеграция вычислений с беспроводным модулем обнаружения предоставляет датчикам возможность опросить измерительные данные. В частности, есть большой интерес к использованию беспроводных распознающихся модулей, чтобы создать структурные системы контроля, которые опрашивают структурные данные для выявления признаков повреждения.

Ramanjaneyulu [12] описал эффективность различных методов для идентификации повреждения в структурах на основе данных вибрации. Искусственная нейронная сеть (ANN) используется для обнаружения повреждений в структурах при помощи изменений в собственных частотах между поврежденной и неповрежденной структурой. Для демонстрации применимости были рассмотрены консольные пластины. Повреждение было идентифицировано и определено количественно, минимизируя ошибки между результатами измерений и численным экспериментом, использующим генетический алгоритм. Когда повреждения расположены в симметричных конструкциях, частота не очень чувствительна к структурному повреждению. Разработанные критерии модального анализа дают четкую идентификацию повреждения во всех случаях, даже когда шум включен в моделируемые данные.

Kevin Tseng и Liangsheng Wang [13] предложили метод электромеханического импеданса для обнаружения повреждения и контроля его прогрессии в конкретных структурах и испытали его, используя анализ конечных элементов. Различные состояния структуры были оценены, используя корневое среднее значение квадратное отклонение (RMSD) индекс. Гармонический анализ ответа в ANSYS использовался для исследования корреляции индекса RMSD с расположением и степенью повреждения.

Ян и др. [14], главным образом, имели дело с проблемой обнаружения повреждения - только измерения вибраций при изменении экологических условий. Были получены два типа особенностей от измерений свойств зданий, используя автоматизированное стохастическое подпростран-

ство, идентификационные процедуры и пиковые индикаторы, вычисленные на модальных фильтрах преобразования Фурье. Эффекты окружающей среды рассматривали, используя факторный анализ, и повреждения были обнаружены, используя статистическое управление процессом с многомерными диаграммами.

Leandro Fleck Fadel Miguel et.al [15] разработали новый подход для вибрационного анализа - процедуры в окружающий контекст вибрации. Этот метод комбинирует временной интервал модальной идентификации с методом эволюционного поиска гармоник. Результаты показывают, что у предложенной методологии есть потенциал для использования в обнаружении повреждений в зданиях.

Qindan Huang et al [16] объединил два метода, а именно, Байесовский образцовый вариант и вибрации - базовый метод идентификации повреждений. Создана базовая модель модальных частот для поврежденного объекта. Путем сравнения модельных частот с данными в режиме реального времени можно обнаружить повреждения на локальном уровне. Этот подход включает ошибки измерения и моделирования в испытаниях на вибростойкость и процесс обнаружения повреждения соответственно. Статистическая неопределенность в неизвестных модальных параметрах были также включена. Как результат, модальные данные могут быть легко получены из вибрационных измерений.

В работах [17,18] приведена методика обследования здания на сейсмостойкость с использованием метода стоячей волны. Здесь определяются основные динамические характеристики зданий: частоты и формы собственных колебаний, динамическая жесткость, характеристики затухания колебаний (декремент затухания). Эта методика не требует источника вибраций, основана на методе стоячих волн (оценка поля стоячих волн с высокой детальностью, что позволяет получать информацию о локальных дефектах сооружений). На основе этого метода разработан комплекс «Стрела-П», включающий в себя 5 трехкомпонентных сейсмометров, 15-канальную цифровую станцию и ноутбук с программным обеспечением. Использование комплекса для контроля прочности, устойчивости и остаточного ресурса сооружений реализовано на существенно различных по конструкции объектах трех типов: гражданских и промышленных зданиях (одноэтажные и многоэтажные здания различной конструкции и различных материалов), высотных сооружениях (башни, мачты, промышленные дымовые и вентиляционные трубы) и заглубленных в грунт конструкциях (свайные и железобетонные основания). Проверка допустимости зафиксированного остаточного ресурса осуществляется прочностным расчетом ослабленной износом конструкции методами строительной механики и динамики сооружений на действие эксплуатационных нагрузок с учетом изменения прочностных свойств конструкционных материалов за период эксплуатации с использованием специально разработанных программных средств.

Как известно, в строительных конструкциях появление дефектов вызывает уменьшение площадей рабочих сечений и моментов инерции от проектных параметров. Механические характеристики материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, нормативное сопротивление конструкционных материалов) также могут отличаться от проектных значений, как вследствие естественной неоднородности, так и по технологическим причинам. В процессе эксплуатации конструкций и в связи с эффектами старения происходит дальнейшее снижение указанных параметров и, следовательно, несущей способности. Характерно, что при этом не происходит заметного снижения материалоемкости конструкций. Процедура оценки физического состояния сооружения в целом устанавливается циклом анализа по основным несущим конструктивным элементам. В предположении, что при оценке прочности и устойчивости сооружений можно пренебречь изменением массовых характеристик, несущую способность можно охарактеризовать изгибной жесткостью опасных сечений несущих конструктивных элементов $B=EJ$, т.е. произведением модуля упругости E на момент инерции нормального сечения J . Указанные предпосылки дают возможность оценивать несущую способность сооружения по спектру частот собственных колебаний по собственным формам. Далее полагают, что начальное состояние конструкции соответствует некоторым исходным (проектным) данным, т.е. если сооружение запроектировано на несущую способность от конкретной нагрузки, то процент уменьшения жесткости будет соответствовать снижению данной (проектной) несущей способности. Если сооружение предназначено для службы в сейсмически активном районе, т.е. по проекту является сейсмостойким на G баллов, то процент уменьшения жесткости будет соответствовать снижению указанного ресурса сейсмостойкости. При использовании данного метода расчетные частоты определяют программными средствами с

учетом градиентности параметров сооружения по координатам, слоистости и разнотипности поперечных сечений, а также упругой податливости грунтового основания. Т.е. точность и достоверность экспресс-метода достигается за счет принятия во внимание при расчете таких факторов, как неравномерность распределения инерционных (массовых) и жесткостных характеристик по координатам, податливость опорного сечения конструкции и композитность структуры сечений. В ходе измерений регистрируют акселерограммы, т.е. изменения во времени ускорений различных точек объекта, а также (при возможности) синхронно-скоростного напора ветра. Простейшая схема измерений представляет вертикальный и горизонтальный створы, при этом точки измерения могут быть "прорежены" (через одну точку измерения в каждом створе). Более детальные схемы измерения могут включать, например, один полный вертикальный створ и один или два "прореженных", а также полный или "прореженный" горизонтальный створ. При "прореживании" вертикального створа рекомендуется в нижней части объекта оставлять все точки измерения, число которых зависит от количества анализируемых форм колебаний, требуемой детальности построения эпюр и предварительной информации о поврежденности конструкции. При ограниченном количестве акселерометров возможна их поочередная перестановка в различные точки измерения. При этом должна быть, по крайней мере, одна общая точка измерения, используемая для нормирования амплитуд колебаний при построении эпюр по нескольким расстановкам датчиков. Результаты обследования состояния зданий и сооружений, полученные с применением МДК "Стрела", хорошо коррелируют с результатами, полученными при применении других методов диагностики, и позволяют выявить причины повреждений отдельных частей и конструкций, прогнозировать скорость их износа и определить остаточный ресурс.

Работы [19, 20] описывают возможности оценки состояния конструкций путем мониторинга скорости упругих волн. Здесь используются записи землетрясений с высокочувствительных акселерометров, установленных в различных местах зданий.

В работе [21] проводилась оценка скорости распространения волн от землетрясений в вертикальном направлении. Показана зависимость скорости V_p от степени повреждения здания. После сильного землетрясения значения V_p снизились на 200 м/с.

В связи с развитием электроники и mems-технологий резко выросло количество портативной аппаратуры, позволяющей регистрировать вибрации конструкций и передавать их в режиме реального времени. Так, на базе беспроводного модуля Imote2, разработанного компанией Intel, в котором кроме функции передачи данных по Wi-Fi, имеется встроенное 20-разрядное АЦП для подключения измерительных модулей, в качестве датчика вибраций применен аналоговый mems-акселерометр LIS3L02AS4 компании ST Microelectronics [22]. Питание прибора – от Power bank 10 000 ma/h, 5 вольт. С применением подобных малогабаритных портативных приборов построен ряд микро-сетей для контроля состояния особо важных зданий и конструкций преимущественно стратегического значения. Дальнейшее развитие подобные системы [23] получили для мониторинга состояния критических объектов в режиме реального времени. Сеть датчиков состоит из массива распределенных чувствительных узлов, взаимодействующих с датчиками аналоговых сигналов, затем преобразующих их в цифровые форматы и передающих показания в пункт сбора данных.

Настоящий небольшой обзор работ в области оценки состояния зданий и сооружений сейсмометрическими методами показывает, что ряд методик используется для циклических (периодических) измерений. В тоже время развиваются методы контроля состояния конструкций в режиме реального времени, что весьма важно для объектов стратегического назначения. В Узбекистане некоторые из алгоритмов применимы для мониторинга состояния плотин крупных водохранилищ, а также транспортных туннелей в горных районах. Важное значение имеет оперативная оценка дефицита сейсмической устойчивости зданий после сильных землетрясений, поскольку сильно меняются параметры сейсмического риска для плейстосейстовой зоны. При наличии современной цифровой аппаратуры с функцией передачи данных в режиме реального времени, в настоящее время появилась возможность онлайн оценки технического состояния особо ответственных зданий и сооружений.

Литература

1. Roger Bilham. The seismic future of cities/ Bull Earthquake Eng (2009) 7:839–887 DOI 10.1007/s10518-009-9147-0
2. Roger Bilham. Lessons from the Haiti earthquake/ NATURE|Vol 463|18 February 2010

3. Cawley P. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies / P. Cawley, R. D. Adam // *Strain Analysis*- 1979- №14. – С.49-57.
4. Шапиро Г. А., Ашкинадзе Г. Н., Симон Ю. А. Вибрационные методы испытания жилых и общественных зданий. Государственный комитет по гражданскому строительству архитектуре при Госстрое СССР. Москва-1967 г.
5. Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Ордынская А.П. и др. Оценка повреждаемости зданий и сооружений по результатам сейсмозрывных и вибрационных испытаний опытных объектов // *Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века: Сб. науч. тр.- Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1996. - С. 194-199.*
6. Гамзатов Т.Г., Саидов М.А., Баксареев А.М., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инновационная сейсмологическая система мониторинга плотин ГЭС в Дагестане // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. No 5. С.28–31*
7. Юдахин Ф. Н. Микросейсмические колебания - важный источник информации. *Вестник УрО РАН №33, 2010, 65-73с*
<http://www.iieuran.ru/doc/33/65-73.pdf>
8. P.Cawley. Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies// *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* · April 1979. DOI: 10.1243/03093247V142049
9. Christelle Salameh, Bertrand Guillier, Jacques Harb, Cécile Cornou, Pierre-Yves Bard, Christophe Voisin. Seismic response of Beirut (Lebanon) buildings: instrumental results from ambient vibrations. *Bull Earthquake Eng (2016)*. doi:10.1007/s10518-016-9920-9, pp 1-26.
10. M. Celebi. Developments in seismic monitoring for risk reduction *Journal of Risk Research*, Volume 10, Number 5, July 2007, pp. 715-727(13)
11. Jerome Peter Lynch. An overview of wireless structural health monitoring for civil structures. Volume 365, issue 1851 *Philosophical Transactions*.
12. K.Ramanjaneyulu “Damage identification based on vibration testing methods” in ‘Advanced Course on Health Assessment of Structures using Innovative Technologies’ by S.Parivallal, K.Kesavan and Dr.J.Prabakar (Eds.), 8-10 February 2012, CSIR-SERC, Chennai 113, India. pp. 219-237, CBA publishers.
13. Kevin Tseng and Liangsheng Wang, “Structural Health Monitoring Using Smart Piezoelectric Material” Department of Civil and Environmental Engineering, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA.
14. Yana, L. Chengb, Z.Y. Wua and L.H. Yamb, “Development in vibration -based structural damage” in *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, pp.2198–2211.
15. Leandro Fleck Fadel Miguel, Leticia Fleck Fadel Miguel, João Kaminski Jr and Jorge Daniel Riera “Damage detection under ambient vibration by harmony search algorithm” in *Expert Systems with Applications*, 2012, pp.9704 – 9714.
16. Qindan Huang, Paolo Gardoni and Stefan Hurlbaeus. “A probabilistic damage detection approach using vibration-based nondestructive testing” in *Structural Safety*, 2012, pp. 11 –21.
17. А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах, С.А. Гриценко, А.И. Данилов, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Г.И. Татьков // *Геология и геофизика. – 2002. – Т.43, № 2. – С. 192–207.*
18. Татьков Г.И. Результаты микродинамического обследования современных типов монолитных и каркасных зданий / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, В.Г. Баранников. // *тр. VI российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. – Иркутск, 2006. – С.44–52.*
19. Shintaro O. Evolution of structural characteristics based on the velocity of shear wave propagation in buildings. / O. Shintaro // *Transactions of the Architectural Institute of Japan. - 1984.-№336. – P. 34-41.*
20. Safak E. Detection of seismic damage in multi-story buildings by using wave-propagation analysis. // In: *Proceedings of the 6th US national conference on earthquake engineering*. Washington: Elsevier Science.- 1998.
21. M. Rahmani, T. -Y. Hao, M. Todorovska, R. Boroschek. STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF TORRE CENTRAL BY THE WAVE METHOD. 16-th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017. paper #3651. p.p.1-12.
22. Jennifer A. Rice and B.F. Spencer. Structural health monitoring sensor development for the Imote2 platform// Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign
205 N. Mathews Ave, Urbana, IL USA, 61801
MATTHEW J. WHELAN1 AND KEROP D. JANNOYAN. Design of a Robust, High-rate Wireless Sensor Network for Static and Dynamic Structural Monitoring // *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*

TEXNOGEN SEYSMIKLIK

УДК 550.34

Хамидов Л.А., Ганиева Б.Р.

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз,

ДЕФОРМАЦИЯ ОСНОВАНИЯ ЗОН КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ВАРИАЦИИ ОБЪЕМА ВОДЫ

Hamidov L.A., Ganiyeva B.R.

O'zR Fanlar akademiyasi G'.O.Mavlonov nomidagi Seismologiya instituti

Katta suv omborlari zonalari poydevorining suv hajmi o'zgaruvchanligidagi deformatsiyasi

Аннотация. Dunyo seysmologik tadqiqotlarida katta suv havzalarining seysmik xavfsizligini ta'minlash bilan birga texnogen seysmiklikni baholash katta ahamiyatga ega. Seysmik salohiyati yuqori mamlakatlarda joylashgan dunyodagi ko'plab yirik suv omborlarida seysmik xavfsiz ishlashni ta'minlash mamlakatning barqaror ijtimoiy-iqtisodiy rivojlanishini ta'minlashning muhim omilidir. Shu nuqtai nazardan, suv omborlarining ishlashi paytida paydo bo'lgan texnogen stresslar va qo'shimcha deformatsiyalarni baholaydigan miqdoriy modellarni ishlab chiqish dolzarbdir. Tadqiqotning maqsadi chiziqli miqdoriy modellashtirish asosida undagi suv hajmining o'zgarishi bilan yirik suv omborlari zonalari siljishini va deformatsiyasini aniqlashdan iborat. Texnogen kuchlarning ta'sirida ishlaydigan suv omborlari poydevorlariga deformatsiya jarayonlarini hisoblash va tahlil qilish natijasida suv omborlari ishlashi paytida paydo bo'ladigan qo'shimcha siljishlar va deformatsiyalar aniqlandi. Bu zilzilalar paytida bazaviy siljishlarning bosimning o'zgarishiga, hajmga bog'liqligi va qo'shimcha bazaviy deformatsiyalarning fokusi bilan mumkin bo'lgan mutanosibligini aniq ko'rsatdi.

Калит so'zlar: Suv omborlari, texnogen yuk, kuch, og'irlik, deformatsiya, siljish, hisoblash, model, empirik, qaramlik.

Хамидов Л.А., Ганиева Б.Р.

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз,

Деформация основания зон крупных водохранилищ при вариации объема воды

Аннотация. В мировой практике сейсмологических исследований большое значение имеет оценка техногенной сейсмичности при обеспечении сейсмической безопасности крупных резервуаров. Для многих крупных водохранилищ мира, расположенных в странах с высоким сейсмическим потенциалом, обеспечение сейсмической безопасности эксплуатации является важным фактором обеспечения устойчивого социально-экономического развития страны. В связи с этим актуальна разработка количественных моделей, оценивающих техногенные напряжения и дополнительные деформации, возникающие при эксплуатации водохранилищ. Цель исследования - определение смещения и деформации подошвы зон крупных водоемов при вариации объема воды в нем на основе линейного количественного моделирования. В результате расчета и анализа деформационных процессов под действием техногенных нагрузок на основании эксплуатируемых водоемов определены дополнительные смещения и деформации, возникающие при эксплуатации водохранилищ. Показана существенная зависимость смещений основания от изменения давления при вариациях объема воды и соизмеримость дополнительных деформаций основания с очаговыми при землетрясениях.

Ключевые слова. Водохранилища, техногенная нагрузка, сила, вес, деформация, смещение, расчет, модель, эмпирический, зависимость.

Khamidov L.A., Ganiyeva B.R.

Institute of Seismology named after G.A. Mavlyanova of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,

Deformation of the base of the zones of large reservoirs With varying water volume

Annotation. In the world practice of seismological research, the assessment of technogenic seismicity while ensuring the seismic safety of large reservoirs is of great importance. In many large reservoirs in the world, located in countries with high seismic potential, ensuring seismically safe operation is an important factor in ensuring sustainable socio-economic development of the country. In this regard, the development of quantitative models that assess technogenic stresses and additional deformations arising during the operation of reservoirs is relevant. The aim of the research is to determine the displacement and deformation of the base of the zones of large reservoirs with a variation in the volume of water in it on the basis of linear quantitative modeling. As a result of the calculation and analysis of deformation processes under the action of technogenic loads on the foundations of operated reservoirs, additional displacements and deformations arising during the operation of reservoirs were determined. It showed a significant dependence of base displacements on pressure variations on volume and a possible commensurability of additional base deformations with focal ones during earthquakes.

Keywords. Reservoirs, technogenic load, force, weight, deformation, displacement, calculation, model, empirical, dependence

Введение. Одним из распространенных механизмов формирования областей концентрации напряжений и деформаций в массиве горных пород является образование деструктивных областей в зонах активного влияния крупных водохранилищ. Оно сопровождается дискретизацией напряженно-деформированного состояния и углублением неоднородности и мозаичности распределения его параметров [1,2]. В результате анализа мировых данных по сейсмическому мониторингу и выявлению напряженного состояния недр зон водохранилищ было установлено, что зависимость скорости изменения уровня воды в водохранилище с сейсмической активностью слабых землетрясений имеет нелинейный характер, связанный с факторами дополнительной нагрузки и наличием тектонических разрывов. Анализ проведенных исследований по оценке деформаций, геодезические измерения в ближних зонах водохранилищ показали, что при эксплуатации крупных водохранилищ его основание и чаща находятся в постоянно действующих нагрузках сжатия и растяжения, соответствующих интенсивности амплитуд пригибания основания от вариации веса (объема).

Как отмечено в работах Н.Gupta, В.Rastorgy, И.Ш.Идирмачева, В.Ю.Тимофеева, Л.А.Хамидова и других (1996-2016 гг.), результаты антропогенного влияния в особо крупных масштабах могут привести к нарушениям уровней равновесие внутренних напряжений в приповерхностной части земной коры, что обостряет сейсмоэкологическую ситуацию зон активного влияния водохранилищ [3,4,5,6]. Например, по В.Ю.Тимофееву и др., заполнение крупных водохранилищ ведет к изменению ландшафтов территорий, климата, к деформациям земной коры, увеличению сейсмичности, а в отдельных случаях - к возникновению сильных землетрясений с магнитудами M более 6 даже на асейсмичных платформенных территориях [7]. Как отмечено «...механизм возникновения таких землетрясений пока не определен, но имеется несколько предположений на этот счет...», например [4,7,8]:

- изменение веса водохранилища может создать ту дополнительную нагрузку на земную кору, которая приводит к подвижкам блоков по разломам в тех местах, где упругие напряжения близки к пределу прочности материала;

- рост порово-трещинного давления от напора воды в водохранилище ведет к снижению эффективного давления пород и их прочности на сдвиг (другими словами, изменение физических свойств породы от заполнения водохранилища нарушает равновесное состояние блоков, способствует их подвижкам).

Анализ способов. Система «плотина-основание-водохранилище» – это сложная, но единая взаимовлияющая структура [4,8,9,10]. Как отмечено А.И.Савичом и Э.Г.Газиёвым [11], «...моделирование, связанных с определением механизмов плотинных землетрясений и оценки НДС состояния их основания, из геодинамических процессов может дать возможность определить те физические силы, которые ответственны за образования наведенных дополнительных нагрузок в земную кору. При заполнении водохранилища построенной высокой плотиной в ее скальном основании начинают происходить сложные деформационные процессы. Вначале под тяжестью уложенного бетона и аккумулируемой в водохранилище воды происходит осадка ложа водохранилища и примыканий плотины и одновременно, по мере проникновения воды в трещины массива, его насыщение водой и взвешивание, что сопровождается изменением напряженного состояния вмещающего массива, подъемом основания и примыканий [8]. Происходит разуплотнение массива за счет раскрытия трещин и ухудшение его прочностных показателей...» Авторы подтверждают это комплексом геофизических исследований, проведенных при заполнении водохранилища плотины Ингури [12] и плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных глубинах водохранилища [13]. Как показано в [8, 12, 13], одновременно происходит снижение вертикальных сжимающих напряжений в теле плотины, что способствует проникновению воды в горизонтальные строительные швы и взвешиванию тела плотины. При этом эффект взвешивания возрастает с увеличением высоты секции плотины. Исследования, проведенные специалистами ЦСГНЭО [8], на таких плотинах, как арочная плотина Ингури (Грузия), арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС, гравитационная плотина Капанда (Ангола), показали, что после заполнения водохранилища и при сезонных колебаниях его уровня происходит подъем береговых массивов в верхнем и нижнем бьефах, удлинение высоты плотины, сопровождаемое трещинообразованием и

раскрытием строительных швов на напорной грани, появлением новых путей фильтрации и ростом фильтрационных расходов.

Впервые это явление было зафиксировано при первом заполнении водохранилища арочной плотины Ингури высотой 271 м в Грузии [8, 13]. Основание плотины сложено слоистыми известняками и доломитами. В процессе наполнения водохранилища велось наблюдение за осадками плотины и основания по поверхностным топографическим реперам, по реперам, установленным в дренажной галерее, а также на режимной геофизической сети [8].

Рассмотрение полученных диаграмм осадок реперов в основании плотины показало, что в процессе строительства регистрировались осадки от ее возрастающего веса. После начала заполнения водохранилища эти осадки продолжались под действием веса воды.

Решение и обсуждение. Эти процессы сопровождалось ростом скоростей упругих волн в массиве пород основания. Однако, по мере того как вода проникала в трещины скального массива и создавала всё возрастающее противодавление, стало отмечаться поднятие основания практически во всех точках измерения, включая и репер, расположенный в нижнем бьефе плотины на удалении 400 м [8,14]. При этом скорости упругих волн в массиве начали резко уменьшаться [14].

Вычитание из зарегистрированных вертикальных смещений реперов в теле плотины осадок основания под весом строящейся плотины и веса воды в водохранилище позволило получить диаграммы подъема этих реперов, которые практически повторяли график заполнения водохранилища с отставанием примерно на один год [8]. Как утверждается в [7, 8], это то время, которое потребовалось для насыщения и взвешивания скального массива в основании плотины.

После начала укладки бетона в 1977 г. наблюдались осадки основания плотины, которые продолжались и после начала наполнения водохранилища для пуска первой очереди станции. Эти осадки составили 29 мм (рис.1.) [8].

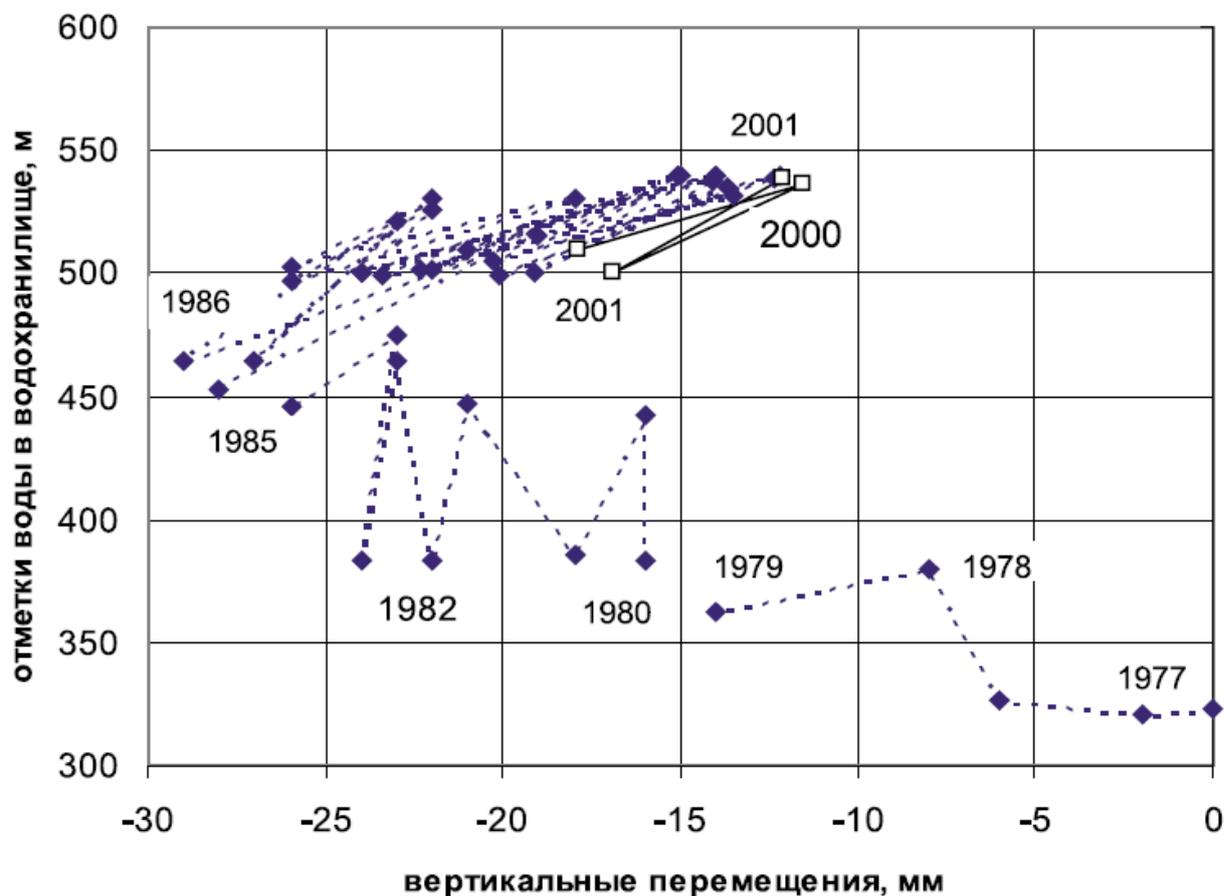


Рис. 1. Вертикальные перемещения основания центральной секции плотины СШГЭС за период с 1977 по 2001 г. [8]

Подобное явление наблюдалось и при заполнении водохранилища арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС высотой 242 м, построенной на высокопрочных орто- и парасланцах.

Исследователи показали, что «...после достижения водохранилищем глубины 140 м (при отметке 465 м) начался медленный подъем основания, который к 2001 г. при уровне мертвого объема (УМО) составил 12 мм, а при нормальном подпорном уровне (НПУ) подъем увеличился еще на 5 мм.

Таким образом, первоначальная осадка в 29 мм сократилась за счет подъема основания до 11 мм. В то же время гребень плотины при НПУ поднимался в том же центральном сечении на 25 мм. Это свидетельствовало об удлинении консоли плотины примерно на 35 мм, что могло быть одной из причин появления в 1989 г. (через год после заполнения водохранилища) на напорной грани плотины горизонтальных трещин. Проведенные в 2010 г. исследования динамики воздействия фильтрационной воды на вертикальные перемещения плотины СШГЭС показали, что подъем основания плотины (на отм. 308 м) происходит через 18 суток после подъема уровня верхнего бьефа (УВБ) до своего максимального значения; на отм. 344 м (т. е. на высоте 36 м от основания) это запаздывание составляет 26 суток, а на отм. 359 м – 33 суток...» [15].

Можно отметить, что происходит как бы медленное растяжение плотины в вертикальном направлении.

А.И.Савичом и Э.Г.Газиевым в исследованиях [15,16] аналогичная картина была получена при заполнении водохранилища гравитационной плотины Капанда в Анголе, построенной на горизонтально-слоистых песчаниках с прослоями аргиллитов (рис.2).

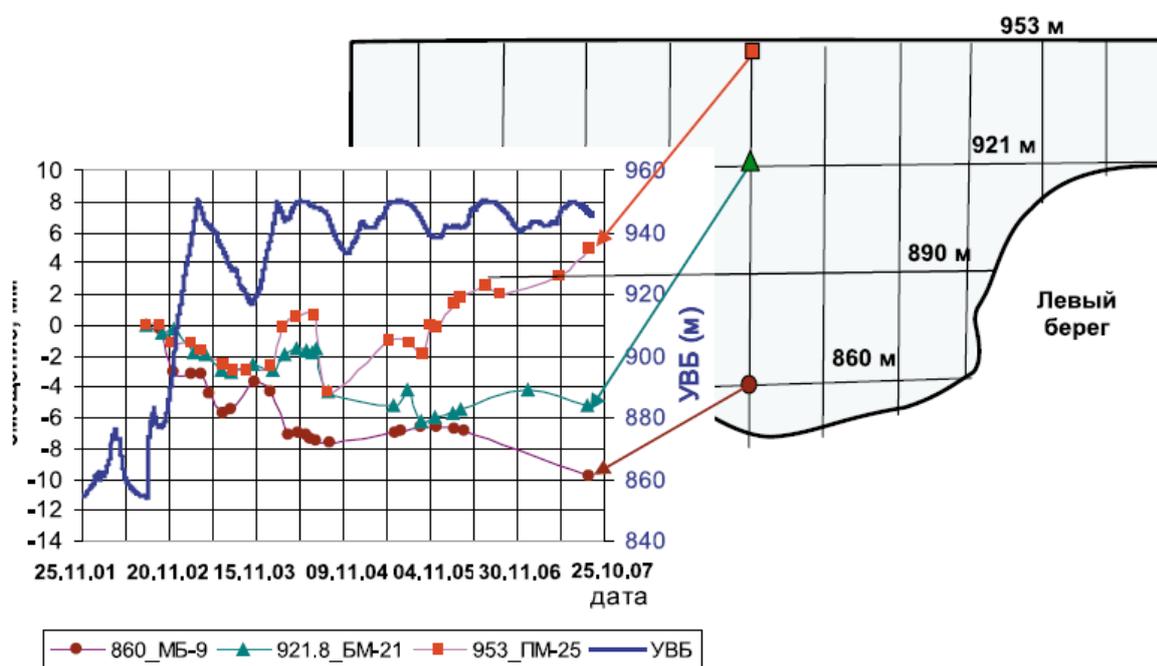


Рис. 2. Вертикальные смещения центрального сечения плотины Капанда (Ангола) на разных отметках при заполнении водохранилища [8, 16]

Происходящие процессы нагружений наглядно иллюстрируются диаграммой, представленной на рисунке 2, где приведены результаты замеренных вертикальных смещений марок на гребне (отм. 953 м), в средней части в галерее на отметке 921 м и в основании (отм. 860 м) центральной секции плотины [8,16].

Авторами отмечается, что вертикальные перемещения плотины на всех отметках с некоторым отставанием следуют за изменением уровня воды в водохранилище [8,16]. Причем при заполненном водохранилище наблюдается заметный подъем верхних горизонтов плотины при одновременной осадке нижерасположенных горизонтов, что также свидетельствует о происходящем удлинении высоты тела плотины. «...Первый резкий подъем гребня был зафиксирован в апреле 2004 г., через год после первого заполнения водохранилища до НПУ.

Деформации удлинения плотины в вертикальном направлении к 2007 г. составили в центральной части плотины почти 15 мм. Анализ данных натуральных наблюдений за поведением плотины СШГЭС в процессе наполнения водохранилища показал, что максимальный подъем основания центральной секции (№ 33 на отм. 308 м) происходит через 18 суток после максимального подъема УВБ. На отм. 344 м этот подъем происходит через 26 суток, а на гребне плотины на отметке 359 метров – в течение 33 суток...» [15].

Анализируя диаграммы подъема правого берега реки Ингури, в нижнем бьефе плотины на протяжении около 150 м при каждом сезонном подъеме уровня воды в водохранилище (и это спустя почти 25 лет после первого его наполнения) исследователи [8,15,16] отмечают, что «...вертикальные подъемы испытывают не только створы плотин, но вся территория скальных массивов, находящихся в зоне подъема уровня грунтовых вод при росте УВБ...».

Для наблюдений за возможными подвижками расположенного в верхнем бьефе плотины Капанда геологического разлома по обе стороны от него были заложены геодезические репера [8].

За период с октября 2002 г. по апрель 2007 г. было выполнено 8 циклов нивелирования. Рассмотрение данных наблюдений свидетельствует о том, что смещений по разлому не наблюдалось, но наполнение водохранилища вызвало подъем почти всех геодезических реперов. Наибольшие подъемы зафиксированы у реперов, наиболее удаленных от русла реки. При этом, чем ближе к водохранилищу находится знак, тем меньше его подъем при том же УВБ за счет влияния осадки ложа водохранилища [8]. В дальнейшем, по мере развития процесса осадки ложа водохранилища, этот подъем берега прекратился, и началось его понижение. Это свидетельствует о том, что наиболее ощутимые изменения напряженно-деформируемого состояния (НДС) скального массива случаются в период первого заполнения водохранилища (примерно в течение первого года после заполнения), когда происходит первое насыщение трещин вмещающего скального массива водой из водохранилища [1,8,9,10,15]. Чем выше плотина, тем под большим напором в трещины проникает вода, и когда взвешивающее давление становится равным прочности трещинообразования массива, начинается рост длины трещин, приводящий, в свою очередь, к росту взвешивающего давления [8].

Перестройка напряженно-деформированного и фильтрационного состояния массива в результате колебаний уровня водохранилища в процессе его эксплуатации приводит также к интенсификации суффозионных процессов и к образованию зон со снижающейся прочностью вследствие циклических изменений знака напряжений. При быстрой сработке водохранилища в массиве могут возникнуть зоны избыточного трещинного давления, в которых развиваются процессы разрушения массива [8,15,16].

В работе В.В.Тетельмина [17], исследуя фактор прогиба земной коры в большой гидроэнергетике, отмечено, что «...свойство изостазии современная гидротехника во внимание не принимает. В то же время многолетний прогиб всей толщи земной коры может быть одной из причин многих необъясненных процессов, происходящих в створах больших плотин...». Автором используется двухэлементная модель [17]: упругая земная кора мощностью h нагружена сосредоточенной силой веса F_0 и представляется в виде бесконечной упругой пластины с модулем упругости E , плавающей в полупространстве вязкой жидкости плотностью ρ и вязкостью μ . Задача заключается в определении динамики погружения упругой пластины в вязкое полупространство мантийного вещества. Процесс прогиба земной коры рассматривается в плоскости, ориентированной поперёк оси водохранилища [42].

В результате действия силы F_0 , как считает автор, бесконечно-упругая балка выходит из состояния равновесия и приобретает форму синусоиды с тремя характерными участками:

- участок ОСО прогиба (погружения);
- два периферийных участка компенсационного поднятия.

Радиус воронки прогиба R земной коры от веса крупного водохранилища может составлять 60–70 км.

Радиус совместного влияния процессов прогиба и компенсационного (окаймляющего) поднятия земной коры от веса крупного водохранилища составляет несколько десятков километров в каждую сторону от уреза водохранилища.

Упругая бесконечная балка (земная кора), плавающая в высоковязкой тяжёлой жидкости, испытывает изгиб с относительно малым вертикальным перемещением осевой линии. При малых

значениях прогиба зависимость между амплитудой прогиба $A_{прог,i}$ и соответствующей упругой реакцией при силе $F_{Y,i}$ балки имеет следующий вид:

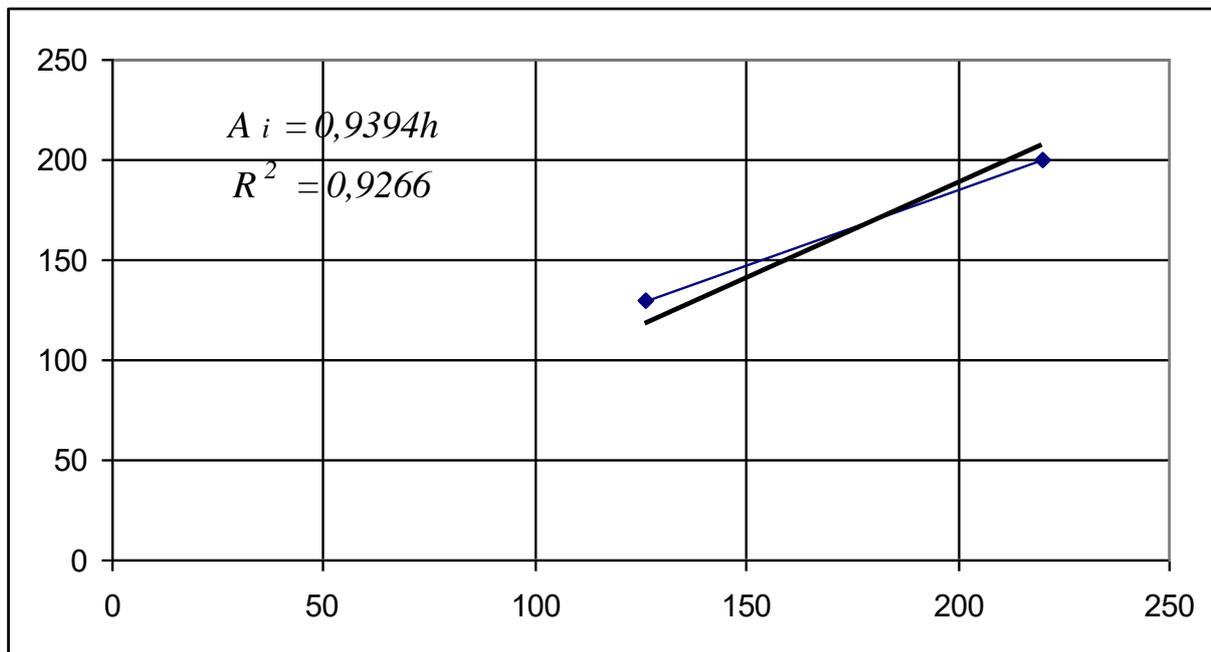
$$A_{прог,i} = \frac{R^3 F_{Y,i}}{4EJ} ,$$

где EJ – жесткость балки при изгибе; R – полудлина балки (радиус воронки прогиба). Амплитуда прогиба $A_{прог,i}$ земной коры на произвольном i -том шаге расчета равна сумме приращений амплитуд, полученных на каждом из N шагов:

$$A_{прог,i} = \frac{\sum_{i=1}^N F_i \Delta t_i}{4\pi J} \quad (1),$$

где F_i - не компенсированная часть удельной нагрузки; Δt_i - шаг во времени, определяющий время действия силы F_i [17]. В исследованиях [17, 20, 21] выделены при расчете значения амплитуд пригибания оснований для водохранилищ Гувер, Саяно-Шушенск и др. Определяя трендовую линию по значениям вычисленных амплитуд (рис.4), мы построили асимптотическую функцию возможной пропорциональной их зависимости:

$$A_i = 0,9394h \quad (mm) \quad (2)$$



Условные обозначения: (ось x – высота напора (м); ось y – пригибание основания ($m \times 10^{-5}$))

Рис.4. Трендовая линия по значениям вычисленных амплитуд по отношению [17].

В работе [18, 19] нами была разработана модель НДС состояния основания водохранилищ 2D моделированием, где также нами была определена зависимость, показанная на рисунке 5 в [18] пригибания в зависимости от давления на основание:

$$\zeta_i = 0,044 \cdot e^{0,222F} , \quad (3)$$

со среднеквадратичным отклонением: $R^2 = \pm 0,855$.

Решая краевую задачу для плоско-деформированного состояния, мы получили формулу, представляющую зависимость между вариацией веса воды и очаговой деформацией.

Тензор смещений, полученный при этом, при высокочастотных вариациях интенсивности F_i (вес воды) создает возможность оценки энергии деформации и заодно через функцию $f(L, M)$ возможной магнитуды предстоящего наведенного очага [19].

Было определено, что при прочих равных условиях, за критической деформацией магнитуда M становится максимальной только для той длины L трещинообразования, которая является максимально энергетически возможной длиной разрыва образования. Практически выполняется условия неустойчивости по закону Кулона-Мора: $\sigma_p = \tau_n \cdot \tan \varphi_{cp} \rightarrow \infty$. При этом интенсивные кратковременные нагрузки-разгрузки, согласно условиям совместности деформаций Бельтрами-Митчеля, приводят к распространению низко частотных волн напряжений [19]. Для высоконапорных водохранилищ при высокочастотном варьировании силы давления ΔF_i эти волны обратно пропорциональны интенсивности действующей нагрузки и поэтому могут быть достаточно низкочастотными и иметь большую длину волны.

Так как мы находимся в поле квазистатических сил, т.е в условии неустойчивого роста или образования трещины согласно Гриффитсу [19,20], то критический размер возможного очагового разрыва $L_{кр}$ и его связь с напряжением отождествляется коэффициенту удельной поверхностной энергии ν_s с учетом, что плотность воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3 \cdot Q/S_{осн}$.

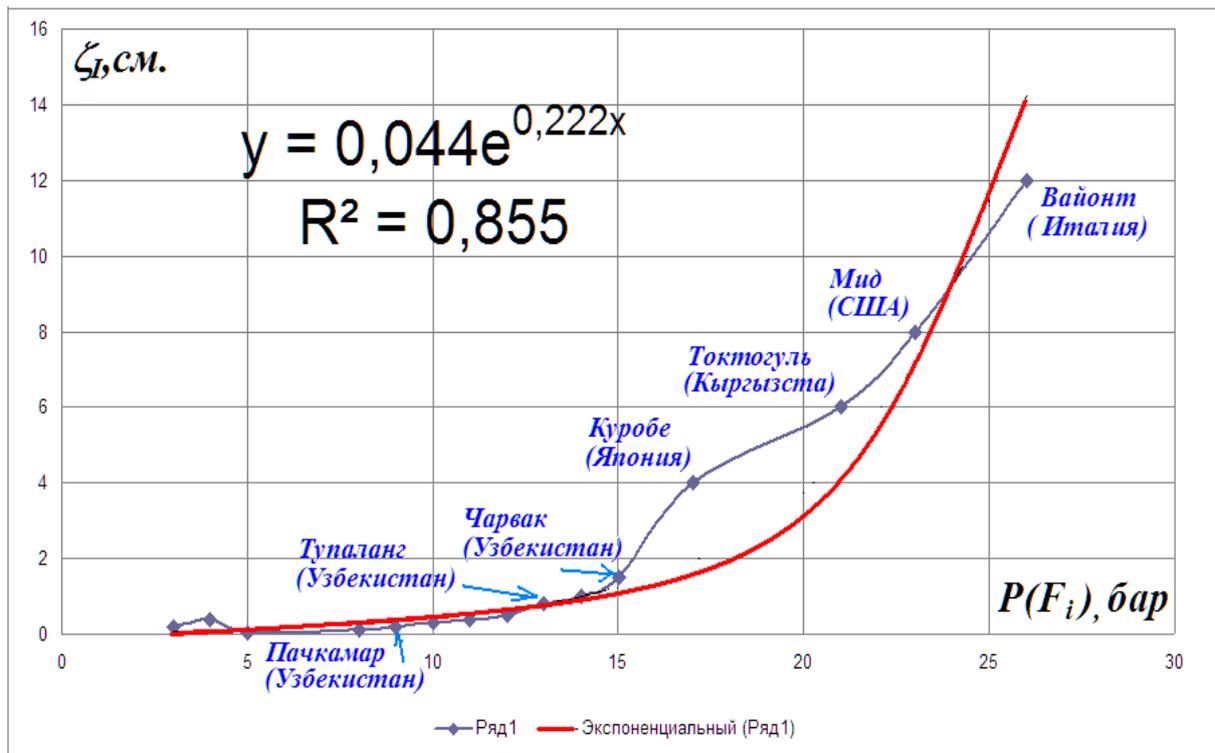


Рис. 5. Аналитическая связь между значением деформационного пригибания и давлением в основании разных водохранилищ мира [18].

На основании чаши водохранилища, умножая на коэффициент трения покоя k_s и, с учетом изменения высоты напора Δh при срабатывании и восстановлении, получено:

$$\nu_s = k_s \cdot Q/S_o \cdot \Delta h, \quad (4)$$

При составлении алгоритма численного расчета нами введена следующая функция амплитуды пригибания $A_{прог.i}$ земной коры [19]. Она при произвольном i -том шаге расчета равна сумме приращений амплитуд, полученных на каждом из N шагов:

$$A_{прог.i} = \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / S_i^2); \quad (5)$$

где F_i – некомпенсированная часть удельной нагрузки; Δt_i – шаг во времени, определяющий время действия силы F_i ; ΔS_i – площадь, куда налагается и разгружается сила F_i ; S_i – общая площадь основания, где идет нагрузка-разгрузка; T -время эксплуатации. Уравнение Ламье и граничные условия при этом примут (с введением безразмерных параметров) вид:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u + (\mu + 1) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= 0; \quad \mu \nabla^2 v + (\mu + 1) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0; \\ e_{22} \mu (\sin 2\alpha - 2k_s \sin^2 \alpha) - k_s e_{11} + 2\varepsilon_{yy} \mu k_s + \\ + e_{22} (\mu \cos 2\alpha - 2\mu k_s \sin 2\alpha) &= k_s - \mu \sin 2\alpha + 2k_s \mu \sin^2 \alpha + \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / a_i S_i^2); \end{aligned} \quad (6)$$

где μ -модуль сдвига; $W(u,v)$ – компоненты смещений; α -угол наклона неоднородности; Δ -оператор Лапласа. На границах Γ^- и Γ^+ (Γ^\pm границы обеих сторон возможного разрыва) имеем:

$$(\varepsilon_{11}^- - \varepsilon_{11}^+) + 2\mu(\varepsilon_{22}^- - \varepsilon_{22}^+) \sin^2 \alpha + \mu(\varepsilon_{12}^- - \varepsilon_{12}^+) \sin 2\alpha + 2\mu(\varepsilon_{yy}^- - \varepsilon_{yy}^+) = -\frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / a_i S_i^2); \quad (7)$$

где a_i – длины неоднородностей на основании водохранилища; ε_{ij} – тензор деформации.

Компонента вертикальных смещений (из тензора Кельвина) будет согласно [2,5]:

$$\begin{aligned} v_{ij} = \sum_{j=1}^N \left\{ \left[n \ln r_{ij}^+ - m \frac{(y_i^+ - y_j^+)^2}{(r_{ij}^+)^2} \right] P_j^+ - m \frac{(x_i^+ - x_j^+)(y_i^+ - y_j^+)}{(r_{ij}^+)^2} Q_j^+ + \right. \\ \left. + \left[n \ln r_{ij}^- - m \frac{(y_i^- - y_j^-)^2}{(r_{ij}^-)^2} \right] P_j^- - m \frac{(x_i^- - x_j^-)(y_i^- - y_j^-)}{(r_{ij}^-)^2} Q_j^- \right\} - x_i^\pm + \frac{1}{4\pi\mu T} \sum_{i=1} (F_i \Delta S_i \Delta t_i / S_i^2); \end{aligned} \quad (8)$$

где Q_j^\pm, P_j^\pm – компоненты сосредоточенных сил. Координаты сосредоточенных сил на Γ_0^\pm будут:

$$x_j^+ = x_1 - x_j \cos \alpha + y_j \sin \alpha; \quad y_j^+ = y_1 + y_j \cos \alpha - x_j \sin \alpha; \quad (9)$$

$$\text{где: } x_j = \frac{1-a_0^2}{N} \left(\frac{N+1}{2} - j \right); \quad y_j = (1-a_0^2) \sqrt{1 - \frac{4}{N} \left(j - \frac{N+1}{2} \right)^2}; \quad (10)$$

Используя (1) и (2) в пределах допустимых значений физических параметров, согласно [5, 18], и с учетом (4) и (5) на базе алгоритма (6), (7) и (8), введя преобразования согласно (9) и (10), нами проведены расчеты деформаций и пригибаний в известных своей техногенной сейсмичностью водохранилищах.

Пример координат {element} элементов: (x_j, y_j) {X(sentr); Y(sentr)} - распределение сил F_i и значения нормальных σ_n {US SIGMA-S}, касательных τ_s {UN SIGMA-N} напряжений и

коэффициент трения покоя k показаны в таблице 1, при расстановки начало координат в Декартовой системе в точке $(-10, 250)$, что соответствует левой предельной границе зоны возможного влияния водохранилища (cod: означает 2D Kelvin плоско-деформированное состояние). Всего использована 36 элементная база.

Таблица 1. Распределение сил и значения напряжений и коэффициента Кулона

element	cod	X(sentr)	Y(sentr)	US SIGMA-S	UN SIGMA-N	k
1	2	371	395	.3000E-01	.3000E+00	0,3
2	2	442	366	.2000E-01	.2000E+00	0,2
3	2	472	339,5	.3000E-01	.3000E+00	0,3
4	2	494,5	305,5	.2000E-01	.2000E+00	0,2
5	2	509,5	250	-.1000E-01	-.1000E+00	-0,1
6	2	521	204,5	.1000E-01	.1000E+00	0,1
7	2	542	181	.1000E-01	.1000E+00	0,1
8	2	579	155	.1000E-01	.1000E+00	0,1
9	2	257,5	377	.5000E-01	.5000E+00	0,5
10	2	283,5	361	.5000E-01	.5000E+00	0,5

В таблице 2 показаны результаты эмпирических и модельных расчетов амплитуд возможных пригибаний и деформаций по 21 самым крупным водохранилищам мира и Узбекистана.

Деформации определены как отношение амплитуды A_i к глубине $H_{зк}$ возможного сейсмогенного слоя земной коры в основании водохранилища

$$\varepsilon_{ij} = A_i / H_{зк} \quad (11)$$

согласно [17] и [18]. Визуальный анализ этих расчетов по зависимостям (2) и (3) и по модели (4)-(10) и (11) - при интенсивном изменении амплитуд пригибания деформации остаются соответствующими предельным тектоническим очаговым деформациям.

Известно, что деформация в очаге при Ташкентском землетрясении 1966 года с магнитудой $M=5.2$ оценена $\varepsilon_{ташк} \approx 1,9 \times 10^{-4}$ [22]. Как выявлено в работах И.Б.Яковлевой, Г.П.Меденцевой в зоне Гиссаракского водохранилища и Л.М.Плотниковой, М.Г.Фленовой, В.И.Махмудовой в зоне Чарвакского водохранилища подобные смещения могут обуславливать сильные изменения фоновой сейсмичности [23,24].

Таблица 2. Изменения параметров давления, пригибания и возможных деформаций зон крупных водохранилищ мира по эмпирическим оценкам

№	Водохранилища	$\Delta F_i \times 10^4$ (кг)	$\Delta h_i \times 10^2$ (см)	ΔA_{1i} (см)	ΔA_{2i} (см)	$H_{ср} \times 10^6$ (см)	$\varepsilon_{ij} \times 10^{-5}$
1	Койна (Индия, 1961)	7,5	8,5	6,86	6,90	1,5	0,46
2	Насер (Египет, Судан, 1970)	8,5	9,5	7,72	7,60	1,5	5,11
3	Красноярское (Россия, 1967)	9,0	10,0	8,94	8,10	1,5	5,40
4	Синьфен (Китай, 1959)	9,5	10,5	9,74	9,53	1,5	6,35
5	Братское (Россия, 1967)	9,5	10,5	9,82	9,53	1,5	6,35
6	Усть-Илимское (Россия, 1977)	9,5	10,5	9,84	9,53	1,5	6,35
7	Андижан (Узбекистан, 1978)	10,5	11,5	10,45	10,65	1,5	7,10
8	Нагарджуна Сагар (Индия, 1967)	11,4	12,4	11,12	11,54	1,5	7,69
9	Кариба (Замбия, Зимбабве, 1963)	11,6	12,6	11,17	11,92	1,5	7,94
10	Гиссарак (Узбекистан, 1986)	13,8	13,8	12,29	12,35	1,5	8,23
11	Кремаста (Греция, 1966)	15,0	16,0	12,15	12,85	1,5	8,56
12	Чарвак (Узбекистан, 1970)	15,8	16,8	14,22	14,33	1,5	9,55

13	Тупаланг (Узбекистан, 1984)	17,0	18,0	15,83	15,89	1,5	10,59
14	Итайпу (Бразилия, 1991)	18,6	19,6	17,08	16,78	1,5	11,19
15	Дворжак (США, 1973)	20,9	21,9	19,06	18,87	1,5	12,58
16	Гувер (США, 1935)	21,0	22,0	20,00	22,15	1,5	14,77
17	Саяно-Шушенское (Россия, 1987)	21,0	22,0	22,24	22,15	1,5	14,77
18	Мид (Колорадо, США, 1936)	21,1	22,1	23,03	24,46	1,5	16,31
19	Вайонт (Италия, 1959)	25,2	26,2	24,26	25,00	1,5	16,67
20	Ингурская ГЭС (Грузия, 1978)	26,1	27,1	25,05	26,73	1,5	17,82
21	Нурекское (Таджикистан, 1979)	29,4	30,4	28,29	29,34	1,5	19,56

Условные обозначения в таблице 2: ΔF_i (кг) – вариация давления в основании водохранилища; $\Delta h_i \times 10^2$ (см) – высота нагрузки; ΔA_{1i} – амплитуда смещения (см); $\varepsilon_{ij} = A_i / H_{зк}$ – деформация; H_c $\times 10^6$ (см) – глубина до сейсмогенного слоя земной коры ($\approx 15 \times 10^6$ см).

В.В.Тетельманом и Э.Р.Даниеловым показано [21], что «...созданное арочной плотиной Гувер на р. Колорадо (США) водохранилище имеет объем 35 млрд.м³. В 1935 г. до начала заполнения водохранилища была проведена высокоточная геодезическая съемка по нескольким линиям, общая длина которых составила более 1000 км. С 1939 г. гидроузел эксплуатируется при проектном напоре 220 м. В 1950 г. было проведено повторное нивелирование, которое показало, что общий прогиб земной коры от веса водохранилища составил **170 мм**, а в 1963 г. – **200 мм**. Земная поверхность на расстоянии 50 км северо-западнее от водохранилища дала осадку в **30 мм**. Радиус воронки оседания (прогиба) земной поверхности в этом направлении простирается примерно на расстояние **R = 70 км** от уреза водохранилища. Погружение поверхности земной коры захватило площадь **30 тыс. км²**, что на два порядка больше площади водного зеркала...» [18,19]. Приведённые примеры являются убедительным доказательством реальности существования техногенных движений от эксплуатации крупных водохранилищ. Этому должны способствовать дальнейшие исследования по организации геодинамического мониторинга для оценки напряженно-деформированного состояния недр зон водохранилищ.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования для оценки деформаций геодезическими измерениями в ближней зоне водохранилищ показали, что при эксплуатации крупных водохранилищ его основание и чаща находятся в постоянно действующих нагрузках сжатия и растяжения, соответствующей интенсивности амплитуд пригибания основания от вариации объема. Деформации основания могут соответствовать предельным тектоническим очаговым деформациям, непосредственно влияющим на регулярное НДС состояние, и общим геодинамическим движениям близлежащего сейсмогенного слоя земной коры (в пределах зоны активного влияния водохранилищ). В результате расчета и анализа деформационных процессов под действием техногенных нагрузок на основания эксплуатируемых водоемов определены дополнительные смещения и деформации, возникающие при эксплуатации водохранилищ. Показана существенная зависимость смещений основания от изменения давления при вариациях объема воды и соизмеримость дополнительных деформаций основания с очаговыми при землетрясениях.

Работа направлена на обеспечение выполнения задач пункта 9 Приложения №1 Постановления Президента Республики Узбекистан от 30.07.2020 года №ПП-4794 «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий Республики Узбекистан». Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства инновационного развития (гранты №ФА-Ф-8-008 и № ПЗ-2017091115 на 2017-2020 годы) и в рамках Концепции Академии наук Республики Узбекистан по фундаментальным и прикладным исследованиям на 2021-2024 годы.

Литература

1. 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.

2. 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.

3. Гупта Х., Растоги Б. Плотина и землетрясения. Перевод с английского О.А. Корчагиной и М.М. Мешкова под ред. д. г.-м. н., проф. Г.С. Золотарева. Из-во «Мир», М.: 1979. – 251 с.
4. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Мусаев М.А., Идармачев И.Ш. Оценка деформаций земной коры в районе Чирекской ГЭС в результате сезонных нагрузок от водохранилищ. // Инженерная геология.- №2.-2015.-С.52-57.
5. Хамидов Л.А., Алимухамедов И.М., Хамидов Х.Л., Артиков Ф.Р., Ганиева Б.Р., Анварова С.Р., Ибрагимов Ф.И. Модели вариации напряженно-деформированного состояния земной коры основания крупных водохранилищ влияющих на локальную геодинамику зон их активного влияния.// J.Seismologiya muammolari.-№2 (2),-2020.- С.52-62.
6. Ташлыкова Т.А., Рященко Т.Г. Возбужденная сейсмичность при создании водохранилищ: анализ первых фактов и возможных причин // Инженерная защита. 2015. № 6. -С. 98–104.
7. Тимофеев В.Ю., Арнаутов Г.П., Талиев С.Д., Ю.К. Сарычева, Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, Л. В. Анисимова, А. А. Жданов Изучение современных движений земной коры в районах крупных водоемов юга Сибири методом регистрации водного уровня //Геология и геофизика.-1997.-Т.38,№12.-С.1993-2000.
8. Rothe J.P. Seismic artificials // Tectonophysics. 1970. V. 9. № 2.- P. 215–238.
9. Хамидов Л.А. Поля напряжений на основаниях водохранилищ. // Проблемы сейсмологии в Узбекистане-Ташкент: ИС АН РУз,2015.-№12.-С. 14-19.
10. 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>
11. Савич А.И., Газиев Э.Г. Влияние трещинной воды в скальных основаниях на их напряженно-деформированное состояние.// Геомеханика в горном деле.- Доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 1-3 октября 2013г.- Екатеринбург.- С.25-35.
12. Особенности развития деформационных процессов в основании арочной плотины Ингури ГЭС / А. И. Савич и др. // Сборник научных трудов / Гидропроект. – Вып. 103. – М., 1985.- 180с.
13. Особенности влияния водохранилищ на скальные основания больших плотин /А.И.Савич и др.//Гидротехническое строительство.–2003. – № 3.-С.34-41.
14. Vertical displacement of rock foundation at Ingouri arch dam during 1st stage filling of reservoir / E. Gaziev et al // «Field Measurements in Geomechanics»: International Symposium: Vol. 2 / Swiss Federal Institute of Technology. – Zürich, 1983.-P.23-34.
15. Савич А. И. Влияние водохранилищ на поведение скальных массивов оснований высоких плотин / А. И. Савич, Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 11.-С.42-48.
16. Газиев Э. Г. Скальные основания бетонных плотин / Э. Г. Газиев. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005.-С.47-56.
17. Тетельман В.В. Фактор прогиба земной коры в большой гидроэнергетике.// <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/cef/Vladimir-Tetelmin.pdf>
18. Хамидов Л.А., Алимухамедов И.М., Артиков Ф.Р., Хамидов Х.Л. Параметры оценки локальной геодинамики ближних зон водохранилищ. // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле” Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5-9 октября 2020 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2020. С.571-578.
19. Хамидов Л.А., Алимухамедов И.М., Артиков Ф.Р., Хамидов Х.Л. Параметры оценки локальной геодинамики ближних зон водохранилищ. // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле” Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5-9 октября 2020 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2020. С.571-578.
20. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. Of London A221. 1921. pp. 163-197.
21. Тетельман В.В., Даниелов Э.Р. Прогиб земной коры от веса крупных водохранилищ.// Геотехнология.- Изв.РАЕН.-2014.-№4.-С.15-20.
22. Ташкентское землетрясение 1966 года.- Ташкент:Фан.- 1970.- 370с.
23. Яковлева И.Б., Меденцева Г.П. Сейсмичность района Гиссаракского водохранилища //Новые данные по сейсмологии и сейсмогеологии Узбекистана.- Т: Фан, - 1974.- С.77-90.
24. Плотникова Л.М., Фленова М.Г., Махмудова В.И. Методика и результаты разработки Газлийского месторождения на проявления сейсмичности // Наведенная сейсмичность.- М.: Наука.- 1994.- С.222-240.

Mundarija	sah.
Rebetskiy Yu.L., Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzayev M.A. O'zbekiston hududi yer qobig'ining kuchlangan holatini uzlukli siljishlarini kataklastik uslub asosida tahlil qilish	3
Mo'minov M.Yu., Sagdullaeva K.A., Narxojaeva N., Mirzoidov M.Z. O'zbekistonning seismofoal hududlarida yer magnit maydonining anomal o'zgarishlari	24
Sodiqov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A. Matematik modellashtirish natijalari bo'yicha g'arbiy Tyan-Shanning yuqori qobig'idagi bloklarning kinematikasi	38
Otabaev D.X., G'oipov A.B., Otaboiev B.D. Janubiy Tyan-Shanning chuqur geologo-geofizik modeli (g'arbiy O'zbekiston)	45
Ibragimov A. X. Binolar va inshootlarning seysmik chidamliligini baholashning zamonaviy usullarini ko'rib chiqish	52
Hamidov L.A., Ganiyeva B.R. Katta suv omborlari zonalari poydevorining suv hajmi o'zgaruvchanligidagi deformatsiyasi.	60
Содержание	стр.
Ребецкий Ю.Л., Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Исследование напряженного состояния земной коры территории узбекистана методом катакlastического анализа разрывных смещений	3
Муминов М.Ю., Сагдуллаева К.А., Нарходжаева Н.М., Мирзоедов М.З. Аномальные вариации геомагнитного поля в сейсмоактивных районах Узбекистана.	24
Садыков Ю.М., Атабеков И.У., Нурматов У.А. Кинематика блоков верхней части земной коры западного Тянь-Шаня по результатам математического моделирования	38
Атабаев Д.Х., Гоипов А.Б., Атабаев Б.Д. Глубинная геолого-геофизическая модель южного Тянь-Шаня (западный Узбекистан)	45
Ибрагимов А.Х. Обзор современных методов оценки сейсмостойкости зданий и сооружений	52
Хамидов Л.А., Ганиева Б.Р. Деформация основания зон крупных водохранилищ при вариации объема воды	60
Content	Page
Rebetsky Yu.L., Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. : Research of the uzbekistan territory earth's crust stress state by methods of cataclastic analysis of displacements along fault sets	3
Muminov M.Yu., Sagdullaeva K.A., Narkhodzhaeva N.M., Mirzoidov M.Z. . Anomalous variations of the geomagnetic field in the seismoactive regions of Uzbekistan.	24
Sadiqov Yu.M., Atabekov I.U., Nurmatov U.A. Kinematics of blocks in the upper crust of the western tian-shan by the results of mathematical modeling	38
Atabaev D. Kh., Goipov A. B., Atabaev B. D. Deep geological and geophysical model of the southern tien shan (western Uzbekistan).	45
Ibragimov A.Kh. Overview of modern methods for assessment of seismic resistance of buildings and structures	52
Khamidov L.A., Ganieva B.R. Deformation of the base of the zones of large reservoirs with varying water volume	60

SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

SEISMOLOGY PROBLEMS

№ 1, том 3, 2021

Мусаххих Д.Усманова (ўзбек, рус).

Компьютерная верстка. В.Р.Юсупов

Формат 80-64 1/8 Усл. печ.л. 3,8. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Бизнес Полиграф

Ташкент, Чиланзар, ул. Козиробот, 65.

Обуна индекси (подписной индекс) 1351