

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра Геофизики и сейсмологии

Курилова Ольга Константиновна

Вариации геофизических параметров очаговых зон сильных
землетрясений алматинского сейсмоактивного района

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

специальность 7М05302 – Сейсмология

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра Геофизики и сейсмологии

УДК 550.834

На правах рукописи

Курилова Ольга Константиновна

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание академической степени магистра

Название диссертации

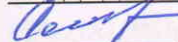
Вариации геофизических параметров
очаговых зон сильных землетрясений
Алматинского сейсмоактивного
района

Направление подготовки

7M05302 – Сейсмология

Научный руководитель

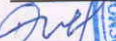
кандидат технических наук

 Степаненко Н.П.

« 12 » января 2024 г.

Рецензент

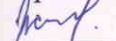
кандидат физ-мат. наук

 Белослудцев О.М.

« 12 » января 2024 г.

Нормоконтроль

преподаватель

 Кисеева И.

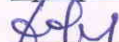
« 17 » января 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

доктор технических наук,

профессор

 Ратов Б.Т.

« 17 » января 2024 г.

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАНА

Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет
имени К.И. Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра Геофизики и сейсмологии

7M05302 - Сейсмология



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
доктор техн. наук, профессор

Ратов Б.Т.

« 17 » 01 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Куриловой Ольге Константиновне
Тема: Вариации геофизических параметров очаговых зон сильных землетрясений Алматинского сейсмоактивного района
Утверждена приказом №482-м от «05» апреля 2022г.
Срок сдачи законченной диссертации « 17 » апреля 20 24 г.
Исходные данные к магистерской диссертации: Каталоги землетрясений; программное обеспечение VELEST, Golden Software Surfer, EXSEL.
Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:
1) Разработка и анализ объемной скоростной модели Алматинского сейсмоактивного района
2) Анализ геофизических параметров до и после сейсмических событий
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): Презентация магистерской диссертации в объеме 18 слайдов .pdf формате

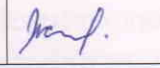
ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение, актуальность, цель работы, новизна исследований	Сентябрь-ноябрь, 2023г	Выполнено
1.Геолого-геофизические условия формирования коровой сейсмичности	Сентябрь, 2023г	Выполнено
2.Современный этап изучения неотектонического строения земной коры юго- востока Казахстана	Октябрь, 2023г	Выполнено
3.Краткий обзор геофизических исследований на юго- востоке Казахстана	Октябрь, 2023г	Выполнено
4.Краткий обзор результатов изучения вариаций скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений методом до и после сейсмического события зарубежными и казахстанскими учеными	Октябрь-ноябрь, 2023г	Выполнено
5.Современный этап сейсмологических исследований	Октябрь-ноябрь, 2023г	Выполнено
6.Вариации скоростных параметров в очаговых зонах характеристических землетрясения Алматинского сейсмоопасного района	Октябрь-декабрь, 2023г	Выполнено
Заключение, аннотация	Декабрь, 2023г	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты	Дата подписания	Подпись
Введение, актуальность, цель работы, новизна исследований	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	03.11.2023	
1.Геолого-геофизические условия формирования коровой сейсмичности	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	29.09.2023	
2.Современный этап изучения неотектонического строения земной коры юго-востока Казахстана	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	20.10.2023	
3.Краткий обзор геофизических исследований на юго-востоке Казахстана	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	20.11.2023	
4.Краткий обзор результатов изучения вариаций скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений методом до и после сейсмического события зарубежными и казахстанскими учеными	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	20.11.2023	
5.Современный этап сейсмологических исследований	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	30.11.2023	
6.Вариации скоростных параметров в очаговых зонах характеристических землетрясения Алматинского сейсмоопасного района	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	15.12.2023	
Заключение, аннотация	Н.П. Степаненко, кандидат технических наук	29.12.2023	
Нормоконтролер	Ш. Кисеева, преподаватель	17.01.2024	

Научный руководитель



Степаненко Н.П.

Задание принял к исполнению обучающийся



Курилова О.К.

Дата

« 29 » января 2024 г

АННОТАЦИЯ

Алматы сейсмобелсенді ауданының және Алматы қаласының аумағы әлемнің сейсмикалық қауіпті аймақтарының бірінде, 6-дан 9 баллға дейін және одан да көп күтілетін жер сілкіністерінің максималды қарқындылығы ықтимал қауіпті сейсмогендік аймақтарға жақын орналасқан.

Сейсмикалық оқиғалардың жазбалары жер қыртысындағы терең процестер туралы тікелей ақпарат береді. Жер қыртысын зерттеудің сейсмикалық әдісі әрқашан тірек болып табылады, өйткені бойлық және көлденең жылдамдықтардың мәндері ортаның нәзік құрылымдық және динамикалық гетерогенділігін, блоктардың белсенді ақаулары мен қозғалғыштығын, жасырын сейсмогендік құрылымдардың кеңістіктік орналасуын анықтауға және ақырында жер қыртысының шиеленіскен күйін бағалауға ықпал ететін маңызды ақпаратты алып жүреді. Сейсмикалық зерттеу әдістерін дамыту, атап айтқанда сейсмотомография арқылы геологиялық ортаны зерттеу жер қыртысы мен мантияның терең құрылымдарын зерттеудің жаңа мүмкіндіктерін ашады. Диссертациялық жұмыста ұсынылған «VELEST» алгоритмі (автор E. Kissling, Institute of Geophysics, Zuerich) үш өлшемді кеңістіктегі кинематикалық деректер бойынша Алматы сейсмикалық қауіпті ауданының жер қыртысының терең құрылымын анықтауға мүмкіндік беретін математикалық құрал болып табылады.

Бойлық және көлденең толқындарының жылдамдық вариацияларын, қатынастарын бақылаудың сейсмотомография әдісімен сейсмикалық белсенділікті болжау үшін негізгі мүмкіндігі зерттелді, бұл үлкен жер сілкіністерінің ошақтық аймақтарында жылдамдық параметрлерінің кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл әдіс егжей-тегжейлі профильдік және аумақтық бақылау жүйелерінде әртүрлі поляризация толқындарының кинематикалық және динамикалық сипаттамаларын неғұрлым толық пайдаланудың жоғары дәлдігі мен маңызды мүмкіндіктеріне ие.

АННОТАЦИЯ

Территория Алматинского сейсмоактивного района и непосредственно г. Алматы расположены в одном из сейсмоопасных регионов мира, вблизи потенциально опасных сейсмогенерирующих зон с максимальной интенсивностью ожидаемых землетрясений от 6 до 9 и более баллов.

Записи сейсмических событий несут непосредственную информацию о глубинных процессах в земной коре. Сейсмический метод изучения земной коры всегда является опорным, так как значения продольных и поперечных скоростей несут важную информацию, которая способствует выявлению тонких структурных и динамических неоднородностей среды, активизированных зон разломов и подвижностей блоков, пространственного положения скрытых сейсмогенных структур и, наконец, оценку напряженного состояния земной коры. Развитие сейсмических методов исследований, а именно изучение геологической среды с помощью сейсмотомографии, открывает новые возможности изучения глубинных структур земной коры и мантии. Предложенный в диссертационной работе алгоритм «VELEST» (автор E. Kissling, Institute of Geophysics, Zuerich) представляет собой математический инструмент, позволяющий определять глубинное строение земной коры Алматинского сейсмоопасного района по кинематическим данным в трехмерном пространстве.

Исследована принципиальная возможность использования мониторинга вариаций скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, отношения V_p/V_s для прогноза сейсмической активности с помощью метода 4D сейсмотомографии, позволяющего отобразить пространственно-временные изменения скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений. Этот метод обладает высокой точностью и значительными возможностями более полного использования кинематических и динамических характеристик волн разной поляризации при детальном профилейных и площадных системах наблюдений.

ANNOTATION

The territory of the Almaty seismically active region and the city of Almaty itself are located in one of the earthquake-prone regions of the world, near potentially dangerous seismogenerating zones with a maximum intensity of expected earthquakes from 6 to 9 or more points.

Records of seismic events provide direct information about deep processes in the Earth's crust. The seismic method of studying the earth's crust is always a reference one, since the values of longitudinal and transverse velocities carry important information that helps to identify subtle structural and dynamic inhomogeneities of the environment, activated fault zones and block mobility, the spatial position of hidden seismogenic structures and, finally, an assessment of the stress state of the Earth's crust. The development of seismic research methods, namely the study of the geological environment using seismotomography, opens up new opportunities for studying the deep structures of the Earth's crust and mantle. The «VELEST» algorithm proposed in the dissertation (author E. Kissling, Institute of Geophysics, Zuerich) is a mathematical tool that allows you to determine the deep structure of the Earth's crust of the Almaty earthquake-prone area from kinematic data in three-dimensional space.

The principal possibility of using the monitoring of velocity variations of longitudinal and transverse waves, the ratio for predicting seismic activity using the seismotomography method, which allows displaying spatiotemporal changes in velocity parameters in focal zones of strong earthquakes, is investigated. This method has high accuracy and significant possibilities for more complete use of the kinematic and dynamic characteristics of waves of different polarization in detailed profile and area observation systems.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	12
1 Геолого-геофизические условия формирования сейсмичности	
1.1 Краткий обзор геологической изученности района исследований	15
2 Современный этап изучения неотектонического строения земной коры юго-востока Казахстана	
2.1 Геотектоническая характеристика	18
2.2 Основные разрывные нарушения Алматинского сейсмоактивного района	24
2.3 Разработка цифровой карты тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района	26
3 Краткий обзор геофизических исследований на юго-востоке Казахстана	
3.1 Этапы развития сети сейсмических станций в регионе	31
3.2 Скоростное моделирование	33
4 Краткий обзор результатов изучения вариаций скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений методом до и после сейсмического события зарубежными и казахстанскими учеными	
4.1 Исследования зарубежных ученых	41
4.2 Исследования казахстанских ученых по выявлению вариаций скоростей V_p , V_s , V_p/V_s в очаговой зоне японского землетрясения Кобе 17 января 1995 года	45
5 Современный этап сейсмологических исследований	
5.1 Обоснование постановки задачи разработки программно-математического обеспечения 4D сейсмической томографии	54
5.2 Разработка алгоритма сейсмической томографии 4D земной коры Алматинского сейсмоактивного района	55
5.3 Сейсмическая томография по данным землетрясений Алматинского сейсмоопасного района	61
6 Вариации скоростных параметров в очаговых зонах характеристических землетрясения Алматинского сейсмоопасного района	69
Заключение	77
Список используемой литературы	78

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Наименование	Обозначение	Единицы измерения
1	2	3
V_p	Скорость продольных волн	км/с
V_s	Скорость поперечных волн	км/с
M	Граница Мохоровичича	км
M	Магнитуда	-
A_{max}	Амплитуда ускорения грунтов	см/с ²
ГСЗ	Глубинное сейсмическое зондирование	-
j	Координаты землетрясения, широта	десятичные градусы
l	Координаты землетрясения, долгота	десятичные градусы
МОВЗ	Метод обменных волн землетрясений	-
КМПВ	Корреляционный метод преломленных волн	-
МСК-64 (К)	Международная шкала сейсмической интенсивности	балл
KNDC; PDGK	Сейсмические станции наблюдений	-
К-43-VI	Номенклатура листов геологической карты	-

ВВЕДЕНИЕ

Территория Алматинского сейсмоактивного района и непосредственно г. Алматы расположены в одном из сейсмоопасных регионов мира, вблизи потенциально опасных сейсмогенерирующих зон с максимальной интенсивностью ожидаемых землетрясений от 6 до 9 и более баллов по шкале MSK-64(K). Исследуемая территория, является одним из примеров континентального орогенеза, появившегося в результате сжатия, которое обусловлено коллизией между Индийской и Евразийской плитами. Сейсмическая активность региона напрямую зависит от своеобразия геологического развития Северного Тянь-Шаня и связана с формированием блочного строения рельефа, а также с неоднократными перестройками, когда на месте впадин формировались поднятия или на месте поднятий-впадины. Для участков с переменным знаком формирования рельефа характерна высокая сейсмичность.

В то же время, несмотря на прогнозируемый высокий уровень сейсмичности, крупные землетрясения редки, но разрушительны по своей силе. Периодичность землетрясений не линейна и носит скорее «гнездовой» характер, есть периоды активности и относительного затишья. В конце XIX и начале XX задокументированы такие разрушительные землетрясения, как Верненское (1887 г.), Чиликское (1889 г.), Кеминское (1911 г.), которые нанесли колоссальный ущерб г. Алматы. В последнее время сильных разрушительных землетрясений не происходит, но фиксируются землетрясения средней магнитуды Капчагайское (2011г.), Торайгырское (2012 г.), Сарыжаское (2013 г.) и др., а также общая фоновая сейсмичность. Наблюдается стабильность во времени организации фоновой сейсмичности и иерархия тектонических процессов по скорости проявления сейсмичности, которая соответствует блоковому строению данного региона.

Практика сейсмологических исследований районов, где произошли крупные и разрушительные землетрясения, показывает, что отдельные близко расположенные блоки земной коры различно реагируют на сейсмические воздействия, изменяя физические свойства среды.

Моделирование закономерностей развития сейсмического процесса, вследствие изменений состояния геофизической среды, основывается на принципах, как случайного распределения сейсмических событий, так и пространственно-временной его упорядоченности. Основной задачей современной сейсмологии является выявление закономерностей геофизических параметров при подготовке сейсмических процессов и общих геологических условий региона с целью уточнения сейсмической опасности готовившихся сейсмических событий. Изучение распределения и изменения геофизических параметров в пространстве, поиск, выявление и уточнение прогностических критериев позволит повысить точность оценки и прогноза сейсмической опасности.

Основной объем информации в сейсмологии получают с помощью землетрясений при определении волнового поля по временным задержкам скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн на станциях записи. Только сейсмические данные землетрясений несут непосредственную информацию о глубинных процессах в земной коре. Анализ сейсмических данных в очаговых зонах позволяют отобразить пространственно-временные изменения скоростных параметров земной коры, что дает возможность использовать скоростные вариации в качестве прогностического критерия.

Один из методов прогноза землетрясений заключается в возможности обнаружить процесс подготовки еще не проявившего себя очага и выявить по близким и далеким предвестникам время формирования (пробуждения) собственно очага и фазы развивающихся очаговых зон. Пространственная приуроченность очагов сильных землетрясений и процессы их подготовки в значительной степени определяются неоднородностями физико-механических свойств среды. Без знания глубинных неоднородностей едва ли можно рассчитывать на прогресс в понимании и предсказании этих явлений. При этом ведущая роль в проведении геофизических исследований принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной интерпретации геофизических материалов[1].

Исследовалась принципиальная возможность использования мониторинга вариаций скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, отношения V_p/V_s для прогноза сейсмической активности с помощью метода 4D сейсмотомографии [2], позволяющего отобразить пространственно-временные изменения скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений. Метод обладает высокой точностью и значительными возможностями более полного использования кинематических и динамических характеристик волн разной поляризации при детальных профильных и площадных системах наблюдений.

Актуальность исследований. Один из методов прогноза землетрясений заключается в возможности обнаружить процесс подготовки еще не проявившего себя очага и выявить по близким и далеким предвестникам время формирования (пробуждения) собственно очага и фазы развивающихся очаговых зон. Пространственная приуроченность очагов сильных землетрясений и процессы их подготовки в значительной степени определяются неоднородностями физико-механических свойств среды. Без знания глубинных неоднородностей едва ли можно рассчитывать на прогресс в понимании и предсказании этих явлений. При этом ведущая роль в проведении геофизических исследований принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной интерпретации геофизических материалов.

Исследована принципиальная возможность использования мониторинга вариаций скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, отношения V_p/V_s для прогноза сейсмической активности с помощью метода

4D сейсмотомографии, позволяющего отобразить пространственно-временные изменения скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений. Этот метод обладает высокой точностью и значительными возможностями более полного использования кинематических и динамических характеристик волн разной поляризации при детальном профилейных и площадных системах наблюдений.

Цель исследования. Выявление вариаций геофизических параметров земной коры в очаговых зонах сильных землетрясений, зарегистрированных на территории Алматинского сейсмоактивного района с использованием методики 4D сейсмотомографии.

Решены следующие задачи:

- проведена обработка материалов каталога землетрясений.
- проведен анализ построения сейсмотомографической объемной структурно-скоростной модели земной коры и верхней мантии Алматинского сейсмоактивного района по данным землетрясений, зарегистрированных на сейсмостанциях региона в период с 2002- 2022гг.
- проведен анализ вариаций скоростных параметров в очаговых зонах землетрясений $M < 5,0$ до и после сейсмического события.
- выявлено распределение локальных аномалий скоростных характеристик сейсмоактивной среды, как в пространстве, так и во времени, характерных при подготовки землетрясений.

Фактический материал. В данной исследовательской работе использован материал фундаментальных и прикладных исследований Института сейсмологии МЧС РК по изучению изменения геофизической среды и связи с геолого-тектоническим строением и сейсмическим режимом Алматинского сейсмоактивного региона, полученные при непосредственном участии диссертанта. Программное обеспечение «VELEST», «Golden Software Surfer», «EXSEL».

Практическая ценность. Предложенная методика 4D сейсмотомографии позволяет выделять локальные скоростные аномалии в земной коре по данным мониторинга записей скоростей сейсмических волн, как в пространстве, так и во времени, которые связаны с формированием очагов землетрясений. Результаты исследований могут быть полезны при прогнозе сейсмических событий.

1 Геолого-геофизические условия формирования сейсмичности

1.1 Краткий обзор геологической изученности района исследований

П.П. Семенов является первым исследователем Северного Тянь-Шаня, к которому относится Алматинский сейсмоактивный район[3]. В его работах 1858, 1867, 1885 гг. приведены краткое географическое описание, орографическая схема и общие материалы по геологическому строению. Открытия П.П. Семенова являются тем каркасом, который для последующих исследователей послужил основой для дальнейшего изучения данного региона.

В 1861-1868 гг. опубликованы работы географ М.И. Венюков, а 1869-1873 выходят публикации Н.А. Северцева, где помимо ботанических данных изложены географические и геологические сведения, как для Северного Тянь-Шаня, так и для смежных районов Средней Азии.

Начиная с 1874г. На Тянь-Шане работает И.В. Мушкетов, именно ему принадлежат работы, положившие начало современным представлениям о стратиграфии и тектонике данного региона. И.В.Мушкетов изучал и опубликовал детальные исследования катастрофических землетрясений 1887 и 1889гг., где огромное внимание автор уделял вопросам сейсмотектоники и впервые выявил связь тектонических подвижек крупных блоков земной коры по зонам тектонических разломов. При изучении четвертичных отложений И.В.Мушкетов откартировал первую схему их генетического расчленения, а также выделил ряд зон крупных разломов, разделяющих горные сооружения и межгорные впадины Северного Тянь-Шаня.

С 1886-1905 гг. Тянь-Шань посетили и исследовали такие географы как А.Н. Кассин, У.М. Дэвис, В.В. Сапожников, М. Фридериксон, которые изложили данные о характере и генезисе различных четвертичных образований, современного и древнего оледенения, историю развития речных долин и др. [3].

После ряда разрушительных землетрясений 1885, 1887, 1889, 1895 гг., произошедших в данном регионе начались планомерные исследования в области сейсмического районирования. В 1891г. И.В. Мушкетов впервые проводит оценку сейсмической опасности Средней Азии по геологическим признакам. Составленная им карта базировалась на прямой зависимости между тектоникой и сольными землетрясениями.

Новый этап изучения Северного Тянь-Шаня начинается с 1927г., где, помимо геологических съемок, проводятся инструментальные сейсмологические исследования.

В 1928-1929 гг. выходят работы В.А. Николаева, положившие начало структурно-фациальному анализу и районированию территории. Примерно в это же время Н.Г. Кассин разрабатывает первую стратиграфическую схему района. Разработанная стратиграфическая схема древних толщ Северного

Тянь-Шаня без геоморфологических методов исследования имела условное расчленение, поэтому накопленный различными исследователями материал и применение разных методик позволили в конце 30-х годов прошлого столетия начать систематический выпуск обобщающих и сводных работ, по геологической изученности региона. В 1937г. С.С. Шульц назвал «неотектоническим» отрезок времени, за который был сформирован современный рельеф Тянь-Шаня. В этом же году А.Д. Архангельский и Н.С. Шатский выделили Северный Тянь-Шань в область молодых вертикальных движений, а М.М. Тетяев устанавливает глыбовый характер тектонических движений. С 50-х годов прошлого века началось планомерная геологическая съемка масштаба 1:200000. Помимо геологических работ проводятся комплексные геофизические исследования, в том числе и структурное бурение. Разработки И.В. Мушкетова продолжил Г.П. Горшков, в его работах большое внимание уделяется сейсмостатистическим данным. В результате проведения исследований крупного масштаба получен обширный новый фактический материал по стратиграфии, магматизму, тектонике, полезным ископаемым региона[3].

В 1950 г. И.Е. Губин разработал новый методический подход к вопросу сейсмического районирования, который основывался на выявлении сейсмологических критериев и связи их с современным геологическим структурным планом. Разработка И.Е. Губина была поддержана многими специалистами, в том числе В.В. Белоусовым, Г.А. Гамбурцевым, Б.А. Петрушевским, М.В. Гзовским и др.

А.В. Пейве в 1956г., рассматривая вопрос тектонической унаследованности, разрабатывает теорию о развитии глубинных разломов. В 1957 г. Д.Н. Казанли изучает связь геологического строения и сейсмичности.

Увеличение проведения комплексных геофизических работ, открытие прогностического полигона способствовало накоплению огромной инструментальной информации, анализ которой позволил по-новому подойти к проблеме сейсмичности и сейсмического районирования. С 1960-1975 гг. было предложено несколько методик по составлению карт сейсмического районирования. М.Е. Артемьева в 1973г. предложил проводить сейсмическое районирование на основе изучения изостатических аномалий и геологических критериев. Методика, предложенная Г.И. Райснером, позволяет устанавливать уровень сейсмической опасности в пределах отдельных зон.

Начиная с конца 70-х годов прошлого века, подготовлены и изданы серия «Геологическая карта Казахской ССР» 1:500000 масштаба, в том числе Геологическая карта Казахской ССР, серия Южно-Казахстанская [4]. Последней обобщающей работой геологов «Южказгеология» является монография «Геология и полезные ископаемые Юга Казахстана», вышедшая под редакцией А.Е. Шлыгина в 1991 году [5].

Огромное количество геологической маршрутной съемки и инструментальные исследования, проведенные разными

организациями, позволили накопить большое количество фактических данных о геотектонических критериях Северного Тянь-Шаня. Ряд материалов опубликован в виде геологических, геоморфологических обзорных карт, а общие вопросы тектоники представлены в сводных работах, которые, в целом, являются результатом значимого труда большого количества ученых исследователей, которые стали априорной информацией для дальнейших геофизических исследований региона[6, 7, 8, 9].

2 Современный этап изучения неотектонического строения земной коры юго-востока Казахстана

2.1 Геотектоническая характеристика

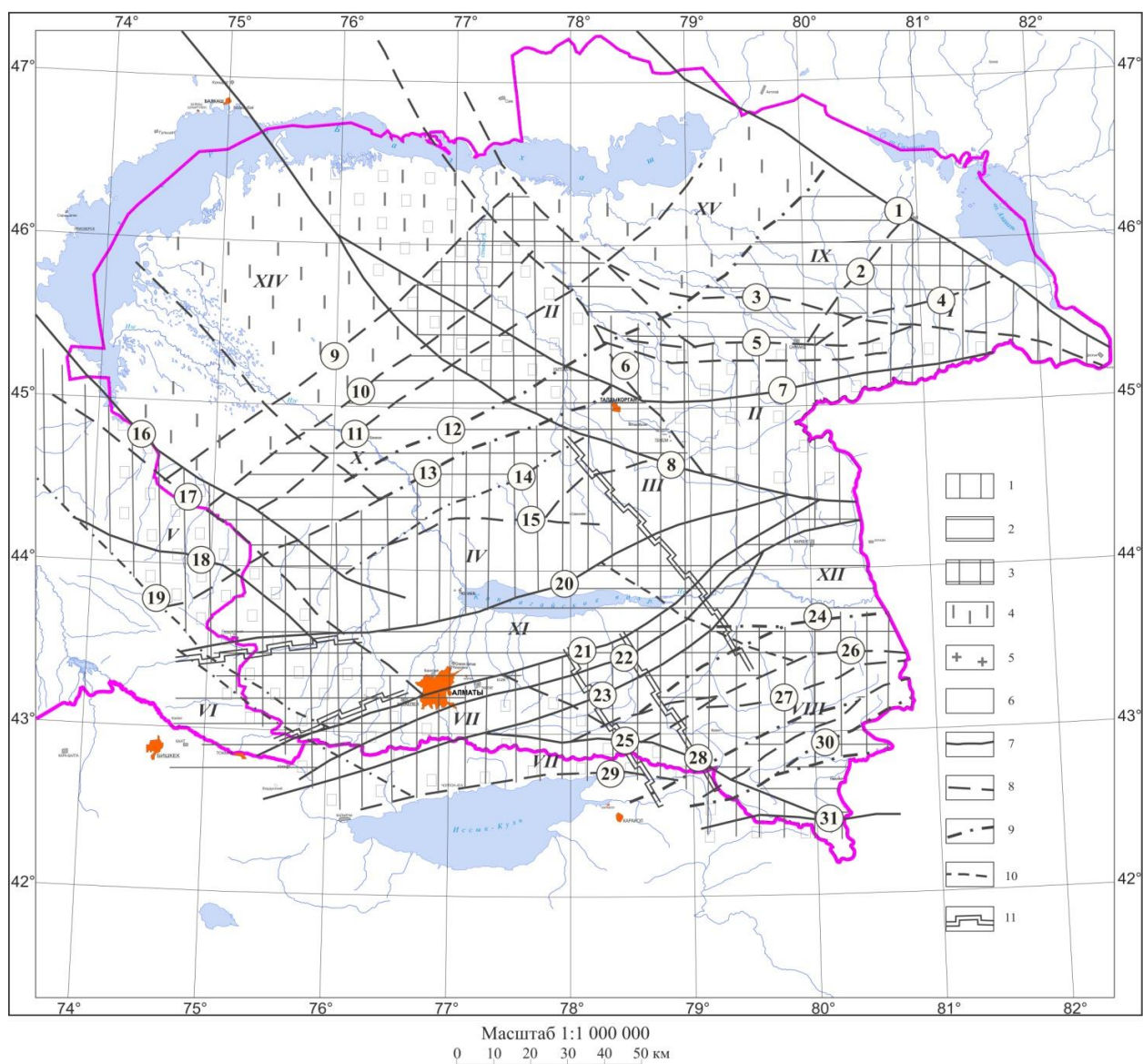
Своеобразие неотектонического развития, заключающееся в чрезвычайно быстрой и интенсивной орогенной активизации выровненных платформенных пространств, привело к тому, что сформировавшийся рельеф Северного Тянь-Шаня в значительной степени является тектоническим, то есть сформированный в результате подвижек земной коры. В большинстве случаев поднятия нашли прямое отражение в рельефе в виде хребтов, а прогибы – в виде впадин[10].

Район характеризуется сложным геологическим строением, обусловленным многообразием разновозрастных комплексов осадочных, эффузивных, метаморфических и интрузивных пород, а также повышенной интенсивностью многократно проявляющихся тектонических процессов[11]. Здесь развиты метаморфические породы протерозоя, сильно дислоцированные сложного состава толщи нижнего и среднего палеозоя, вулканогенные толщи верхнего палеозоя, разновозрастные гранитные интрузии и мощный чехол мезозойских и кайнозойских отложений во впадинах.

Интрузивная деятельность, как и эффузивная, неоднократно проявлялась на протяжении всей истории геологического развития рассматриваемого региона.

Анализ областей основной и повторной консолидации земной коры показал, что модель тектонического районирования представляется в виде системы блоков, возникших на ранних этапах геологического развития и последовательно усложнявшейся. При формировании новейших структур происходила существенная переработка палеозойского структурного плана, которая выразилась в развитии глубоких прогибов и сопряженных с ними поднятий по направлениям секущим, как палеозойские подвижные блоки, так и относительно устойчивые зоны.

Границами блоков служат разломы, многие из которых имеют большую глубину проникновения и докембрийскую эпоху заложения. Приводится краткая характеристика структурных элементов земной коры исследуемой территории, с точки зрения отличительных признаков перестройки мобильных участков морфоструктурного плана (рисунок 1).



1-4- блоки, испытавшие движения разного знака в течении неотектонического этапа: 1- преобладающих поднятий, 2- преобладающих опусканий, 3- дифференцированных движений, 4- относительно устойчивые; 5,6- типы развития палеозойского основания блоков: 5- подвижные пояса (геосинклинальные), 6- относительно устойчивые (срединные массивы); 7-10- основные зоны разломов, обновленные в неотектонический этап: 7- мантийные, 8- базальтовые, 9- гранитные, 10- неуставленной глубины проникновения в земную кору; 11- оси поперечных изгибов и смещений морфоструктур.

Названия блоков: I- Северо-Джунгарский, II- Центрально-Джунгарский, III- Южно-Джунгарский, IV- Каройский, V- Чу-Илийский, VI- Кендыктасский, VII- Кунгей-Заилийский, VIII- Кетменский, IX- Саркандский, X- Баканасский, XI- Алматинский, XII- Панфиловский, XIII- Иссык-Кульский, XIV- Балхашский, XV- Лепсинский.

Название разломов: 1- Джунгарский, 2- Алатайский, 3- Сандыктас-Чулакский, 4- Коксуатский, 5- Саркадский, 6- Западно-Джунгарский, 7- Мынчукурский, 8- Южно-Джунгарский, 9- Аяккольский, 10-

Наймансуекский, 11- Моинкумский, 12- Или-Акозекский (Такумский), 13- Бакбатинский, 14- Кокшеельский, 15- Малайсаринский, 16- Балхашский, 17- Сарытумский, 18- Жалаир-Найманский, 19- Кендыктасский, 20- Алтын-Эмельский (Илийско-Конуроленьский), 21- Алматинский, 22- Заилийский (Кемин-Ушканырский), 23- Чилик-Кеминский, 24- Чунджинский, 25- Байсорун-Чиликский, 26- Северо-Кетменский, 27- Центрально-Кетменский, 28- Северо-Кунгейский, 29- Северо-Иссык-Кульский, 30- Басулытауский, 31- Терский.

Рисунок 1 – Модель структурного плана верхней части земной коры юго-востока Казахстана

Блоки преобладающих поднятий. Кунгей-Заилийский блок включает одноименные горные хребты Северного Тянь-Шаня. Северной границей блока является Алматинский разлом, южной – Северо-Иссык-Кульский. Сам блок пересекается несколькими глубинными разломами древнего заложения (Байсорун-Чиликский, Кемин-Ушканырский, Северо-Кунгейский и др.). Реликты эпигерцинской денудационной поверхности подняты на высоту до 5 км, а суммарное смещение по отношению к фундаменту Алматинской впадины достигает 8-10 км. С северо-запада отмечается зона дифференцированных движений, в которой погружение сменилось поднятием в верхнем плиоцене. В строении Кунгей-Заилийского мегаблокогранитные массивы занимают ведущую роль, а осадочные и осадочно-вулканогенные формации встречаются в узких зонах, принадлежащих региональным разломам, но и они пронизаны многочисленными интрузиями.

Кетменский блок также имеет общее северо-восточное простирание, обусловленное направлением глубинных разломов (Северо- и Южно-Кетменским, Басулытауский и др.). Максимальная отметка пенеплена достигают чуть более 3,6 км. Максимальное суммарное смещение по отношению к фундаменту Панфиловской впадины составляет более 7 км. С севера и юга блок окаймлен зонами дифференцированных движений, где в конце плиоцена, в начале плейстоцена опускание сменилось поднятием. В этих зонах палеозойский фундамент залегает неглубоко, а в некоторых местах выходит на поверхность (горы Басулытау, Каратау).

Кетменский и Кунгей-Заилийский блоки сочленяются по разломам, вдоль которых сформировались узкие неглубокие впадины. Полоса чередования мелких блоков поднятий и опусканий расположена здесь между осями поперечных изгибов и смещений крупных структур Заилийского, Кетменского и Кунгейского хребтов.

Кендыктасский блок простирается с юго-востока на северо-запад и также ограничен глубинными разломами. Морфоструктура блока асимметрична. Вдоль Кендыктасского разлома блок приподнят больше, и эпигерцинский пенеплен здесь имеет отметку 1500-2400 м, смещение по разлому в отношении к фундаменту юго-западного фланга Алматинской

впадины достигает 1500 м. Таким образом, рассматриваемый разлом является зоной контрастного сочленения блоков с разнонаправленным знаком движений. В морфоструктуре Кендыктасского блока наблюдаются поперечные изгибы эпигерцинского пенеплена на продолжении окаймляющих Алматинскую впадину Алтын-Эмельского и Алматинского разломов. Между этими тектоническими нарушениями находится зона с пониженной мощностью земной коры, которая соединяет, аналогичные области под Алматинской и Чуйской впадинами, пересекая Кендыктасский блок, где происходит ожидаемое увеличение земной коры. В Кендыктасском блоке широко развиты интрузии гранитоидов и допалеозойские кристаллические породы. На юго-востоке в крупных тектонических блоках на среднепалеозойских отложениях залегают осадочно-вулканогенные формации карбона, пронизанные мелкими массивами гранитоидов.

Чу-Илийский блок приурочен к одноименной складчатой зоне, ограниченной Чуйским и Балхашским разломами, по которым он сочленяется с одноименными впадинами. Вдоль Балхашского разлома относительное смещение палеозойского фундамента увеличивается с северо-запада на юго-восток от 500 до 1000 м. Для разломов Жалаир-Найманской группы такая величина составляет 400-500 м. В региональном плане эпигерцинский пенеплен Чу-Илийского блока имеет наклон на северо-восток. Наибольшие отметки связаны с горами Хантау. Палеозойский фундамент представлен формациями всех этапов геосинклинального развития, пронизанных многочисленными гранитоидными интрузиями.

Каройский блок ограничен на северо-западе Бакбатинским разломом, на юго-востоке Алтынэмельским Или-Коньроленским, которые и определяют общее простирание структуры. Поверхность эпигерцинского пенеплена на плато Карой практически горизонтальна, а севернее имеет северо-западное падение. Максимальные отметки наблюдаются на хребтах Малайсары и Кокшеель и достигают 1450 м, а смещение вдоль Кокшеельского разлома по отношению к фундаменту Баканасского блока 2500-3000 м. Палеозойский фундамент Каройского блока представлен осадочно-вулканогенными формациями верхнего палеозоя, пронизан мелкими субвулканическими интрузивными телами кислого состава. Между Бакбатинским и Кокшеельским разломами выделена зона дифференцированных движений, в которой отмечаются значительные перепады высот фундамента и резкие фациальные изменения разрезов неогена и плейстоцена[12].

Северным ограничением Южно-Джунгарского блока является Южно-Джунгарский разлом, а с юго-востока – Чилик-Кеминский. Юго-западная граница проведена по линии, вдоль которой наблюдаются поперечные изгибы и смещение крупных морфоструктур (юго-западное окончание хр. Катутау – перевал Алтынэмель – долина р. Биже). Этот блок разбит на более мелкие части разломами северо-восточного направления, между которыми формировались впадины типа односторонних грабенов. Движения в них

разнонаправлены, но преобладали поднятия. С юго-востока блок ограничивается Конуроленской зоной дифференцированных движений, вовлеченных в интенсивное поднятие с верхнего плиоцена. По этой зоне Южно-Джунгарский блок сочленяется с Панфиловской впадиной.

Об интенсивности неотектонических движений в данном блоке можно судить по смещению эпигерцинской денудационной поверхности. Так, амплитуда поднятий ее над фундаментом Кугалинского грабена в горах Кызылкия составляет 2100 м, а в горах Алтынэмель – 2000 м. Размах смещения фундамента в юго-западной части Конуроленской впадины на границе с хребтом Алтынэмель достигает 3000 м.

Центрально-Джунгарский блок с юга ограничен Южно-Джунгарским разломом, а с севера – Саркандским. Западно-Джунгарский (Солдатсайский), Мынчукурский и другие разломы разделяют блок на блоки второго порядка с различной амплитудой поднятия за неотектонический период. Наибольшая величина поднятия приурочена к Джунгарскому Алатау и составляют 4000-4500 м, к периферии горного сооружения они уменьшаются. В зоне контрастного сочленения с Саркандской впадиной по одноименному разлому относительное смещение эпигерцинского пенеплена около 3000 м. На северо-запад амплитуда смещения резко уменьшается и вдоль Мулалинского разлома не превышает 500 м. Ушкаринская часть блока окаймлена зоной дифференцированных движений, ограниченной участками активизированных разломов. Здесь в плиоцене происходило медленное погружение, а со среднечетвертичного времени отмечается поднятие.

Центральная часть блока (между Сарычальдинским и Южно-Джунгарским разломами) сложена нижнее- и среднепалеозойскими формациями, пронизанными разновозрастными комплексами гранитоидов. Севернее Мынчукурского разлома развиты преимущественно морские осадочные формации девона.

Северо-Джунгарский блок находится между Саркандским, Восточно-Джунгарским и Алатайским разломами. С северо-запада в нем выделяется зона дифференцированных движений, представленная чередующимися субширотными горстами и грабенами. Значительные амплитудные смещения фундамента наблюдаются вдоль Алатайского и Джунгарского разломов, которые в свою очередь являются границами контрастного сочленения с Саркандской и Алакольской впадинами. Величина смещения на описываемом участке составляет от 2000-2500 м. Палеозойский фундамент блока сложен морскими осадочными формациями верхнего девона. Из интрузивных пород встречаются мелкие тела ультрабазитов среднего карбона.

Блоки преобладающих опусканий. Алматинский блок отождествляется с одноименной впадиной и ограничен крупными глубинными разломами: Алматинским и Алтынэмельским (Или-Конуроленским). Вдоль Алматинского разлома фундамент опущен на глубину 3200 м и ступенчато поднимается на север и к флангам. На северо-восточном фланге выделяется

зона дифференцированных движений, связанная с разломами северо-западного простираения. На юго-западном фланге аналогичная зона фиксируется между Балхашским и Кендыктасским разломами. Нижнечетвертичный комплекс осадков обнажен на поверхности и прорезан глубокими речными долинами, что свидетельствуют о поднятии данного района со среднечетвертичного периода. Фундамент этого блока представлен, по-видимому, верхнепалеозойскими осадочно-вулканогенными формациями.

Панфиловский блок ограничен с юга Чунджинский разломом, а с севера – Чилик-Кеминским. Глубина фундамента в наиболее погруженных участках составляет 3500-4000 м. В этом блоке наблюдается наиболее полные разрезы мезозоя и кайнозоя (по данным бурения). Погребенная поверхность пенеплена полого погружается на север, осложняясь небольшими уступами по разломам. С северо-запада и юга Панфиловский блок окаймлен зонами дифференцированных движений.

Баканасский блок находится в юго-восточной части Южно-Прибалхашской впадины. С северо-запада и юго-востока он ограничен Наймансуекским и Бакбатинским разломами, а на флангах Балхашским и Южно-Джунгарским. Палеозойский фундамент ступенчато понижается на юго-восток от 800 до 1500 м. Наибольшее опускание блока происходило в плиоцене-начале плейстоцена, имеющиеся многочисленные геоморфологические признаки указывают на проявление и новейших тектонических движений.

Саркандский блок протягивается с юго-запада на северо-восток между Или-Акозекским и Алатайским разломами. Мощность мезозой-кайнозойских отложений увеличивается с северо-востока на юго-запад и достигает 1200-1500 м. Поверхность фундамента поднимается на северо-восток ступенчато, что обусловлено наличием субширотных разломов. Амплитуда смещения фундамента по Саркандскому разлому ориентировочно оценивается в 3000 м. В рельефе поверхности блока имеются геоморфологические аномалии, свидетельствующие о наличии новейших тектонических дислокаций.

Относительно устойчивые блоки (Балхашский и Лепсинский) характеризуются небольшой мощностью 200-500 м кайнозойских отложений, разрез которых начинается с миоцена. Фундамент этих блоков полого погружается к горным сооружениям. О проявлении новейших тектонических движений свидетельствуют изменения мощности осадочного чехла и аномальные черты современного рельефа.

Новейшие структуры частично совпадают с палеозойскими подвижными зонами, но в неотектонический период происходит и существенная переработка древнего пенеплена, выражающая в развитии блоков поднятий, опусканий и относительно устойчивых элементов. Об этих несоответствиях структурных планов свидетельствуют и особенности блокового строения земной коры, что отражается и на разноранговой сейсмичности блоков.

2.2 Основные разрывные нарушения Алматинского сейсмоактивного района

Разрывные нарушения являются одной из существенных форм новейшей структуры рассматриваемого региона, обусловившей блоковое строение фундамента и современный орографический план. Наиболее крупные разломы контролировали развитие геологических структур длительное время, которые неоднократно подновлялись, а некоторые «залечивались» и заполнялись магматическим материалом.

В целом для Северного Тянь-Шаня характерны разломы двух направлений: восточно-северо-восточного (Тянь-Шаньского) и северо-западного (Каратауского). Близкое к этому направление имеют разломы системы хребтов Джунгарского Алатау. Перемещения блоков по ним, произошедшие в кайнозой, служат основной причиной формирования современного рельефа (рисунок 2).

Рассмотрим отдельные крупные разломы Алматинского сейсмоактивного района, которые играют важную роль в тектоническом плане исследуемой территории.

Балхашский глубинный разлом, отделяет герцинские структуры Южного Прибалхашья от каледонид Чу-Илийского пояса и простирается, по геофизическим данным, более чем на 200 км. По градиентам геофизических полей установлено крутое падение на северо-восток. Разлом выражен четкой гравитационной ступенью и отделяет повышенное гравитационное и пониженное магнитное поля Восточно-Жельтауского антиклинория от пониженного гравитационного и повышенного магнитного полей Южно-Прибалхашской впадины. С поверхности разлом контролируется интрузиями, выходами добайкальского комплекса пород и уступами в рельефе. Вертикальная амплитуда перемещений по разлому оценивается в 2500 м.

Жалаир-Найманский разлом представляет собой долгоживущий взбросо-сдвиг, имеющий падение на северо-восток под углами 70-80°. Заложен в байкальскую эпоху тектогенеза и неоднократно обновлялся. Вдоль разлома вследствие вертикальных складчато-глыбовых перемещений формировался тектонический меланж, состоящий из различных по возрасту и составу пород (гипербазитов, габброидов, диабазов, спилитов, кремнисто-глинистых сланцев, экзотических глыб известняков) в зоне дробления шириной до 5 км.

Кендыктасский разлом ограничивает с северо-востока одноименный хребет. На северо-западе он сочленяется с Жалаир-Найманским, а на юго-востоке подходит в торец к Алматинскому разлому. По Кендыктасскому разлому тектонически контактируют различные структурные этажи, включая палеозойские и кайнозойские образования.

Алматинский разлом прослеживается вдоль северного склона Заилийского Алатау и отделяет горный хребет от прилегающей с севера

одноименной впадины. В районе г. Алматы, картируется в виде субпараллельных разрывов, флексур, зон дробления и рассланцевания пород. По характеру смещений преобладают сбросы и взбросо-сдвиги, вдоль которых внедрились нижнепалеозойские основные и ультраосновные интрузии, а затем средне- верхнепалеозойские гранитоиды. По данным ГСЗ, Алматинский разлом прослеживается до глубины 55 км [12].

Чилик-Кеминская зона разлома заложена, видимо, в позднем докембрии (габброиды в составе байкальского комплекса обнажены вдоль него на юго-восточном склоне хр. Сарытау) и проявляет активность на протяжении всей геологической истории региона. В бассейне р. Чон-Кемин, например, верхнепротерозойские отложения распространены только на участках, расположенных к югу от зоны разломов (хр. Кунгей-Алатау). Блок к северу от нее в это время был приподнят и служил областью размыва. В нижнем палеозое знаки движения переменились: опустилась северная часть (которая характеризуется эвгеосинклинальным комплексом отложений); на участках, примыкающих к зоне с юга, происходило осадконакопление, характерное для внешней части геосиклинали. В девоне Чилик-Кеминская зона вновь ожила- вдоль нее по трещинам шло излияние лав и внедрение мелких субвулканических интрузий. Оживление ее наблюдалось и в более позднее время. Суммарная амплитуда горизонтальных перемещений по Чилик Кеминской зоне разломов за период от ордовика до мезозоя достигла 12-18 км. На такое расстояние смещены крылья Талгарской антиклинали.

Байсорун-Чиликский разлом подчеркивает структурно-фациальные особенности пород в смежных блоках раннегерцинского этажа. К северу от него, в Далаашикской синклинали, широко развиты эффузивыкетменской свиты, которые отсутствуют на северном склоне хр. Кунгей-Алатау.

Северо-Кунгейский глубинный разлом (крутой надвиг) также относится к долгоживущим и определяет фациальные различия примыкающих к нему структурных зон. К югу от него, в Кунгейскомантиклинории (краевая часть Иссык-Кульской глыбы), наблюдается маломощный и стратиграфически неполный разрез палеозойских отложений, тогда как севернее, в Чилик-Кеминскомсинклинории, каледонский геосинклинальный комплекс имеет мощность 3,5 км. Унаследовано развивается этот прогиб в раннегерцинское время. Мощность осадочно-эффузивных образований нижнего карбона эпикаледонской депрессии здесь составляет 2-3,7 км.

По геофизическим данным, Северо-Кунгейский разлом выделяется гравитационной ступенью, обращенной в сторону Иссык-Кульской впадины. Докембрийский фундамент в Чилик-Кеминском каледонском прогибе 6-8 км ближе к дневной поверхности, чем южнее, где указанные породы замещены более плотными гранитоидами нижнего палеозоя. О разном вещественном составе блоков земной коры, разделенных Северо-Кунгейским разломом, свидетельствуют материалы аэромагнитной съемки. К югу от него наблюдаются отрицательные магнитные поля интенсивностью 50-200 нТ, а к

северу развиты обширные положительные аномалии интенсивностью до 100-400 нТ.

Алтынэмельский разлом протягивается от Кендыктаса, где пересекает каледонские структуры, через Алматинскую впадину до Южно-Джунгарского разлома. Общая протяженность около 400 км. По данным ГСЗ, разлом прослеживается до глубины 50 км [13]. Падение его крутое к северу под углом 70-80°. Поверхность Мохо в зоне разлома образует флексурный изгиб с перепадом высот между лежащим и висячим крыльями около 4 км.

Южно-Джунгарский разлом обрамляет хр. Боро-Хоро и через Джунгарский Алатау уходит в пределы Южно-Прибалхашской впадины. Он выражен уступом в рельефе и, судя по дислокациям каменноугольных отложений, падает в северном направлении. В герцинскую эпоху по нему происходили надвиговые перемещения. Северное падение разлома подтверждается ГСЗ. В геофизических полях отмечается зоной высоких горизонтальных градиентов силы тяжести, а его северо-западная часть – линейными положительными и отрицательными аномалиями. Поверхность Мохо в зоне разлома смещена; глубина до нее в лежащем боку составляет около 40 км, в висячем – 55 км. Геологическими методами в Южной Джунгарии разлом картируется на протяжении 200 км, а геофизическим – ещё на 300 км в Южно-Прибалхашской впадине.

Мынчукурский разлом выражен зонами брекчирования, окварцевания, гематизации, тектоническими уступами, дайками гранит-порфиров, отрицательными формами рельефа. Он обрамляет с севера полосу крупных меформационных интрузивных массивов, выделяя приподнятый Мынчукурский блок, и играет существенную роль в современном рельефе. По геофизическим данным вдоль разлома отмечен флексурный изгиб поверхности Мохо, а под платформенным чехлом бурением установлен значительный перепад высот палеозойского фундамента, уменьшающийся на северо-запад от 1000 м до 500-200 м.

Сандыктас-Чулакский разлом протягивается от Джунгарских ворот почти на 200 км и западнее уходит под кайнозойские отложения Северо-Джунгарской впадины, где прослеживается геофизическими методами. Азимут простирания разлома меняется от 300° до 280°, а иногда становится широтным. Он фиксируется зонами брекчий, окварцевания, отрицательными формами рельефа, местами включая дайки интрузивных пород, Вертикальные перемещения по разрыву составляют сотни метров.

Восточно-Джунгарский (Алакольско-Джунгарский, Главный Джунгарский) – крупнейший линейament, уходящий за пределы Джунгарского Алатау, имеет длительную историю развития и глубокое заложение.

2.3 Разработка цифровой карты тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района

Более детальная информация о внутриблоковом дроблении геологических структур рассматриваемой территории, получена при создании цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района в рамках проекта ТОО «Института сейсмологии» по теме ПЦФ: «Комплексные исследования сейсмоопасных районов юго-востока Казахстана и разработка основы системы раннего предупреждения о сильных землетрясениях» 2019-2021 гг. Работа проведена с участием автора диссертации и опубликована [14].

Для векторизации тектонических разломов и создания электронных картографических моделей в качестве фактического материала использовались данные геолого-геофизического картирования, дешифрирования аэрофотоснимков, отчеты пеших топографических и геологических съемок, а также отчеты геолого-геофизических исследований Илийской экспедиции.

В ходе исследований собран геолого-тектонический и геофизический материал по Алматинскому сейсмоактивному району, преимущественно в пределах номенклатур листов масштаба 1:200000 К-43-V, К-43-VI, К-43-XI, К-43-XII (Казахстан), К-43-XVII, К-43-XVIII (Киргизия).

Для удобства расчета географических характеристик: длины, азимута простирания, и координат вершин сегментов, в качестве единицы измерения выбраны метры, организация карты произведена в проекции Гаусса-Крюгера, Пулково 1942.

Сведения о разломах различны по объему и характеристикам, с повторяющимися или неполными данными. Специфика геологических съемок, состоящая из субъективных оценок наблюдателей, часто неоднозначна, что влияет на достоверность исходной информации. Это касается и графических материалов, так как разные исследователи, исходя из собственных взглядов, предлагают различные варианты карт. Учитывая это, в цифровую карту внесены и увязаны все имеющиеся графические материалы. Отбор достоверной информации по объектам совершался путем накопления, как картографического материала, так и различных отчетных данных.

При детализации разломов откорректировано пространственное положение существующих векторных объектов и их сегментация, если на это указывают новые источники. Выделенные деформации являются фрагментами более крупных по значению систем и имеют подчиненное значение по простиранию.

Таблица 1 – Атрибутивные данные разломов

Содержание поля	№ поля	Наименование поля	Тип данных	Примечание
Тип объекта	1	тип	Text	заполняется согласно литературным данным, данным геологических съемок
Номер объекта внутри системы по порядку	2	номер_разлома	Float	порядковое число
Наименование объекта	3	наименование	Text	заполняется согласно литературным данным, может иметь одно или несколько названий
Кинематика объекта	4	кинематика	Text	данные геологических съемок, данные инструментальных съемок
Глубина	5	глубина	Text	заполняется согласно литературным данным, по данным бурения
Азимут простираения, град.	6	азимут_пр	Text	угол в пределах от 270° до 360° и от 0° до 90°
Азимут падения, град.	7	азимут_пад	Float	угол в пределах от 0° до 360°
Угол падения объекта, град	8	угол_падения	Text	угол в пределах от 0° до 90°
Долгота 1 конца объекта	9	координатаX1	Double	метры
Широта 1 конца объекта	10	координатаY1	Double	метры
Долгота 2 конца объекта	11	координатаX2	Double	метры
Широта 2 конца объекта	12	координатаY2	Double	метры
Длина объекта	13	длина,м	Float	действительное число
Географическая принадлежность	14	геопринадлежность	Text	заполняется согласно литературным данным, данные геологических съемок
Степень активности	15	активность	Text	заполняется согласно литературным источникам, данные инструментальных съемок
Литературные источники	16	литература	Text	использованные литературные данные

Отбор и анализ достоверной информации по объектам совершался путем накопления, как картографического материала, так и различных отчетных данных, как архивных, так и современных работ. Каждый объект базы данных имеет общие объективные атрибуты, к ним относятся общие сведения о разломе: название, географические данные, кинематика разрывного нарушения, а также сведения об источниках информации. Неравномерность распределения различных тектонических деформаций и крупных разрывов сплошности пород, которая относится к их распространению, ориентированности в пространстве и времени

возникновения, отчасти связана с изменениями литологического состава отложений но, однако часто она четко выражена в литологически одинаковых и одновозрастных породах и обусловлена неоднородностью механических условий в земной коре. Эта неоднородность проявляется настолько резко, что тектонические разрывы расположенные вблизи по-разному ориентированы в пространстве, имеют различный характер и возраст.

Разработанная методика классификации разломной тектоники исследуемого района, позволила обобщить объемный и детальный материал, многих ученых, в формат, который будет удобным для сопоставления с другими материалами и пригодным для всестороннего анализа (таблица 1).

При накоплении новых сведений и материалов база данных может непрерывно уточняться и обновляться, интерпретируя материалы по выбранной методике.

В процессе работ на основании изменения географического простирания сейсмического режима, структурного плана разломы сегментированы. Протяженность картированных сегментов разломов определяется не только, длиной отдельного сейсморазрыва и их соотношением в пространстве, но и сохранностью деформаций в рельефе.

В итоге количество сегментов разломов на территории Алматинского района составило 4488 из них: неоразломов, выраженные на поверхности – 2365 и подчехольных, неоразломы, скрытые под осадочным чехлом – 1124; в группе палеоразломов 844 сегмента из них 708 – палеоразломы, выраженные на поверхности и 136 – палеоразломы, скрытые под осадочным чехлом; надвигов – 155.

Цифровая карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района представлена на рисунке 2.

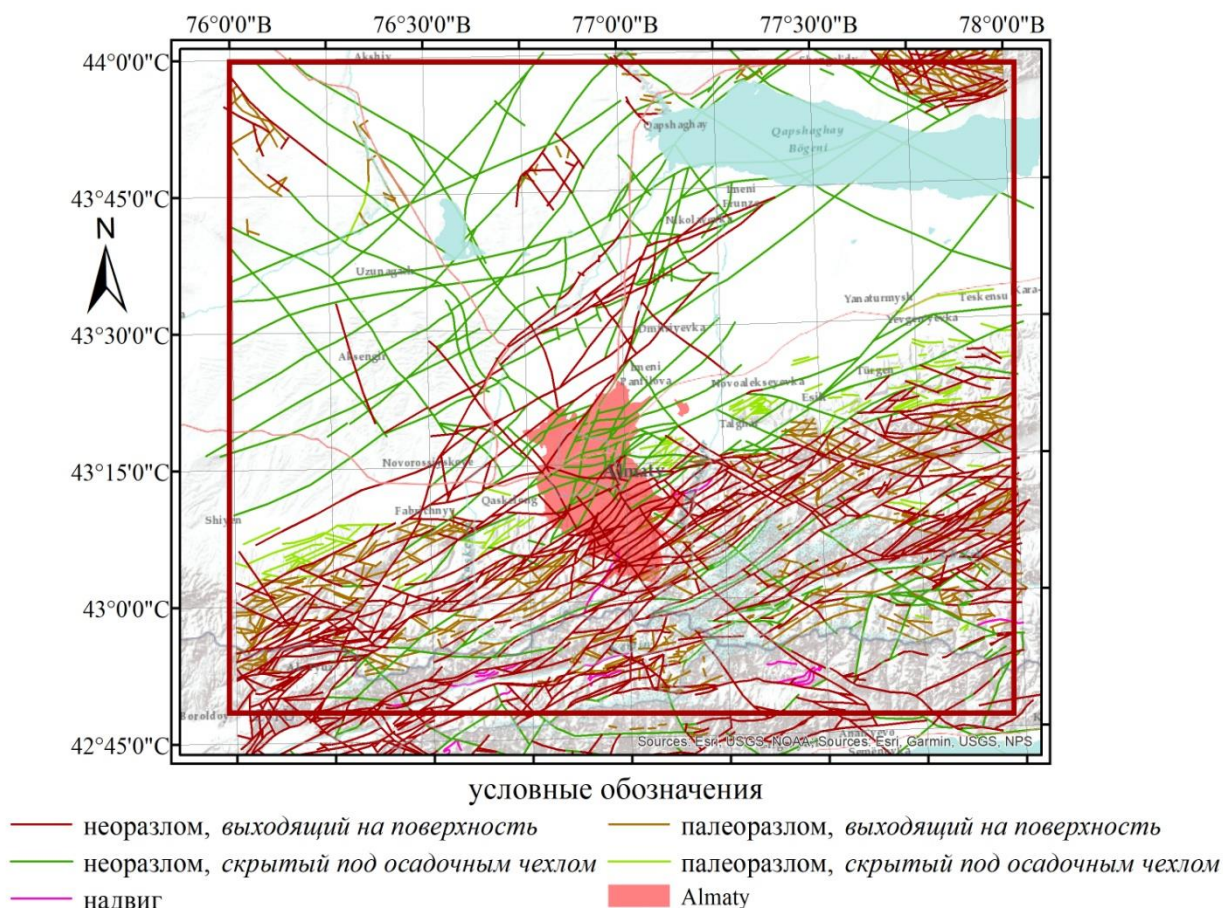


Рисунок 2 – Цифровая карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района

Таким образом, атрибутивная база данных цифровой карты предоставляет удобную возможность как для извлечения конкретных сведений об отдельных разломах и их проявлениях на разных территориях, так и для решения более общих задач – тематического картографирования, определения интенсивности и параметров проявления современных геодинамических процессов, оценки сейсмической и других геодинамических опасностей территорий, тектонического районирования.

Карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района позволяет визуализировать выявленные закономерности проявления активных разломов, также соотнести их с древними зонами дробления и выявить связь с геодинамической обстановкой исследуемой территории в целом, в том числе с сейсмичностью.

3 Краткий обзор геофизических исследований на юго-востоке Казахстана

3.1 Этапы развития сети сейсмических станций в регионе

Формирование региональной сети сейсмических наблюдений относится к 1914 году, примерно в это время начинается регулярная запись землетрясений на станциях 2 класса в Верном, Оше, Самарканде, Шемахе и Омске. Однако в годы революции их деятельность приостановилась. Исследования возобновились в 1927 году, после того, как завезен горизонтальный сейсмограф П.М. Никифорова. Позднее региональные сейсмические станции были открыты в г. Чимкент в 1932 году и в г. Семипалатинск 1934г. Такая региональная сеть в лучшем случае регистрировала сильные землетрясения, а определение положения эпицентров и глубины очага были с очень большой погрешностью[15].

Вторым этапом развития региональной сети наблюдений является период 1950-1970 г., когда на Северном Тянь-Шане и прилегающих территориях были открыты новые сейсмостанции («Преживальск», «Или», «Курменты», «Чилик», «Талгар», «Рыбачье», «Фабричный», «Кызыл-Агач»), укомплектованные более совершенным оборудованием.

Толчком к более детальному изучению Алматинского района послужило Ташкентское землетрясение 1966 г. Илийская геофизическая экспедиция приступила к постоянным наблюдениям за характером изменения сейсмической активности района во времени и пространстве методом МОВЗ. В этих целях использовались станции «Земля», выставленные как по профилям, так и по площади с расстоянием между пунктами регистрации 30-70 км, что позволило вести непрерывные наблюдения.

Разработка и выбор сети станций записи на оптимальном расстоянии друг от друга позволили решить вопросы по снижению уровня помех, влияющих на обработку данных. За размещение станций записи в разных геологических условиях и на различных гипсометрических уровнях, введены поправки в значениях времени прихода волн, как ближних, так и дальних землетрясений. Проводимые сейсмологические исследования позволили накопить достаточный материал для оценки сейсмичности Алматинского сейсмоопасного региона, как в целом района, так и отдельных его блоков.

Со временем к 1980 году были открыты новые сейсмостанции, оборудованные высокочувствительными станциями («Медео», «Тургень», «Курты», «Тянь-Шань») и модернизированы старые пункты, что позволило повысить точность определения гипоцентров. На Алматинском прогностическом полигоне выполняются комплексные исследования связи вариации геофизических полей с процессами, протекающих в недрах Земли, в том числе с современными вертикальными движениями и сейсмичностью.

Такие исследования и использование единой методики обработки данных дают возможность считать накопленный материал однородным и полным.

В настоящее время сейсмические наблюдения (регистрация землетрясений различной силы и удаленности) проводятся на 46 станциях[16]. Сейсмические наблюдения проводятся с целью: создания каталога землетрясений, являющегося основой для всех сейсмологических исследований; получения оперативной информации о «сильных» землетрясениях; изучения различных предвестниковых параметров сейсмического режима и сейсмических волн; получения информации о поведении различных типов грунтов при сильных землетрясениях в целях инженерной сейсмологии.

Геофизические наблюдения проводятся на 17 станциях (рисунок 3) с целью изучения различных предвестниковых параметров геофизических полей.

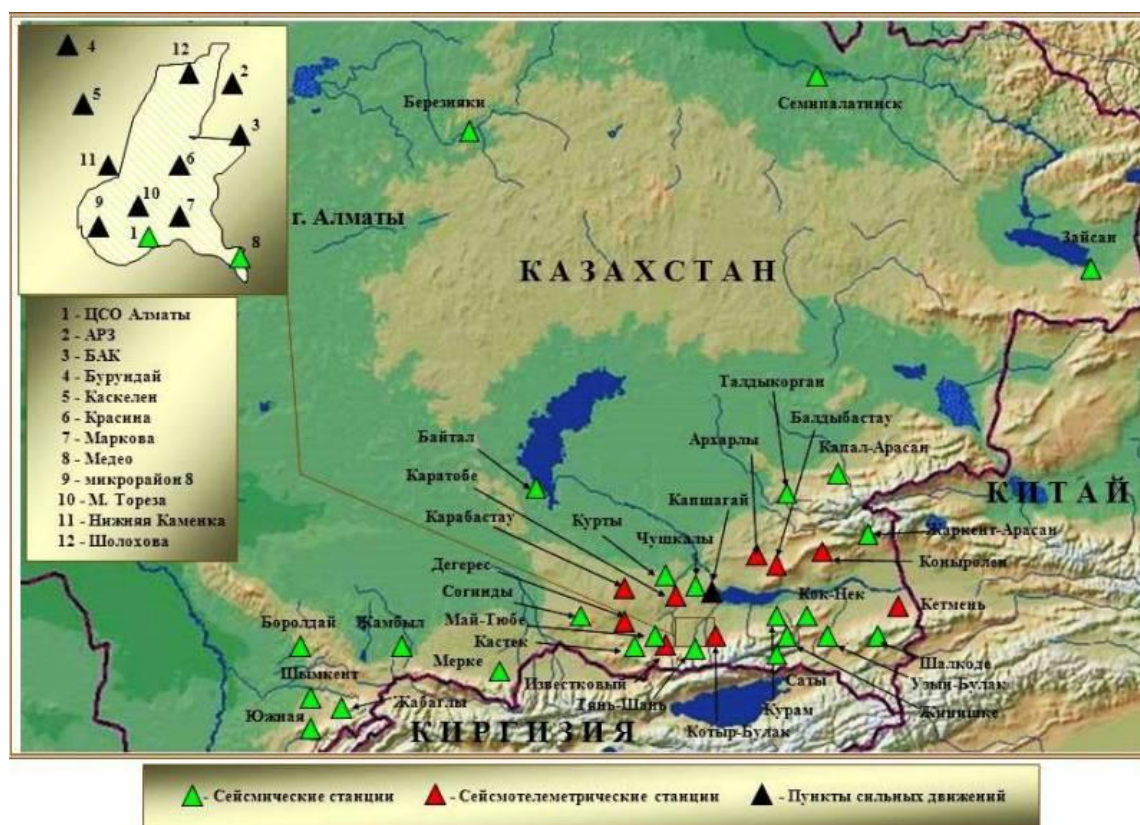


Рисунок 3 – Общая схема размещения сейсмических станций Алматинского сейсмоопасного района

Наблюдения ведутся за модулем геомагнитного поля, компонентами геомагнитного поля, естественным электрическим с наземным и скважинным расположением измерительных электродов.

Гидрогеологические наблюдения проводятся на 12 станциях с целью изучения поведения различных гидрогеологических параметров, как предвестников сильных землетрясений [16].

3.2 Скоростное моделирование

Изучение глубинной структуры земной коры на всю ее мощность важно для решения ряда принципиальных вопросов геологии, сейсмологии, в том числе и в связи с проблемой закономерностей образования и размещения месторождений полезных ископаемых. Для научного прогнозирования направления поисков полезных ископаемых на этой территории необходимо достаточно надежно установить основные черты ее региональной геологии, чтобы использовать намеченные ранее и конкретизированные для данного района закономерные связи размещения полезных ископаемых с различными геологическими факторами, в том числе и глубинными, а также для понимания теории образования, последующего развития литосферы Земли и изучения, протекающих различных физико-химических глубинных процессов и связи их с сейсмичностью.

Глубинное строение юго-востока Казахстана исследовалось при помощи разнообразного комплекса геофизических методов, из-за уникальности расположения и разнообразия геологических особенностей.

При этом ведущая роль принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной интерпретации геофизических материалов. Одной из составных частей геофизической основы геодинамического районирования литосферы являются скорости продольных V_p и поперечных волн V_s , характеризующие внутреннюю структуру земной коры и верхней мантии [17].

Разработаны двумерные скоростные модели продольных волн V_p и поперечных волн V_s по профилям ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ или, в случае их отсутствия в высокосейсмичной орогенной части территории, по профилям сейсмической томографии, на которых система годографов типа ГСЗ формируется по данным сейсмологических наблюдений.

Первые работы методами ГСЗ и МОВЗ выполнены под руководством Г.А. Гамбурцева в начале 50-х годов прошлого века [18]. По системе кусочно-непрерывного зондирования пройдены два профиля: Иссык-Куль-Или-Балхаш и Иссык-Куль-Тескенсу-Балхаш. В начале 60-х годов в связи с необходимостью решения задач региональной геологии отработан профиль ГСЗ Арысь-Балхаш. С середины 60-х годов Илийская геофизическая экспедиция приступила к работам ГСЗ с непрерывными системами наблюдений и к 1970 году выполнила исследования на субмеридиальных профилях Жаланащ-Талды-Курганском, Каскеленском и Иссыкском, создав таким образом каркас модели глубинного строения земной коры юго-востока Казахстана. Для сопоставления и корректировки данных в этот же период на опорных профилях проводились работы методом МОВЗ.

Полученные по МОВЗ глубины залегания поверхности Мохоровичича сравнивались с результатами ГСЗ. Расхождения в значениях глубин, установленных указанными методами, в близкорасположенных пунктах находятся в пределах 0-4 км, а среднеквадратичная погрешность составила 1,2 км. В 70-х годах с комплексными исследованиями Чу-Илийского рудного пояса ИГН АН КазССР пройден Кендыктасский профиль ГСЗ. В 1977 году рассматриваемый район исследован в субширотном направлении Туркестанским профилем. В 70-80-х годах НПО "Нефтегеофизика" отработано 8 региональных профилей МОВЗ и ГСЗ-МОВЗ: "Меридиан", "Уванасский", "Туркестанский", "Жалпакский", "Песчаный", "Джамбулский", "Саякский", "Актогайский". Общая протяженность профилей глубинных сейсмических исследований с учетом сейсмологических работ ВСЕГЕИ и ИГЭ ПГО "Казгеофизика" составляет более 10000 погонных километров. Как видно на схеме профилей многие профили пересекают различные по скоростным характеристикам блоки земной коры. В связи с этим существующие на тот момент варианты разрезов ГСЗ ГСЗ-МОВЗ подвергались проверке с точки зрения их соответствия двумерному волновому полю. Наряду с сейсморазведкой на геотраверсах в комплексе проводились исследования гравиметрией, магнитометрией, МТЗ и бурение [15].

На территории юго-востока Казахстана проведен большой объем детальных профильных и площадных сейсмических исследований (рисунок 4) [19, 20].

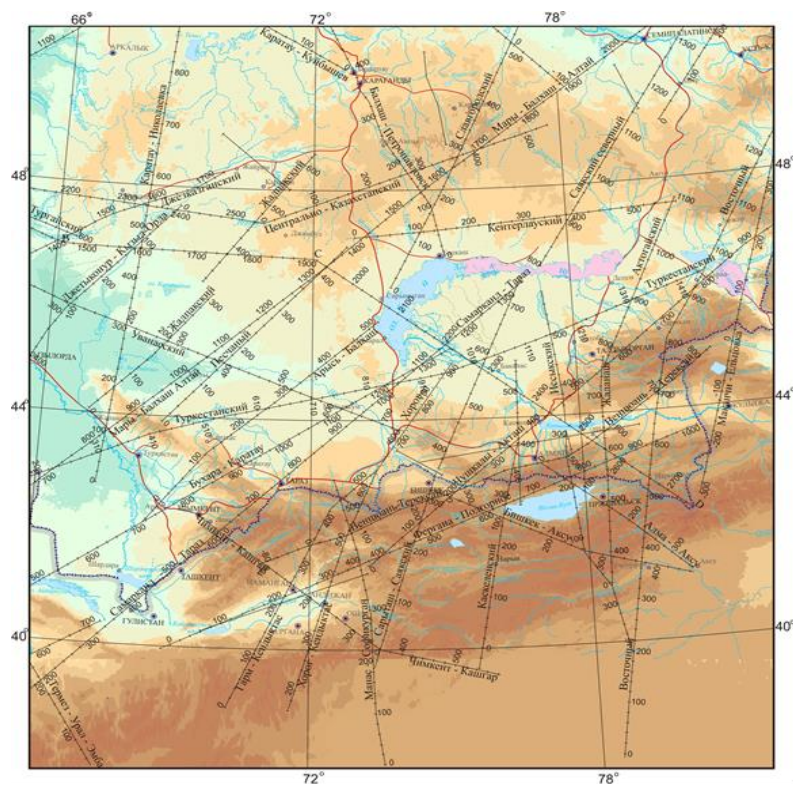


Рисунок 4 – Схема профилей глубинных сейсмических зондирований и сейсмотомографии юго-востока Казахстана

Однако наиболее опасными в сейсмическом отношении являются высокогорные районы, где невозможна организация наблюдений ГСЗ из-за сложности рельефа. В этом случае для получения скоростных разрезов применялась методика профильной сейсмической томографии, основанная на обработке данных о вступлении продольных волн, регистрируемых от местных землетрясений, и позволяющая с достаточной достоверностью и полнотой извлекать сейсмическую информацию из волновых полей [21, 22].

В процессе обработки и обобщения материалов ГСЗ и ГСЗ-МОВЗ, сейсмометрии составлены двумерные и объемная сейсмические модели земной коры части сейсмоактивных и прилегающих к ним асейсмичных территорий юго-востока Казахстана [22].

Сейсмическая томография – один из наиболее важных инструментов для получения детальной информации о строении земных недр. В течение последних лет наблюдается стремительное развитие метода. Главным образом это происходит благодаря совершенствованию компьютерных технологий и алгоритмов. Кроме того, более качественное изображение земных недр становится возможным благодаря расширению мирового сейсмологического банка данных, появлению новых сейсмических станций, развитию технологий и интерпретации. Сейсмические волны, распространяющиеся через глубинные слои Земли, содержат уникальную информацию о ее строении. Так, основные слои нашей планеты – твердые кора и мантия, жидкое внешнее ядро и твердое внутреннее ядро – были открыты в первой половине XX века на основе анализа записей землетрясений. Начиная с середины 1970-х годов XX века, широкое развитие получила сейсмическая томография – «просвечивание» Земли на основе волн, генерируемых землетрясениями, для получения трехмерных изображений внутреннего строения Земли [23].

Сейсмотомографические разрезы позволяют без проведения затратных полевых работ получить новую геолого-геофизическую информацию о строении земной коры и подкоровой мантии юго-востока Казахстана [21].

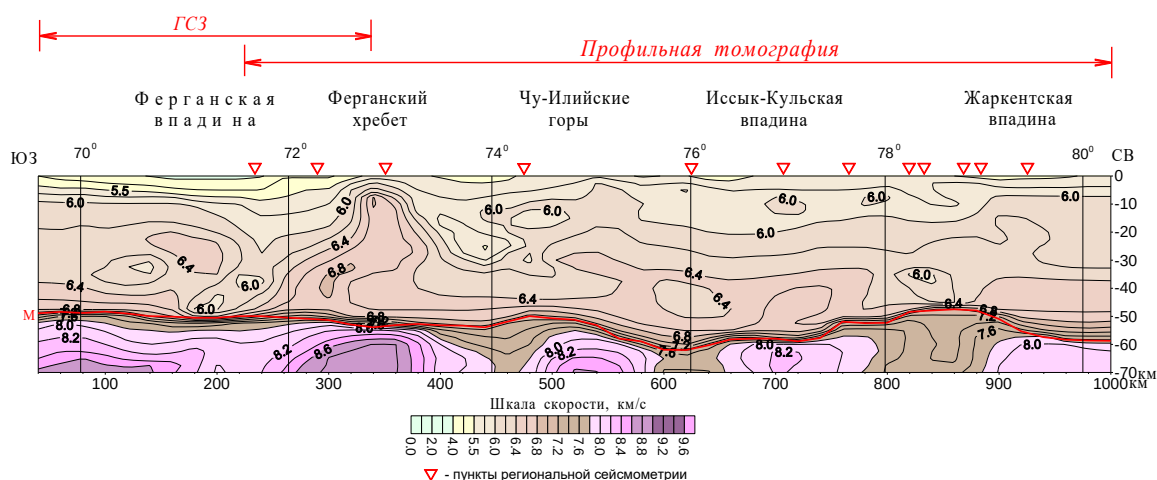


Рисунок 5– Двумерная Р-скоростная модель по профилю Фергана-Подгорное

На основе экспериментальных ретроспективных и новых материалов глубинных сейсмических зондирований и современной профильной сейсмотомографии [24] для всех профилей разработаны двумерные Р-скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубины 70 км. В качестве примера приведена модель для профиля Фергана-Подгорное (рисунок 5), при создании которой использовались как данные ГСЗ, так региональной сейсмометрии. Точность построения двумерных скоростных моделей в изолиниях, соответствующая примененным системам наблюдений и возможностям алгоритма решения обратной кинематической задачи рефрагированных волн [25, 26], в интервале глубин 0-6 км невысокие (0.4-0.6 км/с). По мере увеличения глубины, когда наступает соответствие параметров систем наблюдений требованиям алгоритма, точность достигает значений 0.15-0.25 км/с. За среднюю точность двумерных скоростных моделей по всей территории Казахстана приняты значения 0.2 км/с для интервала глубин 6-40 км и 0.5 км/с для интервала 0-6 км (рисунок 5).

В итоге по имеющимся сейсморазведочным данным для всех профилей юго-востока Казахстана разработаны двумерные Р-скоростные модели земной коры и подкоровой мантии, которые в дальнейших исследованиях послужившие информационным каркасом для создания объемной модели. Разработка двумерных структурно-скоростных моделей литосферы по профилям геотраверсов обеспечила более высокий уровень построения геолого-геофизических разрезов и увязку глубинных структур с поверхностными.

Наиболее информативными, с позиций возможности выявления контрастных внутрикоровых неоднородностей, влияющих на формирование пространственного режима сейсмичности, являются структурные схемы мощности сиалического (гранито-гнейсового) слоя (между скоростными уровнями 5.6 км/с и 6.4 км/с), мощности обобщенного базитового слоя (между скоростными уровнями 6.4 км/с и 7.2 км/с), охватывающие весь диапазон консолидированной коры, а также схемы подошвы земной коры М и мощности активной мантии (между подошвой коры М и скоростным уровнем 8.0 км/с). Описание и сопоставительный волновой анализ модели проводился в соответствии со структурно-вещественными комплексами консолидированной коры и верхней мантии [27].

Отмеченные скоростные особенности петрофизических данных являются перспективными при выделении критериев коры асейсмичных и высокосейсмичных территорий. При анализе скоростных разрезов выведена зависимость скоростей по петрофизическим данным конкретно для регионов Казахстана (таблица 2) [27].

При интерпретации скоростных характеристик исследуемой среды двумерные модели вдоль профилей не дают полного представления о морфологии выделенных структур, что снижает тектоническую информативность таких моделей и не позволяет получить объективные признаки для реконструкции геодинамических процессов, в том числе

землетрясений. Решение задачи по созданию объемной Р-скоростной модели земной коры и верхней мантии позволяет создать наиболее полную геолого-геофизическую модель строения земной коры и верхней мантии юго-востока Казахстана и дать оценку внутренней структуры среды в трехмерном пространстве.

Таблица 2 – Геофизическая классификация слоев земной коры и верхней мантии

Структурно-вещественные комплексы стратифицированных и геофизических слоев коры и верхней мантии			Скорость V_p , км/с
Платформенный чехол	Мезозойско-кайнозойский комплекс		< 4.0
	Палеозойский комплекс		4.0-5.6
Консолидированная кора	Гранито-гнейсовый (сиалический) верхнекорový слой	Вулканогенно-метаморфический палеозойский комплекс	5.6-6.0
		Метаморфический комплекс докембрия	6.0-6.4
	Гранулит-гнейсовый (базитовый) среднекорový слой		6.4-6.8
	Гранулит-базитовый (ультрабазитовый) нижнекорový слой		6.8-7.2
	Переходный слой от коры к мантии (коромантийная смесь)		> 7.2*
Верхняя мантия	Активная	Для Казахского щита, эпиплатформенных орогенов и впадин	< 8.2*
		Для Туранской плиты и Прикаспийской впадины	< 8.0*
	Нормальная	Для Казахского щита, эпиплатформенных орогенов и впадин	8.2-8.4
		Для Туранской плиты и Прикаспийской впадины	8.0-8.4
	Высокоскоростная (высокоплотностная)		> 8.4

Объемная модель V_p , в зависимости от решаемых задач, может быть представлена в виде срезов на различных гипсометрических уровнях, разрезов в любом требуемом направлении или набором структурных схем характерных скоростных уровней и мощности слоев между ними. Предпочтительным является такое представление, которое позволяет наилучшим образом проследить изменение скоростной структуры исследуемой среды по глубине или по латерали в объеме исследуемой среды (рисунок 6).

Цифровая Р-скоростная объемная модель земной коры и верхней мантии создана по комплексу данных, полученных из результатов 2D-моделирования по геотраверсам, расположенным на юго-востоке

Казахстана и прилегающих регионах соседних государств (см. рисунок 4). При расчетах использовалась собственная компьютерная программа, позволяющая все данные по профилям собрать в объемную структуру [28].

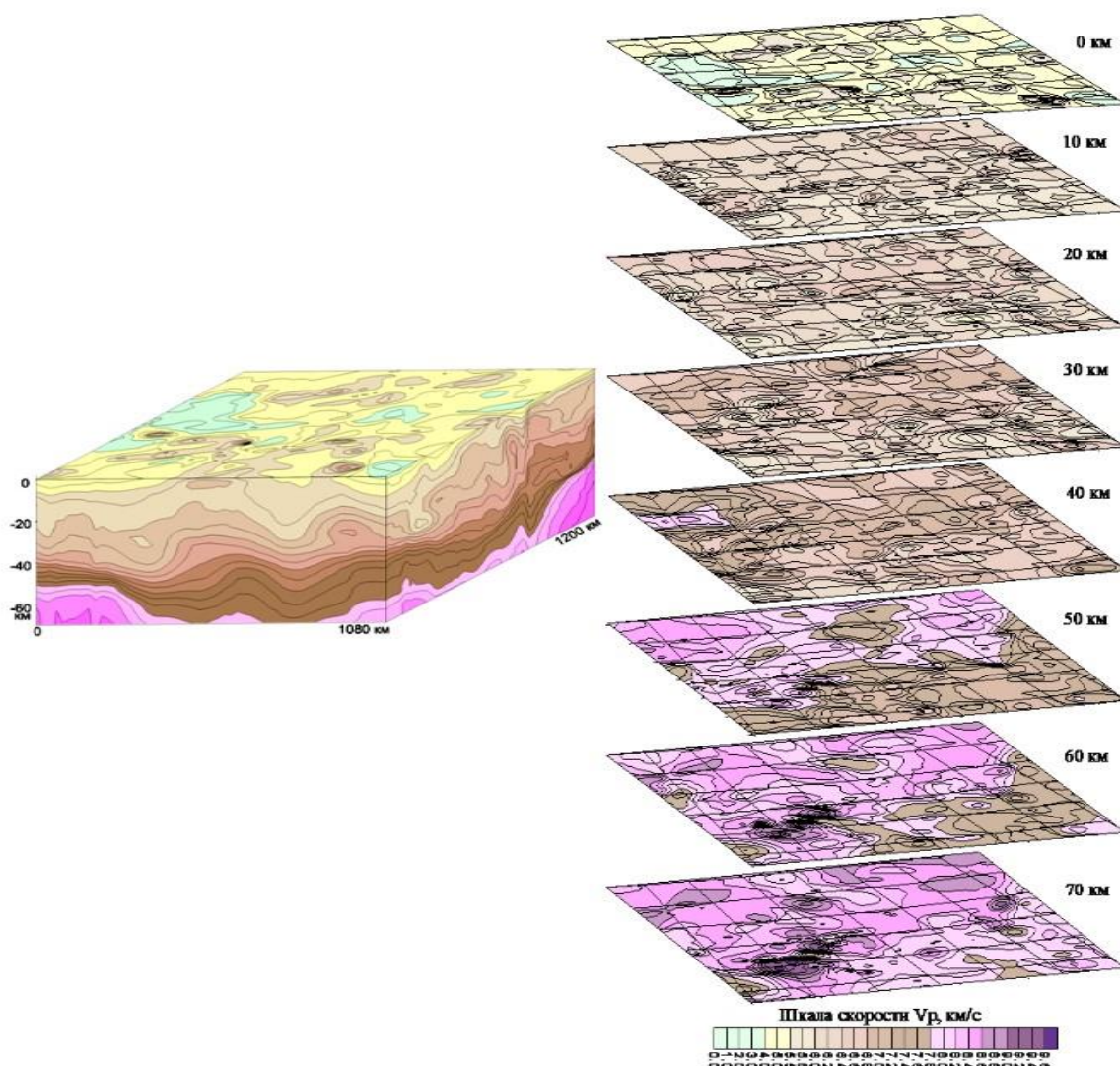


Рисунок 6 – Объемная Р-скоростная модель земной коры и верхней мантии юго-востока Казахстана и вид срезов на гипсометрических уровнях 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 км

Задача программы основывалась на вычислении корреляционных скоростей в узлах заданной сетки, так как расположение профилей на территории нерегулярно и в произвольном порядке. Все данные скоростных разрезов геотраверсов приводятся к общей системе координат, а затем разделяются по срезам в глубине. Для нахождения и экстраполяции величины скорости V_p в узлах равномерной сетки использовался метод Кригинга [29, 30], который позволяет создавать цифровые модели поверхности по неравномерно распределённым данным в пространстве.

Использованные вариограммы, в образцах экстраполяции модели, рассчитываются на основе сравнения возможных парных значений, поэтому

можно сказать, что они несут информацию о фактических содержаниях данных ГСЗ. Модель вариограммы в данном случае выступает в роли «композиции подстановок», по которой определяется более подходящий вариант вариограммы, соответствующий определенному расстоянию между значениями. Полученные таким методом значения скоростей оптимальны в том смысле, что окончательные оценки являются несмещенными и имеют минимальную оценку дисперсии. Отсутствие погрешности, также называемая несмещенность оценки, означает, что сумма весов всех проб, участвующих в оценке, будет равна единице: это условие позволяет избежать завышения или занижения оцененных содержаний. Никакая другая линейная комбинация наблюдений не может дать оценки, которые имеют меньшее рассеяние относительно их истинных значений. На достоверность оценки содержаний методом Кригинга в основном влияет качество подготовки моделей вариограмм. В свою очередь, качество подготовки вариограмм зависит от грамотной обработки вводных данных опробования.

Степень достоверности обработки вводных данных опробования получаемых разрезов в линиях равных скоростей косвенно оценивается сопоставлением в точках пересечения профилей скоростных моделей, полученных для каждого из них независимо один от другого при решении двумерной обратной задачи рефрагированных волн.

Наибольшие значения среднеквадратических расхождений (до 0.3 км/с) характерны для приповерхностной части разрезов (зависит от недостатков выбранной методики сейморазведочных методов ГСЗ и ГСЗ-МОВЗ, сложности рельефа и геологических границ). С увеличением глубины они уменьшаются до 0.15 км/с. Среднее расхождение составляет 0.18-0.22 км/с. Входные данные для расчета объемной модели представляют собой набор 33 прямоугольных матриц (по количеству двумерных моделей) состоящих из значений скоростей продольных волн с дискретностью 20 км по латерали и 2 км по вертикали. У всех матриц одинаковое количество строк (36). Для каждого профиля задаются его код, шаг дискретизации и координаты точек его начала, изломов (если профиль – не прямая линия) и конца [1].

Преимущество 3D моделирования заключается в возможности создавать слайсы на любых глубинных горизонтах в данном случае представлены результаты на гипсометрических уровнях 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 км (рис. 6), которые дают наиболее полное представление о результате исследований. Анализ таких срезов на различных уровнях свидетельствуют о разнообразии глубинного структурного облика и отличаются интенсивностью, контрастностью, площадью и глубиной распространения, выявленных сейсмических аномалий. Характер и сложность сейсмических аномалий прямо соответствуют конкретным геологическим структурам, отражающих их вещественный состав и состояние [31].

Сложное геологическое строение Алматинского сейсмоактивного района затрудняет выделение гравитационных аномалий от отдельных

объектов, поэтому на этапе детальных исследований решалась в первую очередь прямая задача гравиразведки – выявление влияния геологических границ на гравитационное поле. В остаточных аномалиях силы тяжести гравитационное поле характеризуется общим отрицательным уровнем на Северном Тянь-Шане и переходом в положительные значения на Казахском щите. Илийская впадина является переходной зоной между платформой и орогенами. Также выявлена линейность корреляции между значениями гравитационного поля (или трансформации в верхнее и нижнее полупространство) и глубинами до поверхностей раздела земной коры, которая меняется в районах крупных тектонических нарушений.

Наблюдения за вековым ходом магнитного поля начаты в 1968 году совместными усилиями Ленинградского отделения ИЗМИР АН СССР и Илийской экспедицией. В том же году разработана и заложена сеть из 60 пунктов, которая в последующем развивалась и модернизировалась. Наблюдения выполнялись раз в год с определением абсолютных значений ΔT , ΔH , D . Наиболее существенные аномалии оказались приурочены к разломам и узлам их пересечений и проявляли динамичность, то есть из года в год происходили существенные изменения параметров [15].

4 Краткий обзор результатов изучения вариаций скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений методом до и после сейсмического события зарубежными и казахстанскими учеными

4.1 Исследования зарубежных ученых

Исследования по выявлению вариаций скоростей сейсмических волн при подготовке землетрясений начались еще на заре сейсмологии - в начале XX века. Так, в публикации 1908 г. [32] утверждается, что скорости с увеличением напряжения убывают до величины, соответствующей максимальному напряжению, за которым уже следует землетрясение, после которого скорость начинает возрастать. Со временем скорость начинает снова убывать, что означает подготовку следующего землетрясения. Это явление автор назвал сейсмическим гистерезисом, и проверял его на материалах японского сейсмолога М. Имамури. В литературе есть сведения (см. например, [33] о том, что сам Имамури предсказал в 1905 г. землетрясение Канто 1923 г.).

В известной монографии одного из основателей сейсмологической науки Б.Б. Голицина подчеркивается, что: “Теория Kovesligethy далеко не представляет собою что-либо законченное и цельное, но она имеет несомненное значение, как первая попытка поставить вопрос о предсказании землетрясений, представляющий громадную практическую важность, на строго научное исследование.”[34].

В [34] был предложен метод изучения вариаций отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s без непосредственного определения самих скоростей V_p и V_s .

Обзоры последовавших многочисленных работ вплоть до 80-х годов XX века по изучению изменений скоростей сейсмических волн до и после землетрясений на основе, как и более ранние работы, измерений времени пробега этих волн приведены в монографиях [33, 35, 36].

В [35] автор, в частности, отмечает результаты по регистрации падения значений V_p/V_s , полученных в СССР на Гармском полигоне, и приводятся аналогичные данные, полученные в США, где, кроме того, наблюдались случаи отсутствия таких изменений перед сильными землетрясениями. Правда, в последнем случае высказывалось предположение о том, что изменения V_p/V_s могут не наблюдаться, если движение по разрыву носит сдвиговый характер в отличие от движений типа надвига. Также автор приводит пример возникновения анизотропии за 38 и 10 дней перед землетрясениями в США с $M=4.0$ (Фэрвью-Пик) и $M=3.9$ (Невада), в результате которой поперечная S – волна расщепляется на волны SV и SH. Увеличение $V_{SH} - V_{SV}$ достигало соответственно 2.3 и 2.5 %.

В целом же в обзоре отмечается, что возврат значения отношения V_p/V_s после понижения его к прежнему уровню перед землетрясением позволяет определить приближенно время предвестника, по которому можно судить и о вероятной магнитуде, тем большей, чем больше время предвестника. При

этом автор придерживается гипотезы, основанной на качественных представлениях о дилатантно-диффузионной (ДД) модели подготовки землетрясения, то есть на представлениях об увеличении объема пород, насыщенных водой или сухих, под действием сжимающих напряжений.

Автор [33] считает, что полученные до 1966 года “сведения об изменениях скоростей продольных волн перед землетрясениями, были весьма противоречивыми”. Вместе с тем, он пишет, что к концу 1960 – х годов и в последующее десятилетие исследования в США и Японии в большей части работ по проблеме подтверждается факт возникновения аномалий. Сам автор обзора проводил работы по сейсмическому просвечиванию с помощью повторных взрывов на море в фиксированных пунктах на Камчатке. Были зафиксированы изменения скорости продольной волны, не превышающие 0.1 – 0.15 сек, однако с помощью критериев отбора и статистических методов обработки доказана случайность вариаций времен пробега волн.

В отличие от автора предыдущего обзора, автор данного обзора придерживается иной гипотезы о природе понижения скорости перед землетрясением, а именно лавинно-неустойчивого трещинообразования, предшествующего землетрясению (ЛНТ).

В монографии [36] приводятся данные о том, что в случае одноосного сжатия скорость в направлении приложенной силы увеличивается, а когда усилие возрастает и напряжение приближается к пределу прочности, скорость, наоборот, начинает уменьшаться, но изменение ее в направлении оси сжатия невелико. Однако в поперечном направлении скорость испытывает скачок на 10 – 20 %. Таким образом, установлено, что в направлении минимального главного напряжения происходит заметное изменение (уменьшение) скорости. Приводя данные о регистрации изменений скорости перед землетрясениями, также автор приводит данные о том, что при землетрясении с $M = 7.0$ в Японии не было никаких значительных изменений скорости. Придерживаясь дилатантно-диффузионной модели, автор подчеркивает, что если землетрясения происходят при подвижках по существующим разломам, то область, в которой перед землетрясением может развиться существенная дилатансия, должна быть ограниченной. То есть изучение изменения скоростей по изменениям времен пробега вдоль всей длины лучей не может считаться достаточными для мониторинга скоростей с необходимой степенью разрешённости.

Очень важные данные об уменьшении значений отношения V_p/V_s перед землетрясениями приведены в китайской монографии [37], поскольку они получены во внутриконтинентальной области, к которым относится и Северный Тянь-Шань, а не к зонам контакта континентальных и океанических плит, к которым относятся данные по Японии, Калифорнии и Камчатке. В этой монографии представлены графики V_p/V_s , построенные по

данным измерений времен пробега продольных и поперечных волн перед землетрясением(см. рисунок 7).

Перед землетрясением Тонгхай с $M = 7.7$ в середине 1969 года (рисунок 7а) измерения начали проводить с 1965 года. Сразу обнаружили понижение значений V_p/V_s , которые продолжались держаться на уровне около 1.65 до середины 1968 года и с начала этого года стали подниматься вплоть до значения 1.85 к моменту землетрясения и резко упали до значения 1.6 после сейсмического события.

Аналогичные данные получены и для землетрясения Лухуо с $M=7.9$, произошедшего во второй половине 1972 года (рисунок 7b). Измерения V_p/V_s начали проводить со второй половины 1965 года, где зафиксировано понижение V_p/V_s до 1.63, которое сохранялось (при временном повышении до нормы в первой половине 1967 года) до середины 1970 года, а затем начало медленно повышаться до нормы к середине 1972 года и до 1.92 к моменту землетрясения, после которого значения V_p/V_s сразу понизились до 1.60.

Следующие более поздние землетрясения показали еще более интересные результаты, поскольку измерения здесь проводились за более долгий период времени до землетрясения. Так, перед землетрясением Янгшань с $M = 7.1$ в конце 1973 года измерения начались с середины 1964 года (рисунок 7с). До половины 1965 года значения V_p/V_s колебались вокруг нормы 1.73, а потом к началу 1966 года понизились до 1.69 и держались примерно на этом значении до середины 1973 года, а затем стали подниматься до более 2.0 к моменту землетрясения, после которого также резко снизились до 1.65.

Более неоднозначные результаты получены по следующим трем землетрясениям Хайченг с $M = 7.3$ в конце 1974 года, Тангшань с $M = 7.8$ в начале 1976 года и Сонгпан с $M = 7.2$ в начале 1976 г. В первом случае (рисунок 7d) понижения значений V_p/V_s зафиксированы во второй половине 1970 года вплоть до 1.58 во второй половине 1971 года. Однако возвращение этих значений к норме в первой половине 1972 года не сопровождалось землетрясением. Далее был новый спад и восстановление во второй половине 1974 года, но без опять последующего землетрясения. Однако уже значительно меньшие вариации значений отношения V_p/V_s вокруг нормы продолжались до середины второй половины 1974 года, когда и произошло сильное землетрясение.

Сильное землетрясение Тангшань произошло через год после восстановления, значительно более слабой и менее продолжительной аномалии по сравнению с рассмотренными выше. Зато землетрясение Сонгпан произошло непосредственно на подъеме значений V_p/V_s пониженных значений 1.68, державшихся около четырех лет.

Эти материалы по Китаю говорят о том, что даже при наличии аномалий времен пробега предсказать время землетрясения не всегда возможно. В целом же на сегодняшний день можно сказать, что измерения

времен пробега необходимо, но недостаточно использовать при среднесрочном прогнозе.

О понижении скоростей продольных волн в результате дилатансии или развития трещин также сообщается в [38, 39].

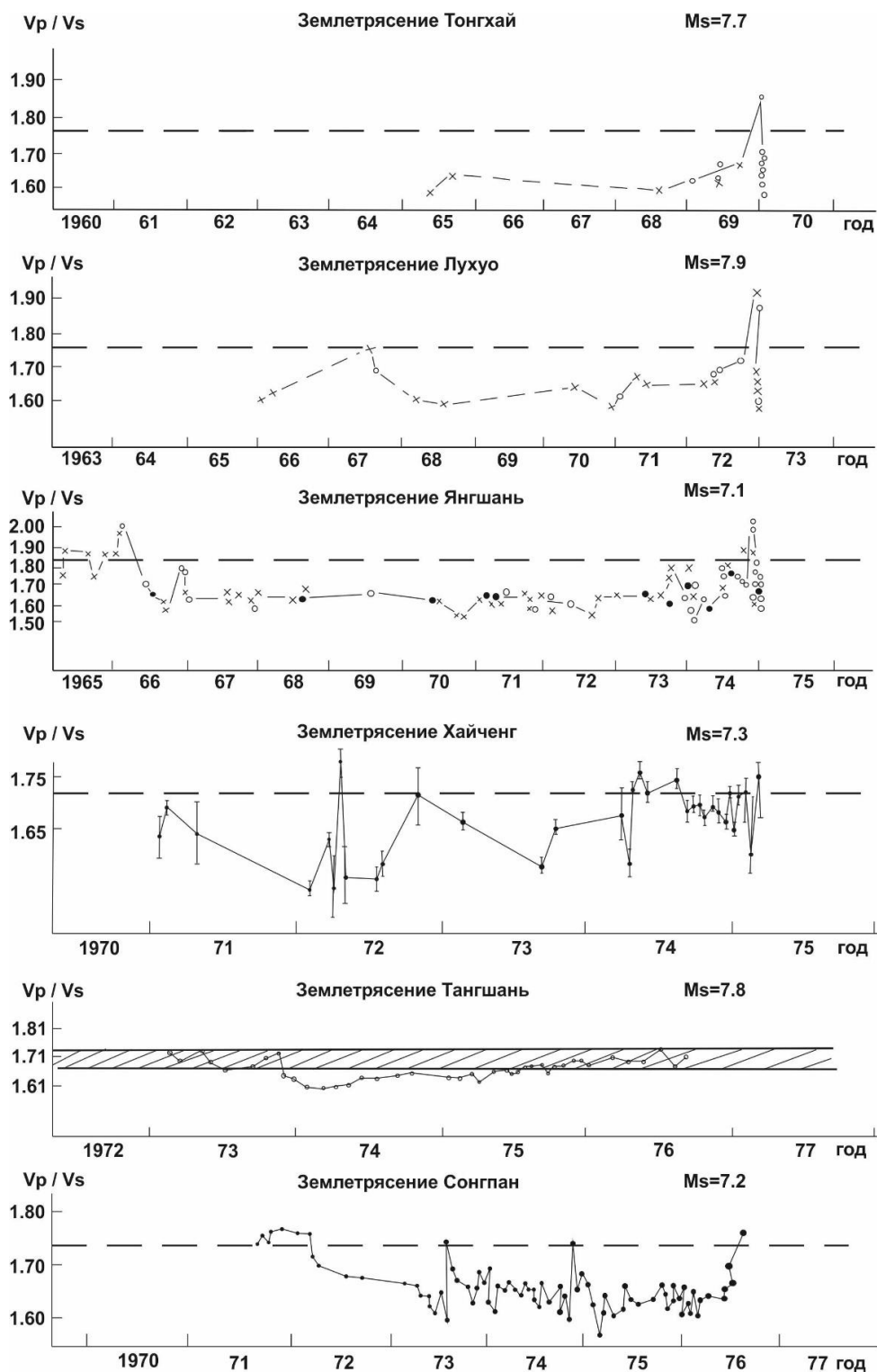


Рисунок 7 – Графики вариаций отношения V_p/V_s перед шестью сильными землетрясениями Китая

Данные по изучению вариаций скоростей и их отношений в более поздние годы содержатся в статьях, среди которых можно отметить, в частности, следующие:

- Обзор ранее проведенных работ по изучению понижений скоростей продольных волн перед сильными землетрясениями выполнен в [40].
- О вариациях скорости, обусловленных землетрясениями, сообщается в [41].
- В [42] сообщается о вариациях скоростей, связанных с землетрясением в Калифорнии с $M=7.5$ в 1992 г.

В последнее десятилетие также были выполнены исследования по использованию аномалий отношения V_p/V_s для обнаружения понижения скоростей V_p , связанных с землетрясениями [43, 44]. В последней работе использовались данные томографического определения скоростей продольных волн и показано увеличение скорости V_p после землетрясения Чи-Чи в северной части разлома Челунгпу.

В [45] также приводятся данные о понижении времен пробега после этого землетрясения на станциях западнее этого разлома в результате наполнения трещин флюидами, а в других же местах отмечены понижения скорости перед этим землетрясением. Авторы считают, что изучение вариаций скоростей может служить в качестве метода обнаружения предвестников формирования очагов сильных землетрясений, в частности, надвигового типа.

В [46] рассматривается изменение скоростей поперечных волн перед землетрясением 1989 г. Лома Приета с $M_w=6.9$, которое восстанавливалось несколько месяцев после землетрясения, и в [47] после землетрясения Паркфилд в 2004 году.

4.2 Исследования казахстанских ученых по выявлению вариаций скоростей V_p , V_s , V_p/V_s в очаговой зоне японского землетрясения Кобе 17 января 1995 года

В [48] приведены результаты профильной томографии до и после землетрясения в Японии в 1995 г., которые выявили вариации значений V_p/V_s в его очаговой зоне до и после события. Исследования выполнены учеными Института Сейсмологии РК.

Начало изучения механизма вариаций скорости продольных и поперечных волн в период подготовки сильного землетрясения связано с лабораторными экспериментами японских ученых Сасса и Хаякава [36] в конце 40-х годов прошлого столетия, вызвавшими поток натурных измерений этих параметров в различных сейсмоактивных регионах с целью использования отношения V_p/V_s в качестве одного из предвестников. Среди советских ученых эти исследования начаты по инициативе И.Л. Нерсесова [49] с конца 60-х годов.

До настоящего времени наиболее представительной по обзору и анализу их результатов является работа К. Моги [48]. В 2002 году профессор Токийского университета К. Судо на одной из лекций в институте сейсмологии МОН РК продемонстрировал рисунок из работы японских ученых (Negishi et al., 1995) содержащий значения V_p и V_p/V_s в плоскости разрыва землетрясения 17 января 1995 г. $M=7.3$ в Кобе, предположительно, по данным за период в первые два месяца после события. После этого у казахстанских ученых института сейсмологии возникла идея выполнить аналогичные вычисления и сравнить результаты для периодов до и после землетрясения. При расчетах использовалась методика профильной томографии, апробированная, помимо Тянь-Шаня, на японских данных [50]. Весь необходимый объем представительного материала по данным землетрясений, параметрам региональной сети, расположенной на территории Японского архипелага, обобщенной скоростной модели тектоносферы представлен Х. Такамой – профессор Университета Тохоку (Tohoku University, г. Сендай, Япония), основатель и первый директор Международного института ударных волн (International ShockWave Institute), доктор философии (PhD).

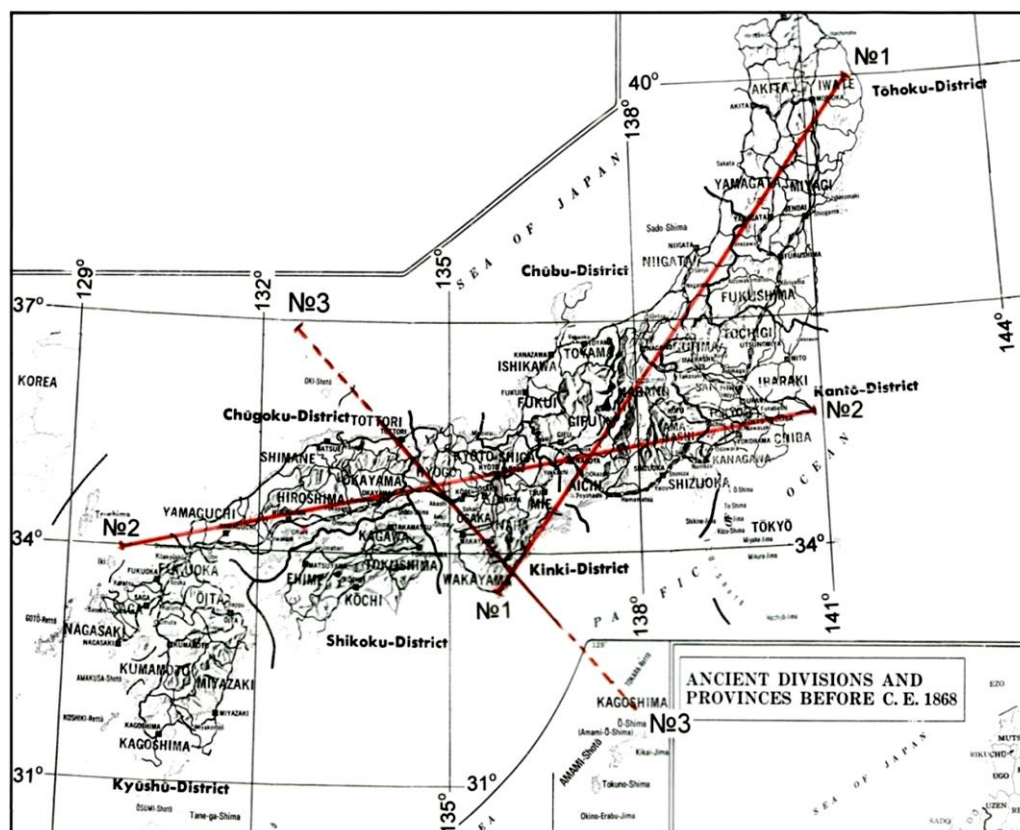


Рисунок 8—Схема расположения профилей сейсмической томографии

Для создания двумерных скоростных моделей по методике профильной томографии [51] выбран геотраверс, пересекающий субширотную часть острова Хонсю, от города Тоттори на северо-западном побережье до города

Сингу на юго-восточном (рисунок 8). Эпицентр землетрясения расположен в средней части геотраверса. Выбор направления геотраверса обусловлен необходимостью пересечения вкрест простирания плоскости разрыва и геологических структур, по которому, из соображений геометрической сейсмики непрерывных скоростных сред, результаты моделирования должны быть более надежны, чем по простиранию.

Основные элементы методики расчета двумерных скоростных моделей по материалам региональной сейсмометрии [48,51] сводятся к следующему:

- формированию системы встречных и нагоняющих линейных годографов продольных и поперечных рефрагированных волн по приведенным к нулевой глубине значениям вступления фаз P , P_g и S , L_g от землетрясений, эпицентры которых расположены вдоль заданного профиля;

- вычислению и построению двумерных скоростных моделей V_p и V_s .

Для решения задачи используются исходные данные:

- географические координаты (λ, φ) сейсмометрических пунктов (станций);

- географические координаты (λ, φ) , глубина (H) и время в очагах (T_0) , время вступления волн $(t_p$ и $t_s)$ от них на станции;

- обобщенная (одномерная) скоростная модель $(V_p$ и $V_s)$ земной коры района.

Годографы рассчитаны по одномерным моделям V_p и V_s (Ichikawa, Mochizuki (1971)) для интервала глубин 0-100 км и эпицентральных расстояний 0-960 км. Расчеты проведены А.П. Стихарным при выполнении работы [51].

Превращение системы годографов в двумерные скоростные модели V_p и V_s производилось по алгоритму и программе линеаризованного решения обратной задачи рефрагированных волн [25], обеспечивающего выделение локальных и протяженных неоднородностей с повышенными и пониженными значениями скорости.

Наиболее заметной особенностью моделей является высокая степень дифференциации значений V_p и V_s в предшествующий период (рисунки 9а и 10а) и существенно более спокойное поле изолиний скорости в последующий период (рисунки 9б и 10б). В первом случае значения V_p изменяются в пределах 5.0-8.2 км/с, V_s – в пределах 3.2-5.0 км/с, во втором $V_p=5.8-7.6$ км/с, $V_s=3.2-4.6$ км/с. При этом максимальными значениями ($V_p=6.8-8.2$ км/с, $V_s=4.2-5.0$ км/с) в предшествующий период выделяется непосредственно очаговая зона разреза на всю освещаемую 30-километровую мощность коры. Прилегающая периферия области подготовки в пределах $34^\circ-35^\circ$ характеризуется в это время пониженными значениями скорости: на северо-западе от разрыва $V_p=5.6\div 6.8$ км/с, $V_s=3.2\div 3.8$ км/с, а на юго-востоке от него соответственно $5.0\div 7.0$ км/с и $3.2\div 4.2$ км/с. На рисунках 8с и 9с приведены результаты сравнения параметров V_p и V_s между собой в предшествующий и последующий периоды. Отношение $V_{pдо}$ к $V_{pпосле}$ и $V_{sдо}$ к $V_{sпосле}$ в зоне очага значительно больше 1.0, а в пределах прилегающей области его подготовки

0.7÷1.0. Это означает, что в предшествующий период максимально повышены V_p и V_s в зоне очага и умеренно понижены в области подготовки землетрясения.

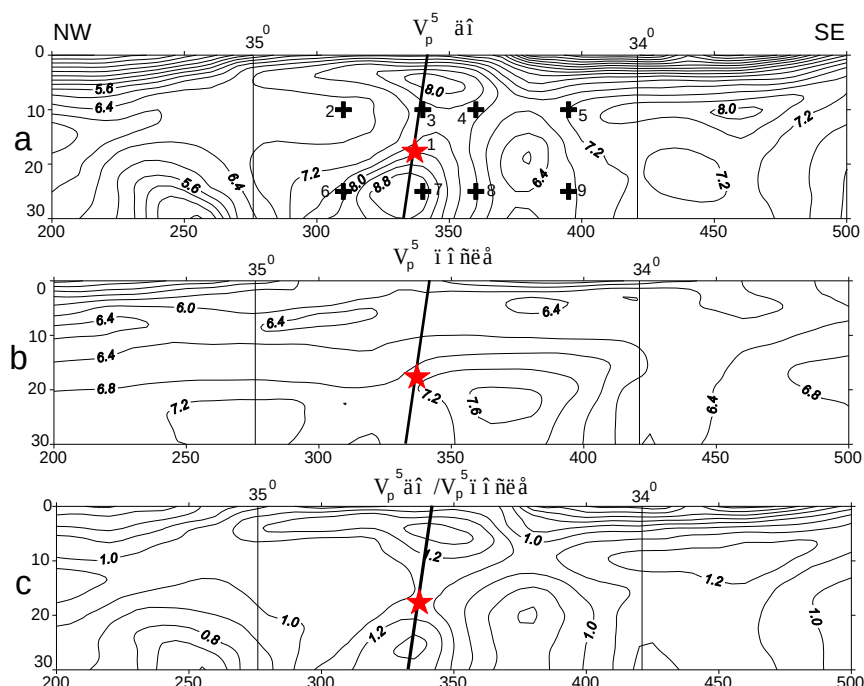


Рисунок 9— Двумерные скоростные модели по волнам Р системы годографов из 5 пунктов: а – в предшествующий период (крестиками обозначены точки в зонах локальных аномалий V_p); б – в последующий период; с – отношение а/б

Распределение значений V_p/V_s в плоскости разреза до и после землетрясения и их отношение представлены на рис. 4. В инструментально определенном очаге (звездочка) значение до (рисунок 10а) равно 1.67, а после (рисунок 10б) – 1.77, их отношение (рисунок 10с) равно 0.94. В данном случае подтверждается бытующее представление о соотношении значений этого параметра накануне и после землетрясения. Однако в целом в пределах области подготовки землетрясения в период до него вариации V_p/V_s по объему очень большие: от 1.5 до 2.4, тогда как после землетрясения поле значений меняется существенно меньше: от 1.6 до 2.0. Все точечные значения сгруппированы в таблице, при этом аномальные среди них выделены жирным шрифтом, а в последней строке таблицы приведены средние значения параметров для всех девяти точек (по столбцам). По отдельным точкам отображается все многообразие разрезов, как согласующееся, так и противоречащее существующим представлениям. В среднем (нижняя строка таблицы 3) из численных значений следует, что каждый из параметров V_p и V_s больше примерно на 10% в предшествующий период подготовки землетрясения относительно последующего. Отношения же V_p/V_s до и после землетрясения равны в пределах точности вычислений.

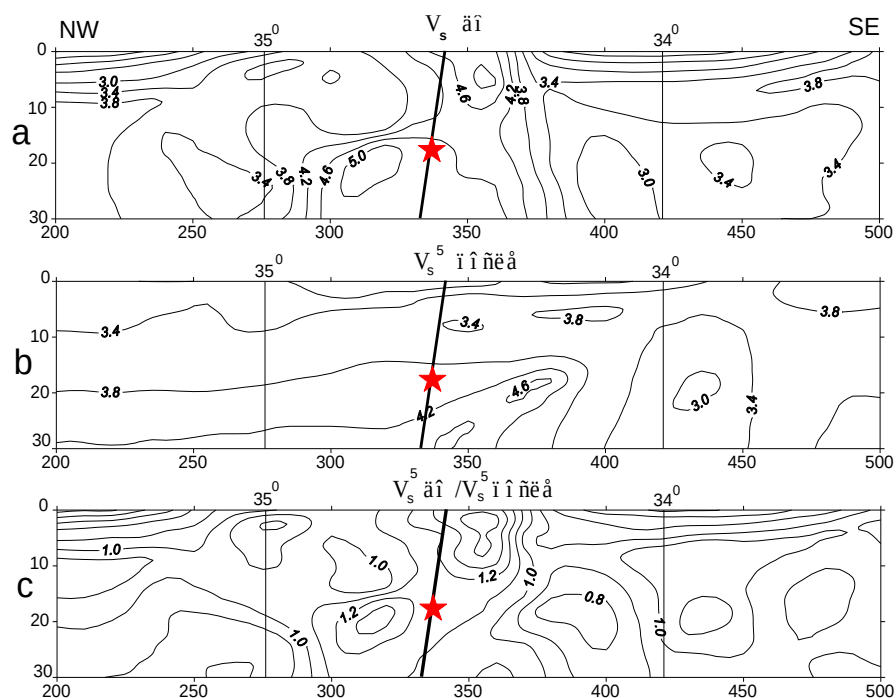


Рисунок 10– Двумерные скоростные модели по волнам S системы годографов из 5 пунктов: а – в предшествующий период; б – в последующий период; с – отношение а/б

Таблица3–Полученные данные геофизических параметров до и после исследуемого сейсмического события, для построения двумерных моделей

Номер точки на разрезах	Координаты		Значения скорости, км/с				Отношения				
	Х, км	Н, км	$V_p^{до}$	$V_p^{после}$	$V_s^{до}$	$V_s^{после}$	$\frac{V_p^{до}}{V_p^{после}}$	$\frac{V_s^{до}}{V_s^{после}}$	$\frac{V_p^{до}}{V_s^{до}}$	$\frac{V_p^{после}}{V_s^{после}}$	$\frac{V_p/V_s^{до}}{V_p/V_s^{после}}$
			1	2	3	4	5(1:2)	6(3:4)	7(1:3)	8(2:4)	9(7:8)
1(очаг)	338	18	7.80	7.00	4.68	3.97	1.11	1.18	1.67	1.77	0.94
2	310	10	6.76	6.30	3.60	3.58	1.07	0.98	1.88	1.76	1.01
3	340	10	7.43	6.40	4.20	3.50	1.16	1.20	1.77	1.83	0.97
4	360	10	7.33	6.40	4.50	3.50	1.15	1.28	1.63	1.83	0.89
5	395	10	7.22	6.36	3.40	3.70	1.13	0.92	2.12	1.72	1.23
6	310	25	7.90	7.08	5.05	4.16	1.12	1.21	1.57	1.70	0.92
7	340	25	8.40	6.97	4.70	4.35	1.20	1.08	1.79	1.61	1.11
8	360	25	7.20	7.50	4.60	4.40	0.96	1.05	1.57	1.71	0.92
9	395	25	6.75	7.00	3.00	3.55	0.96	0.85	2.25	1.97	1.14
Средние значения			7.42	6.77	4.20	3.85	1.10	1.09	1.81	1.77	1.02

исключением перемещения в сторону очага зоны повышенных значений $V_p/V_s \geq 2.0$ на детальном разрезе.

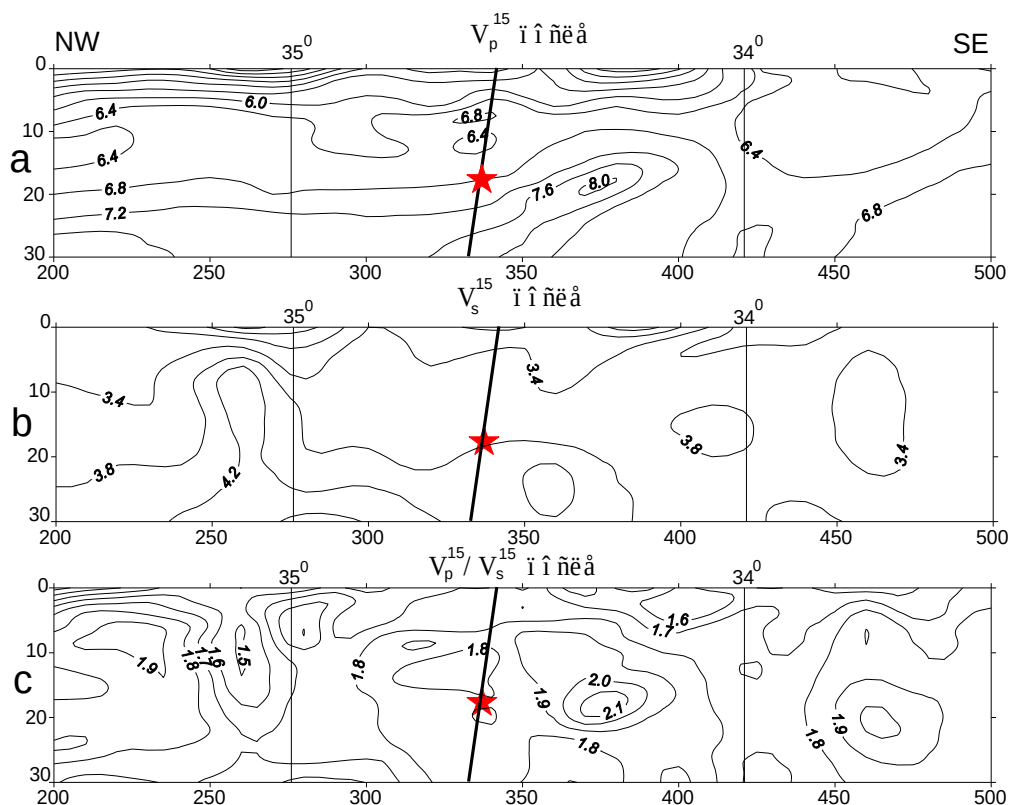


Рисунок 12– Двумерные скоростные модели в последующий период по данным системы годографов из 15 пунктов: а - V_p ; б - V_s ; в – отношение а/б

Картина локального распределения значений обсуждаемых параметров позволяет разделить объемы среды вокруг очага в пределах 34° - 35° размером порядка 140 км на непосредственно очаговую зону размером 40 км (отметки профиля 320-360 км) и окружающую область подготовки очага. Очаговая зона характеризуется одновременным аномальным повышением значений V_p и V_s в период подготовки землетрясения. Такое состояние параметров свидетельствует в пользу консолидационной модели подготовки тектонического землетрясения И.П.Добровольского [52] и противоречит остальным моделям, обсуждаемым в литературе [33,53].

Область подготовки в целом, включая зону очага, представляет собой мозаику чередующихся по латерали и вертикали локальных объемов с взаимно противоположной тенденцией изменения скоростных параметров и их отношения. Это состояние области подготовки наиболее сходно описывается моделью А. Сыдыкова [54]. Оно, предположительно, является основной причиной того, что выявленный в 40-60-х годах [36,49] прогностический критерий вариаций V_p/V_s не “работал” при массовых измерениях времен вступления волн Р и S на случайных (в зависимости от реально существующих взаимных расположений очагов и редкой сети пунктов наблюдений) эпицентральных расстояниях без учета высокой

скоростной дифференциации среды. В этом случае исследуется не изолированный локальный объем, а распределение интегрированных значений времени прохождения волн через систему блоков с противоположными по знаку вариациями скорости в них. Следовательно, постановка натурного эксперимента по выявлению очаговых зон и областей их подготовки в мониторинговом режиме на основе профильной или объемной томографии может быть эффективна только при весьма высокой разрешающей способности методики (наблюдений и обработки). Этому требованию отвечают высокосейсмичные районы Японии, Китая, Камчатки и др.

В итоге проведенного исследования по разработке и анализу моделей V_p , V_s и V_p/V_s земной коры Японии в области подготовки очага землетрясения Кобе (1995 г.) в предшествующий ему и последующий периоды с применением методики профильной сейсмической томографии получены следующие результаты и выводы по ним.

Основным результатом являются выявленная мозаичная скоростная структура области подготовки очага до землетрясения, не противоречащая модели А. Сыдыкова [54], и максимально повышенные значения V_p и V_s в зоне очага в этот же период, соответствующие консолидационной модели И.П. Добровольского [52].

В локальной зоне очага подтверждаются пониженные значения V_p/V_s до землетрясения и повышенные – после него (см. значения столбцов 7 и 8 в строке 1 таблицы 3). Однако средние значения этого параметра в окружающем объеме области подготовки очага практически неизменны в обоих случаях (до и после). Это обстоятельство приводит к практическому выводу о необходимости, с перспективой надежды на успех, применения высокоразрешающих систем наблюдений и методик при структурно-скоростном моделировании среды. Только в этом случае возможно выделение и картирование в пространстве и времени прогностического параметра V_p/V_s .

Суммируя все ранее полученные результаты изучения вариаций скоростей как продольных, так и поперечных волн, полученные в XX веке и в начале XXI века, на основании изучения этих вариаций по значениям времен пробега от очага до станции, то есть в пределах всей трассы сейсмического луча, а не только той его части, которая проходила через очаг, можно утверждать, что:

1) представлено достаточное количество материалов, достоверно свидетельствующих об изменениях средних скоростей вдоль всего луча как продольных, так и поперечных волн, которые можно связывать с произошедшими землетрясениями в районе станций;

2) наряду со случаями изменения скоростей сейсмических волн представлены случаи отсутствия таких изменений и перед сильными землетрясениями;

3) картина зарегистрированных изменений скоростей далеко не однозначна: наряду с “классическим” понижением значений V_p/V_s за некоторый срок до землетрясения и восстановлением их непосредственно перед землетрясением, наблюдались случаи, когда землетрясение происходило значительно позже (через год, например) восстановления указанного отношения, а также случаи, когда это отношение восстанавливалось в течении нескольких месяцев;

4) наблюдались случаи изменения отношения значений V_p/V_s как за счет изменения скоростей продольных волн, так и за счет изменений скоростей поперечных волн;

5) длина временного интервала аномалии не всегда пропорциональна силе землетрясения;

6) в разных местах вокруг землетрясения может наблюдаться качественно разная картина изменений скоростей;

7) в настоящее время, по крайней мере, обсуждаются две модели подготовки землетрясений, основанные на качественных предположениях-рассуждениях, – дилатантно-диффузионная (ДД) и лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), которые по-разному объясняют вариации скоростей в очаге [52,53], тем самым или опровергают друг друга, или предполагают возможность, по крайней мере, обоих механизмов изменения скоростей, следовательно, не отрицают возможность и иных механизмов. Однако обе модели основаны на предположении, что изменение скоростей происходит именно в очаге.

Изложенные выводы могут говорить только о том, что:

1) метод изучения изменений скоростей, связанных с землетрясениями, по временам пробега волн от источника до станции является недостаточным для его использования в качестве обнаружения однозначных предвестников, что можно объяснить тем, что он недостаточен для восстановления истинной объемной картины изменения скоростей, связанных с землетрясениями;

2) установлено, что землетрясения, по крайней мере, часто могут сопровождаться изменениями скоростей сейсмических волн, то есть, необходима разработка корректного метода объемного мониторинга скоростей этих волн, который позволит получить истинную картину процессов, происходящих в земной коре, как в очаге, так и в его окружении.

Именно поэтому и возникла необходимость исследования возможностей прогноза землетрясений с помощью метода 4D сейсмической томографии, то есть метода изучения скоростей как функций трех пространственных и временной координаты: $V_p(x, y, z, t)$ и $V_s(x, y, z, t)$ и их отношения.

5 Обоснование постановки задачи разработки программно-математического обеспечения 4D сейсмической томографии

5.1 Решение обратных задач методом сейсмической томографии

Проблема прогноза землетрясений до сих пор не имеет решения, более того, все большее сегодня получает распространение мнение о невозможности прогноза, по крайней мере, времени, а, следовательно, и силы ближайшего по времени в данном регионе землетрясения.

Существующие методы прогноза основаны на данных наблюдений трех типов: 1) наблюдений за деформациями и наклонами земной поверхности, 2) наблюдения за пространственно-временным ходом сейсмичности, 3) наблюдения за различными геофизическими, геохимическими и гидрогеологическими параметрами геологической среды.

Наблюдения первого типа данных имеет наибольшую историю и чем больше накапливается данных, тем больше выявляется все новых и новых особенностей в характере деформаций и наклонов. Второй тип данных является результатом изучения режима слабых и средних сейсмических событий, который неоднозначно связан с сильными сейсмическими событиями. Третий тип данных, кроме сейсмических, также обусловлен действием эндогенных факторов.

Однако ясно, что предвестники, не свободные от влияния эндогенных факторов, в лучшем случае могут быть только необходимыми, но не достаточными указателями на возможное землетрясение, поскольку они, могут действовать как триггеры – спусковые механизмы.

Задача определения скоростного строения геологической среды по кинематическим данным в динамике имеют широкую область применения в науках о Земле: начиная от применения томографических методов в инженерной сейсморазведке до построения глобальных моделей земной коры и мантии в фундаментальных исследованиях. Доказано, что если скорости продольных волн позволяют судить о структурных особенностях строения земной коры, то привлечение поперечных волн дает принципиально новую информацию – о петрофизических характеристиках вещества. Совместное же использование скоростей продольных и поперечных волн, в частности, их отношение V_p/V_s , дает важную информацию не только при изучении структурно-тектонических элементов земной коры, но и при построении плотностных и петрологических ее моделей.

Сейсмические данные о параметрах среды (скорости, поглощение продольных и поперечных волн) несут непосредственную информацию о глубинных процессах в земной коре. Другое дело, что до сих пор по сейсмическим данным изучались только изменения средних скоростей вдоль всей траектории сейсмического луча, а не его глубинной части, которая только и может проходить через очаг. Поэтому полученные до настоящего времени данные о вариациях или об отсутствии таковых средних скоростей

до и после землетрясения не могут давать однозначную информацию о поведении скоростей в локальной области очага. Этим, в частности, может быть обусловлена противоречивость данных о поведении скоростей при подготовке землетрясений, полученных в разных случаях.

5.2 Разработка алгоритма сейсмической томографии 4D земной коры Алматинского сейсмоактивного района

На современном этапе сейсмологических наблюдений, начиная с 2000 года, в сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) создается цифровая база данных о землетрясениях, зарегистрированных на сейсмостанциях Алматинского сейсмоактивного района. База содержит данные о месте и времени произошедшего события, координаты эпицентра, глубину очага, магнитуду, название сейсмостанции, время регистрации продольной и поперечной волн [16]. С появлением электронной базы данных появилась возможность изучения временных изменений геофизических полей в земной коре как показателя геодинамической активности с помощью метода 4D сейсмической томографии.

Обоснованием для разработки нового алгоритма сейсмической томографии послужило то, что существующие подходы не удовлетворяют решению задачи мониторинга скоростей для выявления локальных аномалий во времени. Среди причин этого можно указать следующее:

1. Скорости и, прежде всего, их изменения во времени, в земной коре, под действием давления, присущего сейсмоактивным регионам, обладают анизотропией.

2. Задачу обнаружения вариаций скоростей под действием процессов подготовки землетрясений в конкретном объеме земной коры естественно решать на основе регистрации землетрясений, происходящих именно в пределах изучаемого объема. Определение скоростей и их вариаций по удаленным землетрясениям неоднозначна при наличии зон понижения скоростей, более неустойчива и громоздка по вычислительным затратам.

3. Существующие программы сейсмической томографии реализуют стандартную постановку задачи томографии, не учитывающую субгоризонтальную слоистость скоростной модели земной коры, что также усложняет задачу, поскольку отсутствует согласованность лучей распространения волн и способа аппроксимации скоростной среды увеличивается неоднозначность совместного определения скоростей в разных ячейках, координат и времени источников (очагов).

Сложность использования алгоритмов томографии заключается в том, что выполнение такого расчета достаточно трудоемко и применение в общей схеме приводит к необходимости решения нелинейной задачи, которая является неустойчивой и неоднозначной, решение которой сильно зависит от начального приближения и наличия других априорных данных [55-57].

Значительное влияние модели начального приближения определяется тем, что поиск решения томографической задачи организуется в окрестности этой модели и для повышения устойчивости функции находятся минимальные по норме поправки к этой модели. Последнее также означает, что получаемые отклонения от исходной модели надо рассматривать не как абсолютные значения, а как сравнительные: локализуются области повышения или понижения скоростей относительно исходной модели. И поскольку достоверно определяются лишь знак отклонения скорости и качественно его амплитуда (большее или меньшее), то при решении томографической задачи речь можно вести не о количественных изменениях сейсмических скоростей, а больше о сравнительных.

Кроме того, с помощью сейсмической томографии в стандартной постановке можно определить лишь некоторым образом осредненное изменение скоростей $V_p(x, y, z)$ и $V_s(x, y, z)$ в конкретной части объема протекания сейсмических процессов по всем направлениям прохождения используемых лучей распространения сейсмических волн, в каждом из которых оно в напряженной анизотропной среде различно. Между тем, очаги землетрясений на Северном Тянь-Шане связаны с взбросами, то есть с горизонтальным сжатием, и при этом максимальное изменение (уменьшение) скоростей происходит в направлении минимального главного напряжения, или в данном случае в вертикальном направлении.

Как показал опыт применения некоторых из стандартных схем сейсмической томографии на Тянь-Шане [58], при имеющейся в этом регионе сети станций и присущим ему режимом сейсмичности местоположение и форма выделенных локальных неоднородностей с помощью разных (по разным алгоритмам) известных программ сейсмической томографии по одинаковым выборкам исходных данных или выделенным по разным выборкам с помощью одной программы значительно различаются между собой с увеличением глубины. Это говорит о том, что стандартная схема сейсмической томографии при обнаружении локальных изменений во времени скоростей сейсмических волн при существующей сети станций, не может дать достоверной информации на Северном Тянь-Шане.

При стандартной постановке задачи сейсмической томографии для случая, когда источниками сейсмических волн являются местные землетрясения, известно [55-57] решение нелинейной системы уравнений:

$$T - T_0 = \sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{\partial T}{\partial \gamma_k} \right) \Delta \gamma_k + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta z + \Delta t \right] \quad (1),$$

где:

T – наблюдаемое время;

T_0 – расчетное время;

$\partial T / \partial \gamma_k$ – частные производные времени пробега по параметрам (медленности – величине, обратной скорости) модели;

$\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$, $\partial T/\partial z$ – частные производные времени пробега по координатам источника;

$\Delta \gamma_k$ – поправки к начальным значениям параметров модели;

Δx , Δy , Δz – поправки к координатам очага;

Δt – поправки ко времени в очаге.

Но учитывая сложную анизотропную среду разработан подход для ослабления влияния условия анизотропии, то есть для достижения лучшей совместности системы уравнений (1) возможно использование только субвертикальных лучей прохождения сейсмической волны. Это достигается сведением четырехмерной задачи изучения продольных и поперечных скоростей $V_p(x, y, z, t)$, $V_s(x, y, z, t)$ к серии одномерных задач $V_p(x_i, y_i, z, t_n)$, $V_s(x_i, y_i, z, t)$, $i = 1, 2, \dots, I$, где I – число точек в пределах полигона, для которых вычисляются зависимости скорости от глубины для каждой точки (x_i, y_i) и интервалов времени $n=1, 2, \dots, N$ по временам прихода волн из очагов к станциям, расстояния которых до данной точки (x_i, y_i) по горизонтали меньше некоторого заданного диаметра $2R$. В этом случае используются только сейсмические волны, распространяющиеся в элементарном цилиндре радиуса R (или в усеченном конусе с заданными радиусами на вершине и в основании) субвертикально и которые в субгоризонтально слоистой среде даже при наличии локальных латеральных неоднородностей в слоях испытывают лишь слабые преломления, то есть лучи распространения этих волн практически прямолинейны.

$$\begin{aligned} V_p(x, y, z, t) &\rightarrow V_p(x_i, y_i, z, t_n), i = 1, 2, \dots, I, n = 1, 2, \dots, N; \\ V_s(x, y, z, t) &\rightarrow V_s(x_i, y_i, z, t_n), i = 1, 2, \dots, I, n = 1, 2, \dots, N; \end{aligned} \quad (2)$$

при выборе станций с координатами x_s, y_s в пределах радиуса R_c вокруг точки x, y по условию:

$$R_c \geq [(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2]^{1/2} \quad (3),$$

при выборе событий с координатами x_q, y_q, h_q по условию:

$$[(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2]^{1/2} \leq h_q \tan \varphi + R_0 \quad (4),$$

где h_q – глубина очага, φ – угол наклона образующей конуса, R_0 – радиус верхней части конуса [56].

Все это значительно упрощает и уточняет расчет лучей и делает задачу определения скоростей линейной (при заданных станционных поправках и координатах землетрясений на каждой итерации).

В данной постановке задачи определяются изменения скоростей только в вертикальном направлении, что по существующим представлениям, основанных на модельных экспериментах, является направлением максимального их изменения под действием горизонтального сжатия. Не менее важным преимуществом данного подхода является и то, что матрица

системы уравнений при решении указанной задачи становится треугольной, что значительно упрощает решение получаемой при этом системы уравнений [56, 59].

В этом случае система возбуждения-приема аналогична системе возбуждения-приема при сейсмическом каротаже, который дает наиболее точную информацию о скоростях. И, наконец, данный подход позволяет выбирать надежным образом исходное приближение путем организации следующего итеративного процесса. На первой итерации используется одномерная модель в пределах всего полигона и времени наблюдений, которая определяется в случае глубинных источников в пределах самой модели достаточно устойчиво. По крайней мере, можно исследовать результаты решения с различными исходными приближениями одномерной модели и выбрать оптимальную. Затем полигон делится на части во времени и в пространстве с их перекрытием и находится одномерное решение для каждой части при исходном приближении, равном результату решения на предыдущей итерации. Деление частей на более мелкие продолжается до получения нужной пространственной и временной подробности решения. При этом надо учитывать, что дробность деления в пространстве и во времени обратно пропорциональны друг другу, поскольку необходимо соблюдать определенный минимум сейсмических событий, попадающих в элементарный пространственно-временной блок.

Поскольку в данном алгоритме решения томографической задачи определяются параметры одномерной модели, то при программной реализации схемы оказалось достаточным использование программы «VELEST» (автор E.Kissling, Institute of Geophysics, Zuerich [60]), а также вспомогательных макросов «EXSEL» для выборки данных землетрясений из общей базы сейсмологических данных СОМЭ по Алматинскому полигону.

Основная процедура для одной итерации (и с незначительными изменениями, например для режима `single_event_mode`) кратко изложена в блок-схеме, приведенной на рисунке 13. Основные (печатные) выходные данные «VELEST» отражают эту процедуру и предоставляют подробную информацию о многих промежуточных этапах расчета, откуда следует, что соответствующие управляющие параметры получены в ходе множественных итераций «VELEST».

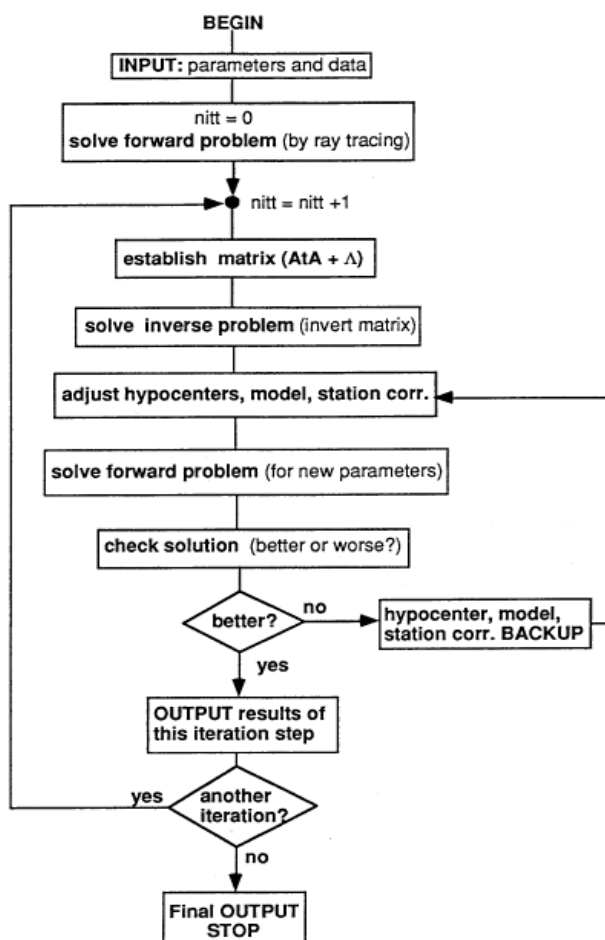


Рисунок 13– Обзор процедуры VELEST

В данной версии «VELEST» настроен на инвертирование данных в одновременном режиме максимум с 658 землетрясений ($iermax=658$) и максимум 50 взрывов ($inshotsmax=50$) с максимальным количеством наблюдений 500 на событие ($maxobsperevent=500$). Текущая настройка также допускает макс. количество 500 станций в списке станций ($istmax=500$), макс. 2 модели скоростей ($itotmodels=2$) с максимальным количеством слоев 100 на модель скоростей ($inltot=100$), но если нужны другие размеры, надо изменить параметры файла VEL_COM.F и скомпилировать исходный код с помощью (оптимизированного) F77 компилятор[60].

В[60] программе «VELEST» можно рассчитать и смоделировать одномерную скоростную модель по данным землетрясений, но в этом расчете использовалась 1D скоростная модель разработанная в институте сейсмологии под руководством Щацилова В.И. (см.таблицу2)на основе обобщений материалов региональных сейсмических зондирований земной коры (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, КМПВ, профильная томография), проводившихся для решения различных задач.Данная референтная скоростная модель отвечает всем требованиям изменения скорости для структурно-вещественных характеристик геологической среды конкретно для

исследуемой территории[61].Так выглядит входной файл референтной скоростной модели среды (рисунок 14).

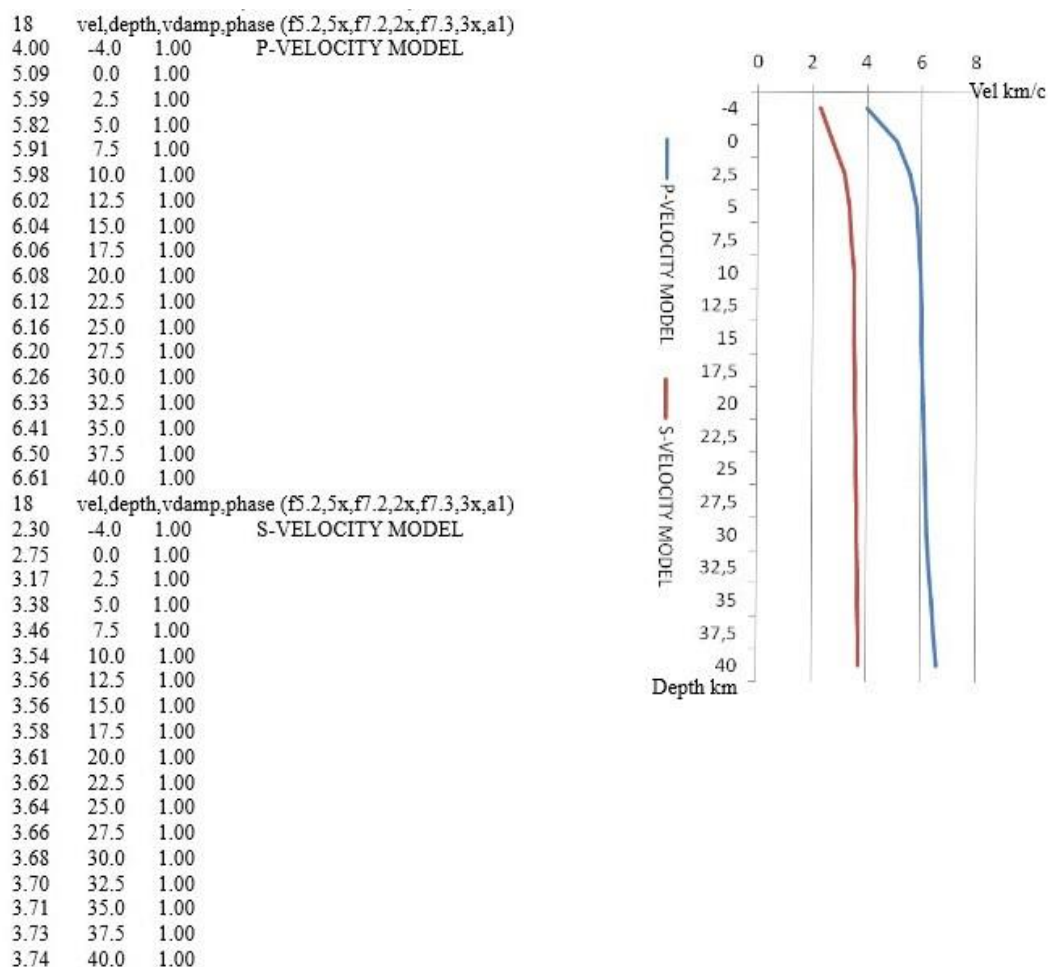


Рисунок 14– 1Dскоростная референтная модель

Данные о сейсмостанциях и землетрясениях представлены ГУ «СОМЭ КН МОН РК» в том виде, который приемлем для расчета в программе «VELEST». Для Алматинского сейсмоопасного района расположение станций редактируется и имеет вид матричной сетки(рисунок 15).

Чтобы не загружать расчет лишними данными программы «VELEST», вспомогательные макросы «EXSEL» помогают отредактировать события для временного промежутка на заданной территории, отображенной на рисунке 15, что значительно уменьшает затраченное время на расчет и распределении значений, как по вертикали, так и по латерали.

Полученные матрицы вводятся в программу «Golden Software Surfer», которая позволяет моделировать и анализировать любые поверхности, в том числе и слоистые [62].

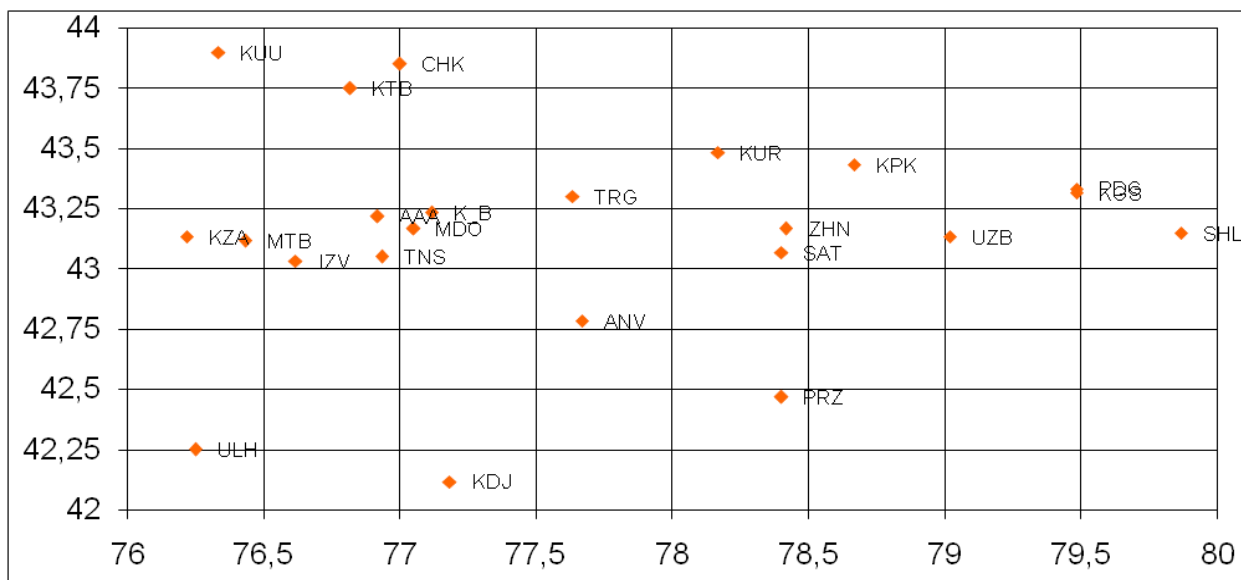


Рисунок 15– Вид прогностического полигона Алматинского сейсмоопасного района

5.3 Сейсмическая томография по данным землетрясений Алматинского сейсмоопасного района

Скоростные модели, полученные в 2000-х годах, которые построены в результате переинтерпретации материалов сейморазведочных работ методами ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ и КМПВ будем считать статичными, потому как модель разработана по данным, которые получены в определенный временной промежуток. Зная, что литосфера Земли неустойчива, в ней всегда происходят различные физико-химические процессы, сопровождающиеся, изменением геологической среды, а значит, происходит изменение и физических свойств среды во времени и пространстве.

Целью данного исследования является разработка новой томографической модели скоростного строения геологической среды Алматинского сейсмоопасного района по кинематическим данным от записей землетрясений, произошедших за временной отрезок 2002-2022 гг. и изучения вариаций скоростных параметров в очагах наиболее значимых землетрясений.

2D и 3D моделирование материалов прошлых лет показали, что земная кора и мантия на исследуемой территории крайне неоднородны, с различной степенью контрастности структурных аномалий [17, 19, 21].

В результате расчетов по данным каталога землетрясений за 2002-2022 гг. получена 3DP- скоростная модель земной коры Алматинского сейсмоопасного района (рисунок 16), которая позволяет сравнить распределение пространственных скоростных неоднородностей строения геологической среды исследуемой площади на основе построения модели по данным записей землетрясений на сейсмостанциях полигона.

Сравнительный анализ данных по сейсморазведочным работам и землетрясениям проводился по координатам профилей Каскеленский (разрез по линии АВ) и Фергана-Подгорное (разрез по линии CD). Расположение линий разреза в кубе выбрано так, чтобы проследить структурные неоднородности в различных направлениях.

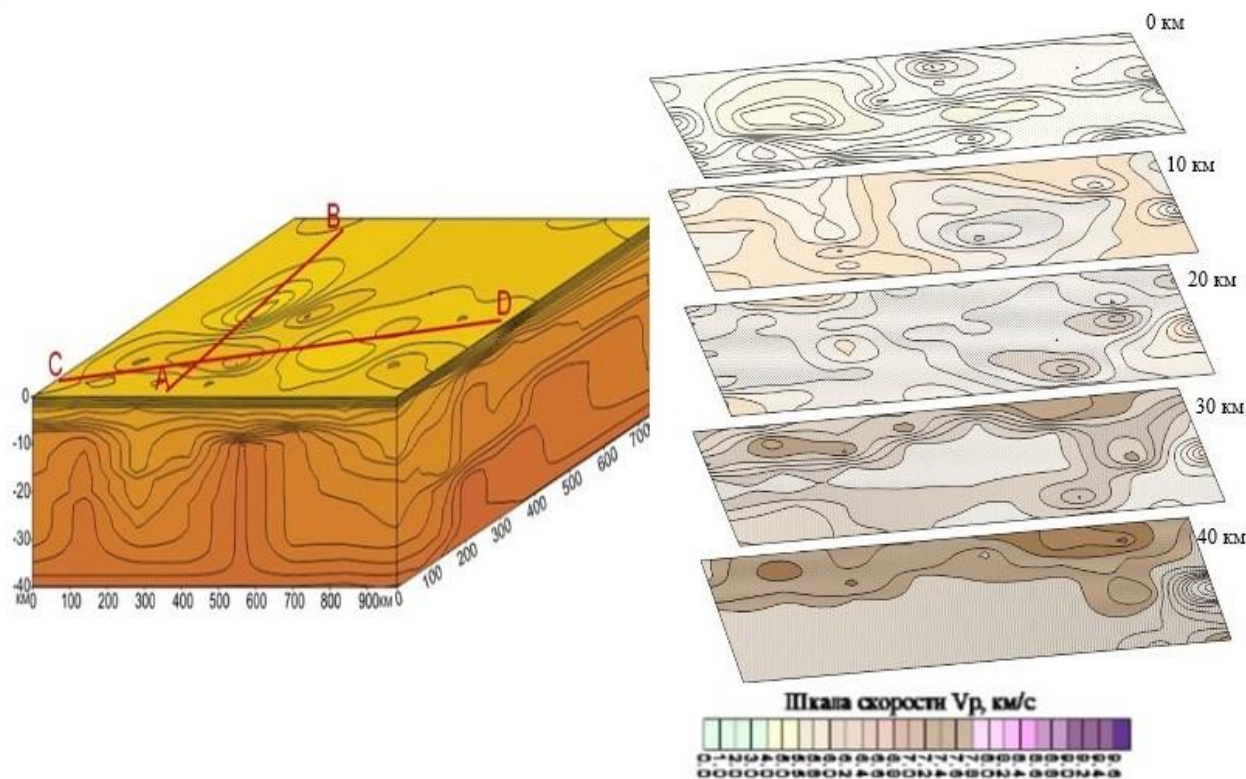


Рисунок 16– Объемная Р-скоростная модель земной коры по данным землетрясений, вид срезов на гипсометрических уровнях 0, 10, 20, 30, 40, км и линии разреза по профилям

Для анализа корректности составления и расчета 3D скоростной модели на рисунке 23 представлено пересечение для разрезов по линиям АВ и CD (рисунок 17).

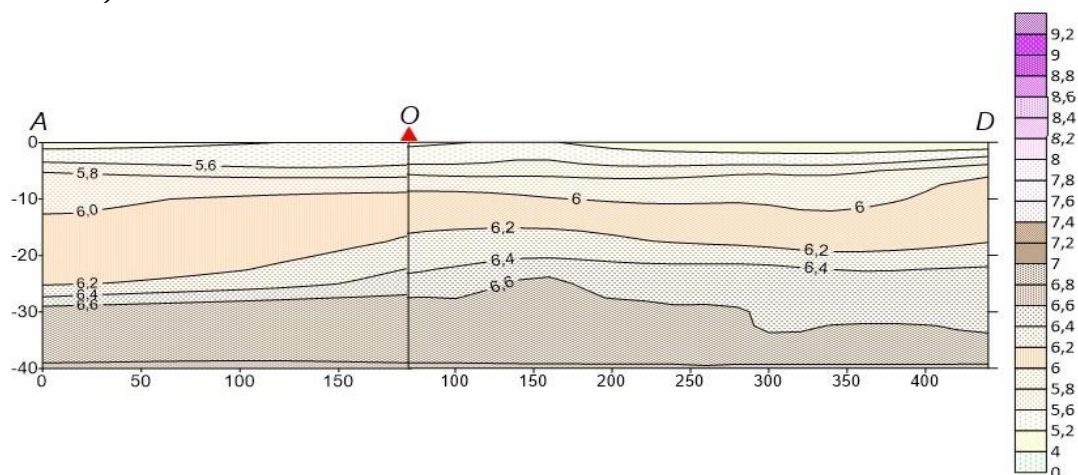


Рисунок 17– Вид пересечения геофизических разрезов из объемной Р-скоростной модели по линиям АВ и CD

Разрез по линии АВ имеет практически меридианальное простирание и соответствует расположению профиля Каскеленский, пересекает такие структуры как, Кунгей-Заилийский Алатау, Алматинскую впадину, выходит на плато Карой и имеет существенно неравномерную изученность геологическими и геофизическими методами. Наиболее изученными являются районы, расположенные вблизи зон влияния основных разломных узлов, городских агломераций и добывающих предприятий.

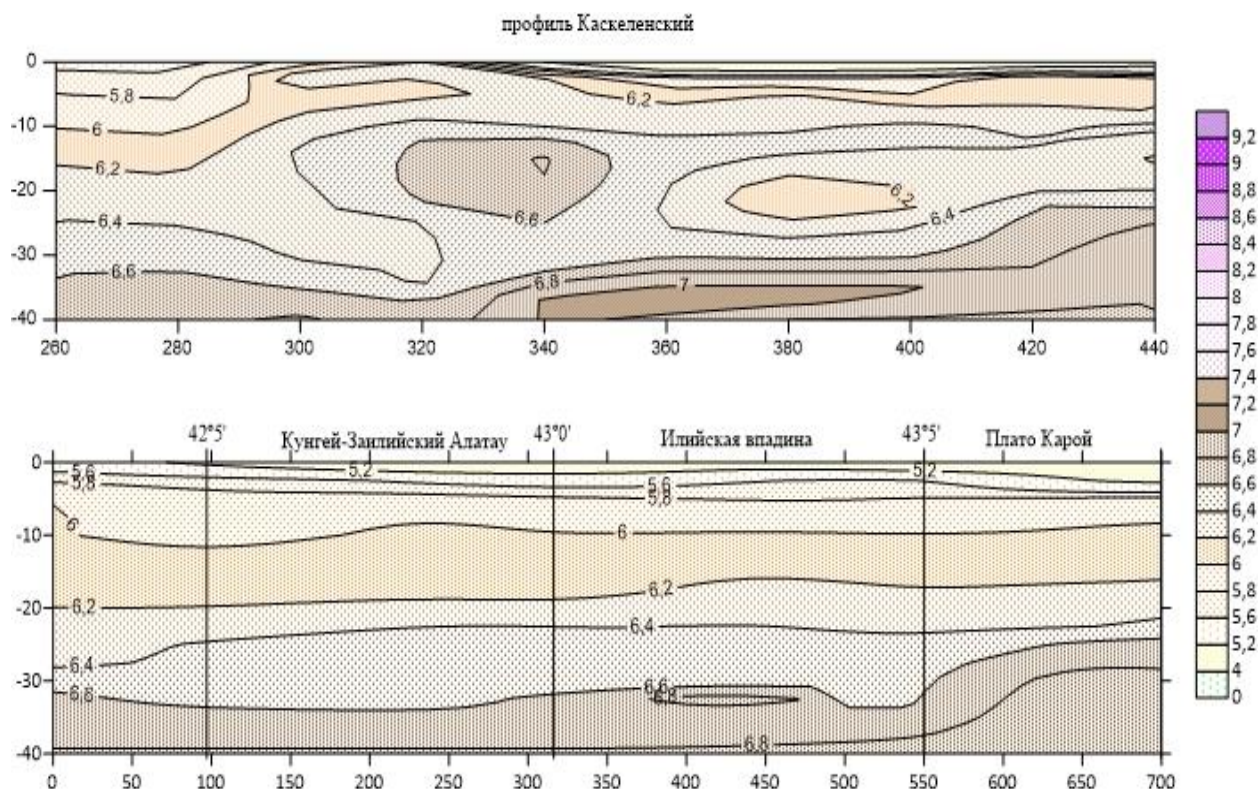


Рисунок 18–Сравнительный анализ геофизических профилей: а) Профиль Каскеленский; б) разрез АВ по аналогичным координатам, из томографического куба

При качественном анализе геофизических разрезов видно, что консолидированная кора имеет слоисто-однородный пологий рисунок разреза АВ, не выделяя особо каких-либо осложнений в виде скоростных аномальных включений. По скоростным характеристикам отчетливо выделяется переход с Илийской впадины на плато Карой, который прослеживается увеличением мощности базитового и ультрабазитового слоев (рисунок 18).

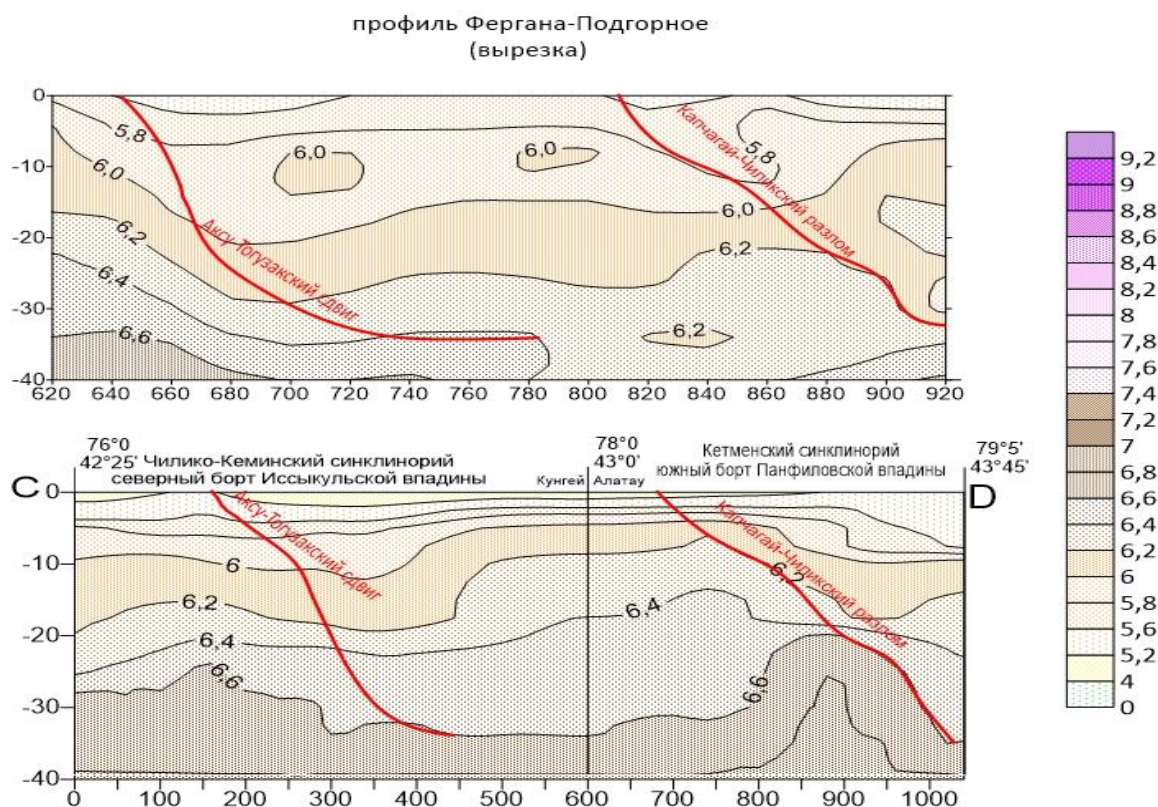


Рисунок 19– Сравнительный анализ геофизических профилей: а) Профиль Фергана-Подгорное; б) разрез CD по аналогичным координатам, из томографического куба

Разрез по линии CD имеет субширотное простираие и соответствует расположению профиля Фергана – Подгорное (рисунок 19). При анализе представленных разрезов имеется значительное расхождение численных скоростных характеристик в целом. Если не учитывать влияния нестабильных условий в пунктах возбуждения колебаний, то основными причинами изменения характеристики упругих волн вдоль профиля можно считать изменение строения изучаемой среды, а также непостоянство расстояний от источника до приемника. Из-за непостоянства этого расстояния возможны значительные изменения волновой картины по разрезам, что наблюдается в сравнительном анализе скоростных полей.

Р-скоростная модель профиля Фергана – Подгорное выражена характерными чертами: повышенная мощность верхнего сиалического (гранито-гнейсового) слоя консолидированной коры; локальные высокоскоростные выступы ниже лежащих гранулитов-гнейсового слоя, которые контролируют внутрикоровую пространственную позицию ядер основных орогенов Заилийского и Кунгей Алатау.

В разрезе по линии CD хорошо коррелируются структурные неоднородности со скоростными характеристиками среды. Увеличение базитового слоя в районе Кунгей-Заилийского Алатау и обратная картина на флангах разреза соответствует типу высокосейсмичных орогенов [21,24]. Это согласуется и распределением очагов землетрясений в данном

регионе. Хорошо скоростными характеристиками фиксируются Капчагай-Чиликский разлом и Акусу-Тогузакский сдвиг, которые картируются вкрест простирания основных геологических структур и имеют отличительные скоростные характеристики.

Учитывая масштаб и специфику проводимых исследований, и для того, чтобы сопоставить различные представления о глубинном строении и геологическом развитии изучаемой территории с результатами выполняемых работ, основное внимание уделено структурно-тектоническим особенностям строения лишь наиболее крупных геотектонических структур, пересекаемых рассматриваемыми разрезами.

При современном состоянии геологической и геофизической изученности осадочных толщ и земной коры в целом часто имеются обобщенные сведения о модели исследуемой среды. К такой сейсмической априорной информации, относятся:

а) общие закономерности распределения сейсмических скоростей с глубиной и характер их изменения по площади;

б) наличие в разрезе достаточно протяженных отражающих и преломляющих границ; в) устойчивость их физических параметров;

г) углы наклона и форма границ, а также взаимное расположение границ, наличие угловых и азимутальных несогласий как объектов исследований;

д) наличие разрывов и интрузивных (эффузивных) тел.

Здесь не всегда оценивается (так как это пока еще очень трудно) степень схематизации модели, и поэтому нередко очень сложные схемы задаются там, где они заведомо не могут рассчитывать на получение материалов, поддающихся количественной интерпретации. В каждом случае вопрос природы границ решается индивидуально, так как сведения о моделях могут быть почерпнуты только из самих сейсмических наблюдений. Модели, получаемые по другим геофизическим и геологическим методам, как правило, отличаются еще меньшей надежностью [58].

Физические признаки основываются на получаемых в результате интерпретации данных об эффективных, граничных и пластовых скоростях распространения упругих волн в среде. Полученные значения скоростей, а также их распределение по глубине и вдоль профиля не должны противоречить имеющимся (или предполагаемым) для исследуемого района сведениям. Наличие противоречий служит лишь поводом для повторного критического анализа волновой корреляции и поиску других методов решения задачи. Большое значение имеет согласованность независимых определений скорости по волнам разных типов, увязка с данными по другим физическим свойствам (плотности и др.) в соответствии с существующими корреляционными зависимостями.

Геологические признаки охватывают особенности морфологии геологических поверхностей, с которыми отождествляются сейсмические границы. Имеются в виду глубины залегания границ, углы их наклона,

кривизна, мощности слоев, согласованность структурных планов на разных уровнях разреза, характерные для данного района особенности структурных форм.

Качественная интерпретация полученных сейсмических моделей связана в первую очередь, с выделением геологических структур земной коры исследуемого региона по упруго-прочностным свойствам геологической среды. При рассмотрении изотропной среды, упруго-прочностные свойства этой среды отлично описывают распространение сейсмических волн, которые зависят от физического состояния горных пород и, как следствие, изменяются во времени и пространстве. Основными важными параметрами в сейсмологии являются вариации скорости продольных волн V_p , скорости поперечных волн V_s , и их отношения V_p/V_s .

6 Вариации скоростных параметров в очаговых зонах характеристических землетрясения Алматинского сейсмоопасного района

Результаты данных исследований, как видно из разрезов, неоднозначны, но уникальность материала, собранного за цифровой инструментальный период на Алматинском прогностическом полигоне позволила использовать данную методику, как базовую, в расчетах распределении скоростей в слоистых средах при подготовке сильных землетрясений.

Для изучения вариаций геофизических параметров в очаговых зонах землетрясений выбраны наиболее уникальные землетрясения для исследуемого района Капчагайское, Торайгырское и Сарыжаское землетрясения. Данные сейсмические события хорошо изучены, как сейсмологами, так и геологами, ниже приведены характеристики и данные исследования, произошедших землетрясений [63, 64, 65].

Капчагайское (Первомайское) землетрясение. 1 мая 2011 г. в 08 часов 31 минуту по времени Астаны жители г. Алматы подземные толчки, интенсивность которых на территории города составила примерно 4-5 баллов. Землетрясение почувствовали жители г. Алматы, а также ближайших агломераций [64]. Координаты землетрясения $j = 43.620$, $l = 77.70$, магнитуда $m_b = 5.3$, $M_s = 4.8$, $M_w = 5.4$, $mp_v = 5.9$, $K = 13.1$, по данным KNDC. Землетрясение характеризуется повторными ощутимыми подземными толчками всего дня и последующей ночи небольшой интенсивности 2-3, 3-4 балла. Станция сильных движений KNDC находилась на расстоянии 79 км от эпицентра Капчагайского землетрясения, станция Подгорная – 153 км. При главном толчке пиковые ускорения грунта в пункте KNDC составили 8.4 см/с^2 . По шкале интенсивности землетрясений MSK-64(K) такие значения характеризуют интенсивность 4 балла. Станция KNDC расположена в южной части города, сильнее это землетрясение ощущалось в северной части Алматы, где интенсивность могла достигать 5 баллов.

Торайгырское землетрясение. 31 мая 2012 года 03:20 местного времени (30.05 2012 21:20 UTC) произошло на расстоянии 150 км от г. Алматы, в районе горного массива Кокпек на юго-востоке Казахстана [65].

Координаты землетрясения $j = 43.380$, $l = 78.770$, магнитуда $m_b = 5.7$, $M_w = 5.3$, $mp_v = 6.0$, $K = 13.7$. На территории г. Алматы землетрясение ощущалось с интенсивностью 4 балла. Максимальные амплитуды ускорений наблюдались для станций KNDC (146 км) и PDGK (144 км) и составили 9.2 см/с^2 для обеих станций, в обоих населенных пунктах интенсивность составила 4 балла по шкале MSK-64 (K).

Сарыжаское землетрясение. 28 января 2013 г. в 22:38 местного времени (16:38 UTC) жители г. Алматы ощутили интенсивные колебания. Землетрясение произошло в 225 км на юго-восток от города на территории Райымбекского района Алматинской области на расстоянии 40 км от поселка Сарыжаз. Координаты землетрясения $j = 42.520$, $l = 79.670$, магнитуда $m_b =$

6.1, $M_s = 6.2$, $M_w = 6.1$, $mv = 6.5$, $K = 14.7$ [65]. Интенсивность сотрясения грунта в населенных пунктах Тасаш, Сарыжаз и Нарынкол вблизи эпицентральной зоны составила 6 баллов по международной сейсмической шкале MSK-64(K). В поселке Кеген – 4-5 баллов. В городе Алматы интенсивность составила 3-4 балла, в городе Талдыкоргане – 2 балла [6]. По сообщениям Казинформ-агентства со ссылкой на агентство «Синьхуа», на территории КНР были повреждены 4 062 жилых дома, пострадали 14 217 человек. На территории Казахстана жертв и серьезных разрушений не было. Впервые сутки после главного толчка последовало более 500 афтершоков, из которых некоторые были ощутимыми. Афтершоковая активность продолжалась более 9 месяцев, последний ощутимый афтершок зарегистрирован 6 сентября 2013 года. Максимальная амплитуда ускорения была зафиксирована станцией Подгорная PDGK $A_{\max} = 5.8 \text{ см/с}^2$. Немного меньшие значения наблюдались по станции KNDC $A_{\max} = 3.5 \text{ см/с}^2$.

При построении графиков изменения скорости до и после сейсмического события использовалась программа «VELEST»[60], в которой рассчитывались численные массивы изменения скоростных свойств геологической среды в период 1 год и 5 лет до и после исследуемого землетрясения. Р- и S-скоростные модели отображают структуру геологической среды в периоды до и после землетрясения. Результаты представлены набором цифровых матриц значений скоростных параметров (V_p , V_s , V_p/V_s) и в графическом варианте в виде структурных схем в изолиниях на гипсометрических уровнях земной коры от 0 до 40 км с дискретностью в 2.5 км. Полученные результаты дают возможность анализировать, как на гипсометрическом уровне, который соответствует произошедшему событию, так и в виде графиков, по изменению скоростных параметров непосредственно в эпицентре очага. По формуле (2) следовательно, что использование дифференцирования по координатам источников позволяет в лучшей степени уточнять неоднородности исследуемой среды.

Ниже приведены графики зависимости скоростных параметров от глубины построены для Капчагайского (Первомайского), Торайгырского землетрясений, аналогичные расчеты проведены и для Сарыжазского землетрясения.

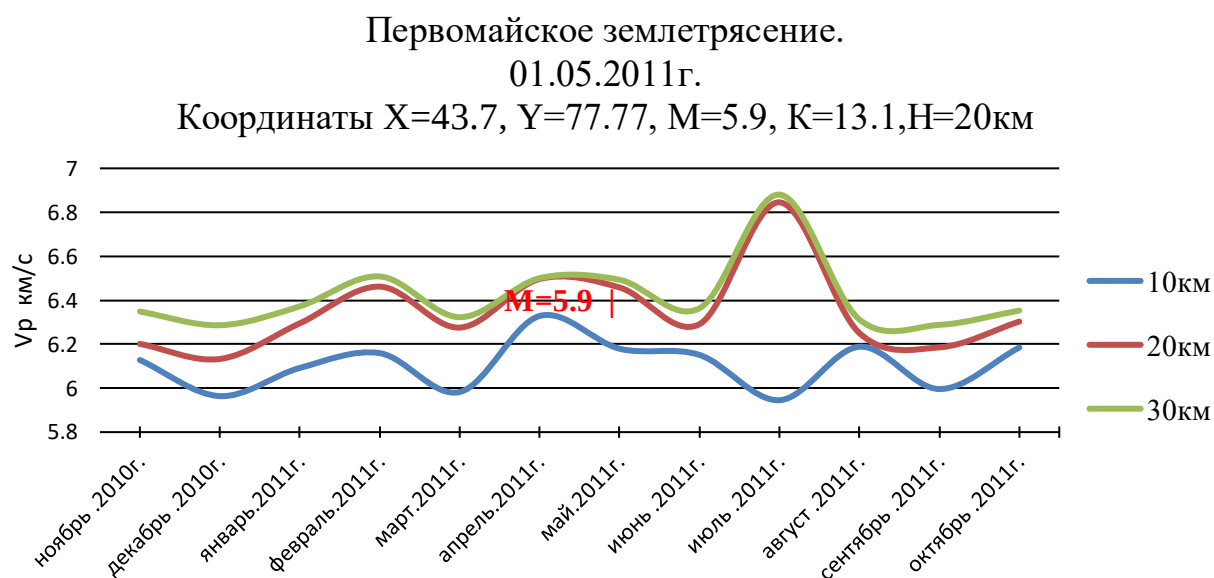


Рисунок 20– Временной ряд изменения скорости волн V_p за 1 год до и после Первомайского землетрясения

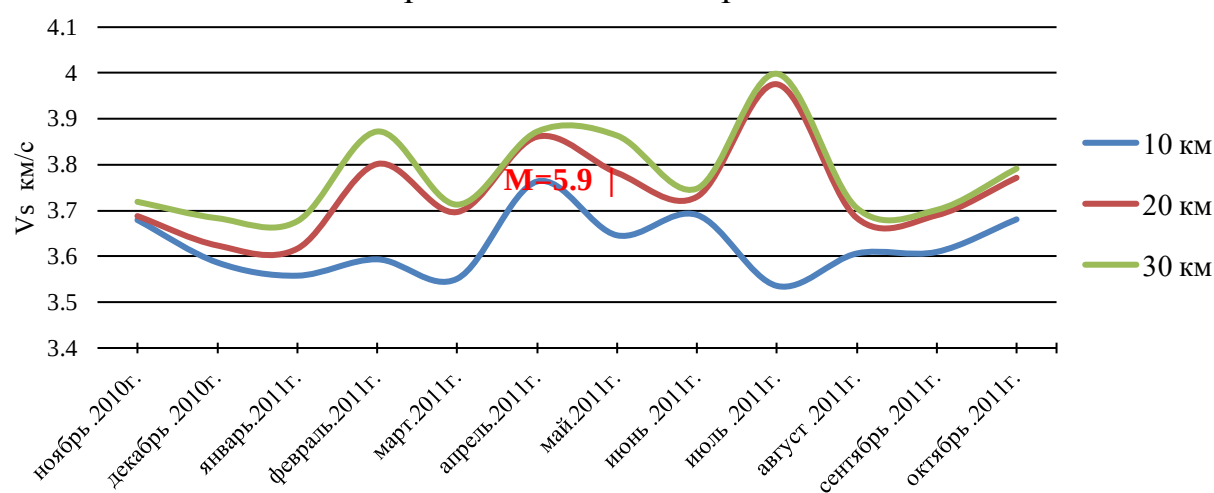


Рисунок 21– Временной ряд изменения скорости волн V_s за 1 год до и после Первомайского землетрясения

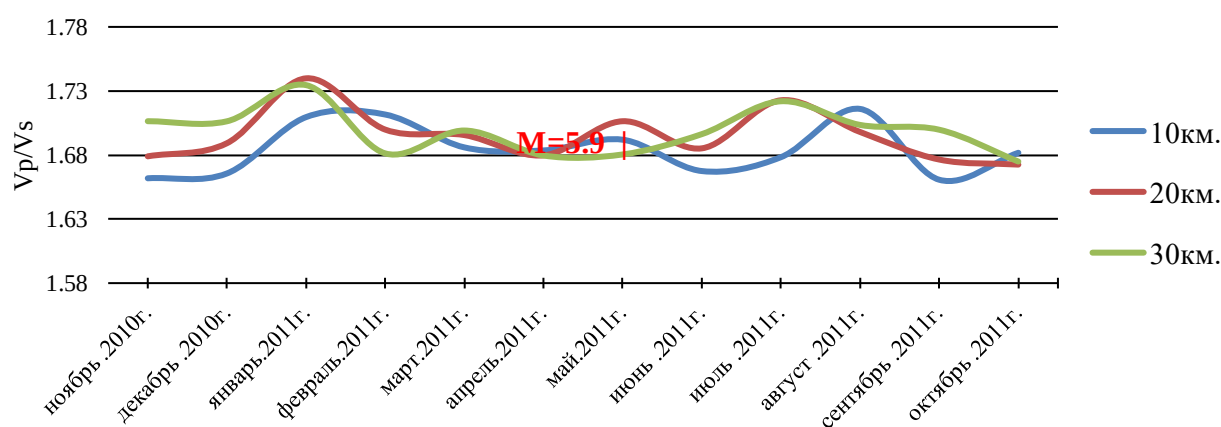


Рисунок 22– Временной ряд изменения V_p/V_s за 1 год до и после Первомайского землетрясения

Торайгырское землетрясение.
30.05.2012г.
Координаты $X=43.5, Y=78.78, M=5.7, K=13.7, H=20\text{км}$

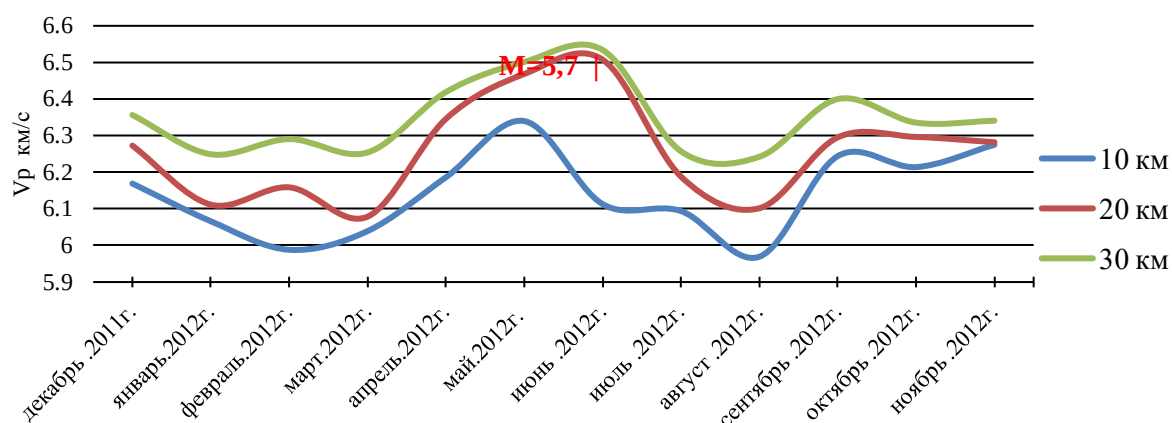


Рисунок 23– Временной ряд изменения скорости волн V_p за 1 год до и после Торайгырского землетрясения

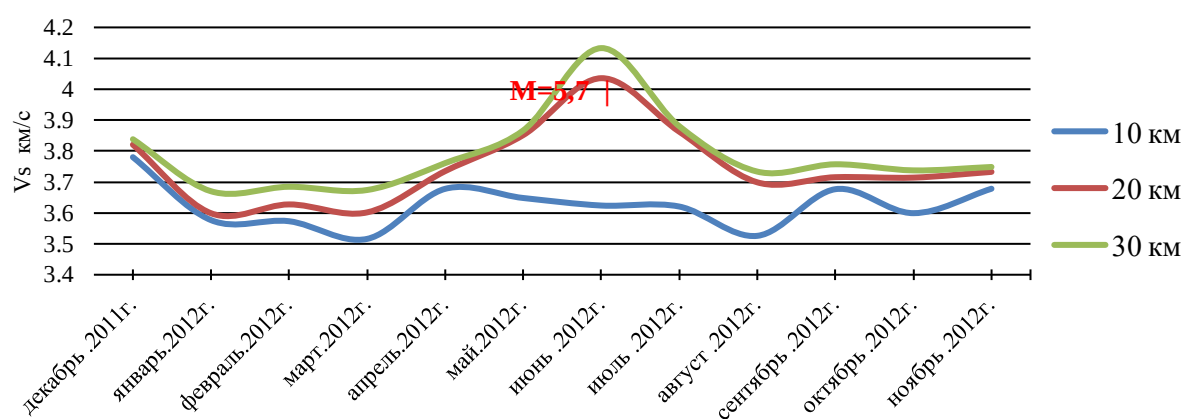


Рисунок 24– Временной ряд изменения скорости волн V_s за 1 год до и после Торайгырского землетрясения

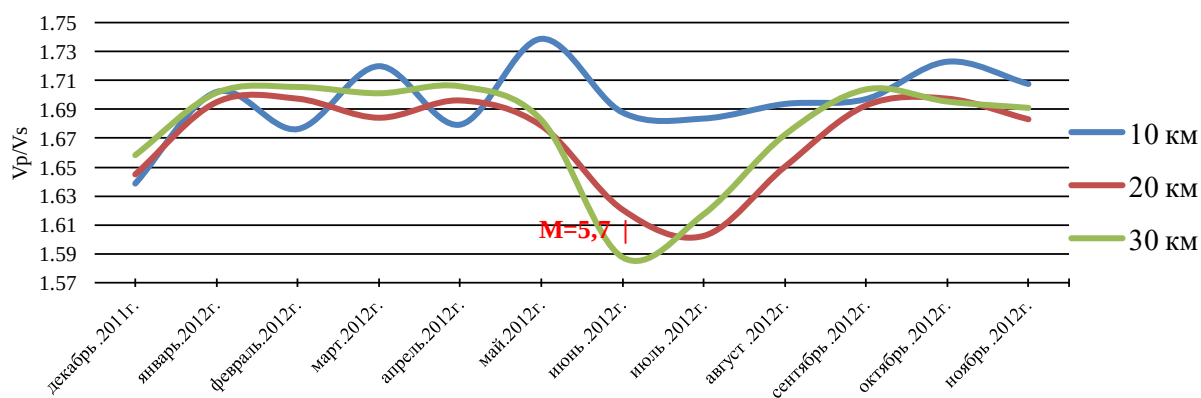


Рисунок 25– Временной ряд изменения V_p/V_s за 1 год до и после Торайгырского землетрясения

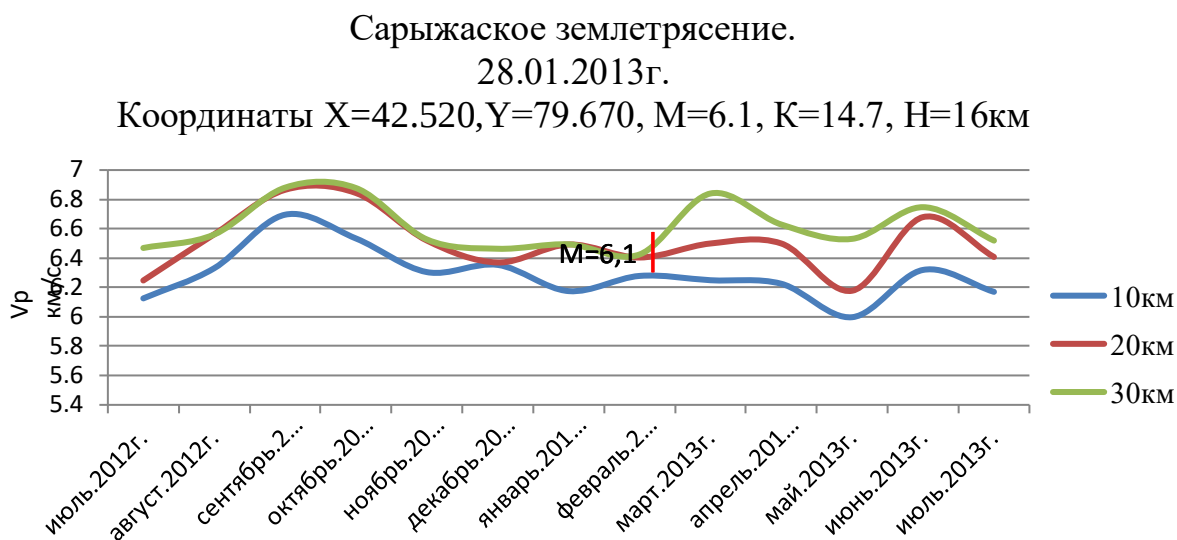


Рисунок 26– Временной ряд изменения скорости волн V_p за 1 год до и после Сарыжаского землетрясения

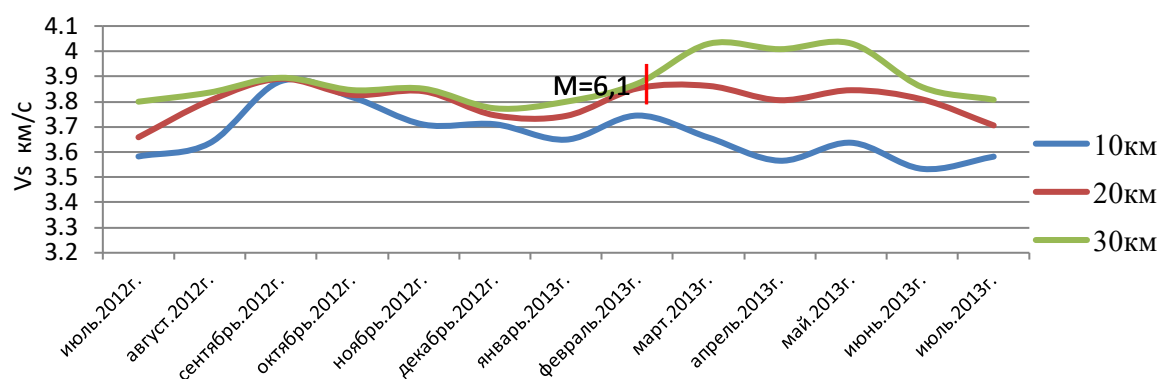


Рисунок 27– Временной ряд изменения скорости волн V_s за 1 год до и после Сарыжаского землетрясения

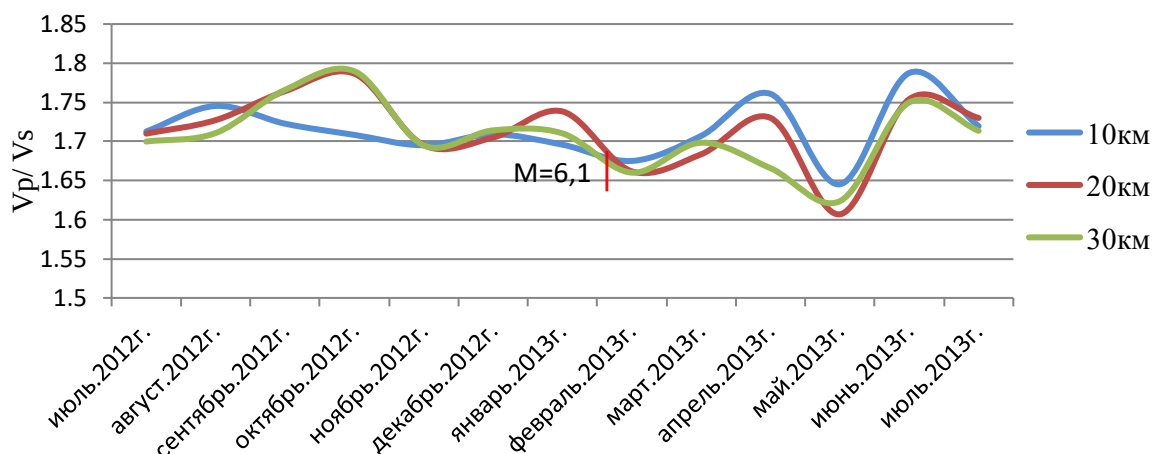


Рисунок 28– Временной ряд изменения V_p/V_s за 1 год до и после Сарыжаского землетрясения

На графиках временных рядов V_p , V_s выявлены аномальные изменения скоростей непосредственно перед сейсмическим событием и восстановление уровня после него. Значения V_p/V_s , напротив, уменьшаются перед событием, затем наблюдается их выравнивание. Такие вариации, по-видимому, связаны со структурными изменениями среды в период подготовки землетрясения и, соответственно, после него. Наибольшие вариации скоростных параметров в очаговых зонах до и после события наблюдаются на глубинах от 15 до 35 км. Самым показательным оказалось Торайгырское землетрясение (рисунки 23-25). На графике зафиксирован значительный рост скоростных параметров V_p , V_s и аномальное падение значения отношения V_p/V_s показывает то, что сейсмическое событие происходит на фоне сжатия исследуемой среды. По полученным результатам можно заключить, что вариации значений параметра V_p/V_s в период подготовки землетрясения и после него происходят в большей степени за счет вариаций значений скоростей поперечных волн V_s .

Графики Капчагайского (Первомайского) и Сарыжазского землетрясений (рисунки 20-22, 26-28) оказались размытыми на общем фоне изменения параметров, но при дополнительном анализе каталога землетрясений за 2002-2022 гг. выявлены зависимости графика от других событий с магнитудой $M=3.9-4.8$, произошедшие в этот период времени на исследуемой территории. В качестве примеров приведены временные ряды скоростных изменений для Капчагайского землетрясения за двухгодичный период наблюдений, включая и сейсмическое событие (рисунки 29-31).

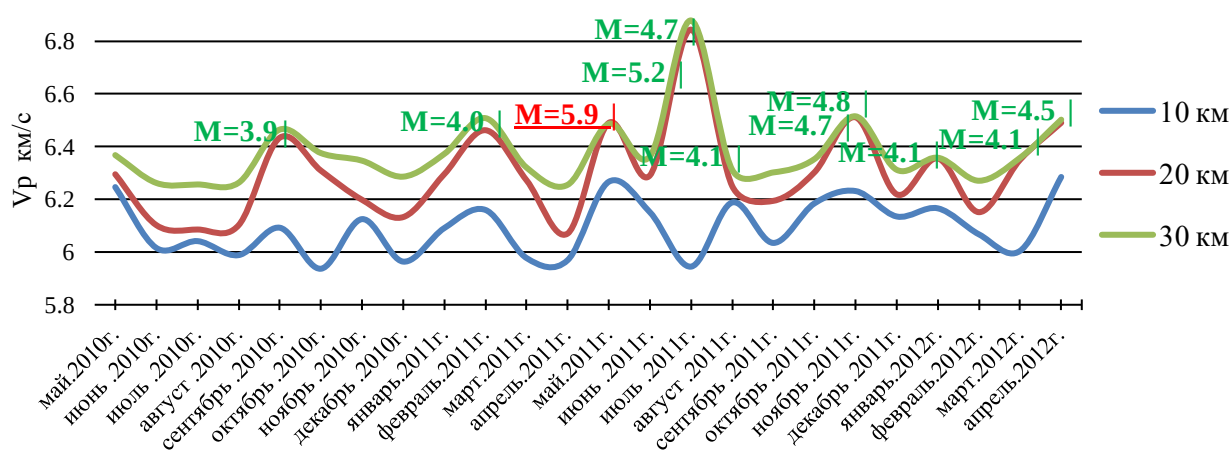


Рисунок 29– Временной ряд изменения скорости волн V_p до и после Первомайского землетрясения и отметками землетрясений, произошедших за временной отрезок 05.2010-05.2012

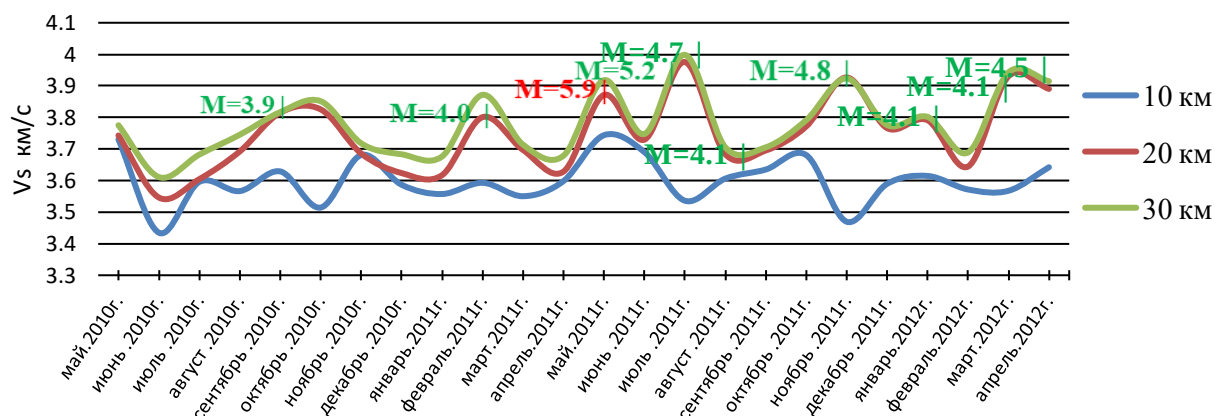


Рисунок 30– Временной ряд изменения скорости волн V_s до и после Первомайского землетрясения и отметками землетрясений, произошедших за временной отрезок 05.2010-05.2012

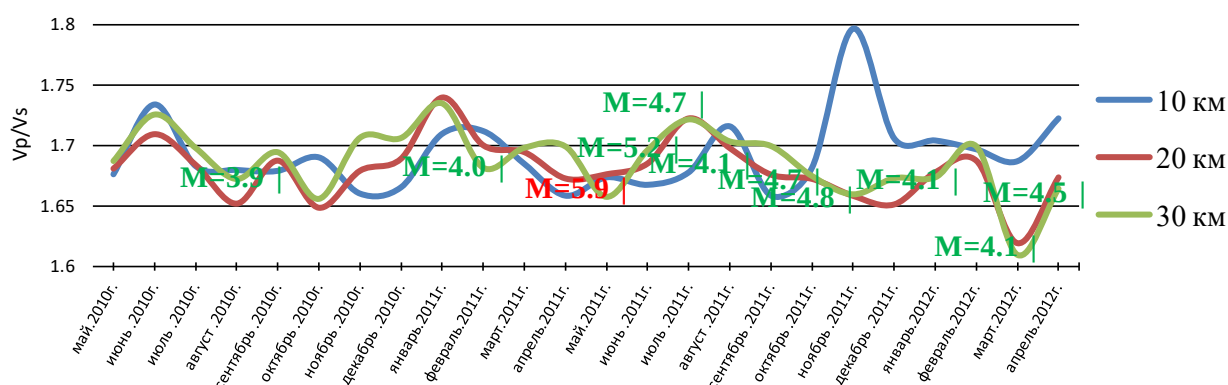


Рисунок 31– Временной ряд изменения V_p/V_s до и после Первомайского землетрясения и отметками землетрясений, произошедших за временной отрезок 05.2010-05.2012

Как уже описывалось выше, полученные матричные данные объемной модели можно представлять, как в виде графиков(рис.20-31), так и в виде глубинного гипсометрического слоя, где непосредственно произошло землетрясение. Таким образом, можно анализировать структуру геологической среды и её изменения в периоды до и после сейсмического события. Из-за большого объема полученных результатов исследований ниже, в качестве примера, приводятся расчетные данные по комплексу геофизических параметров, проходящие через очаг Сарыжазского землетрясения.

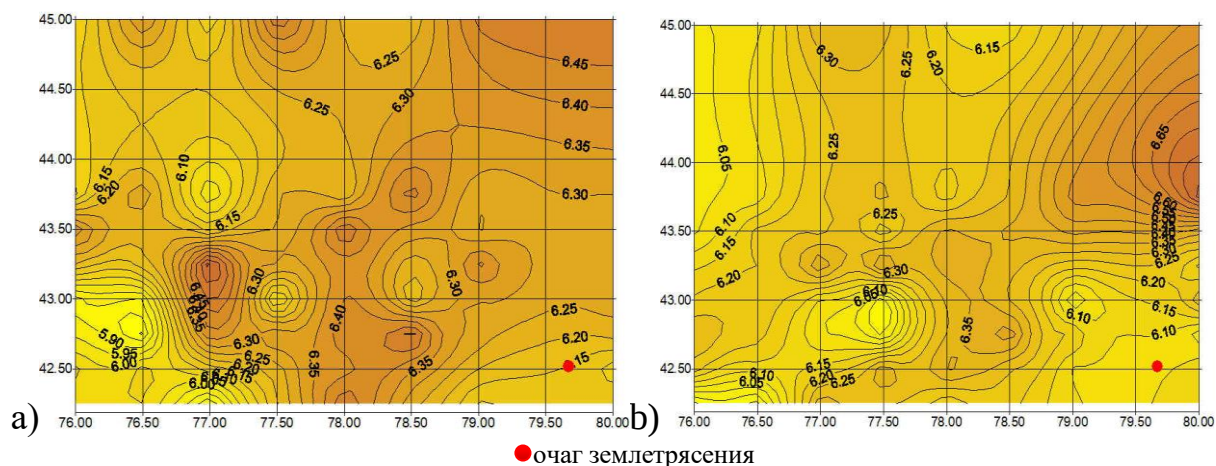


Рисунок 32– Структурная схема распределения параметра V_p км/сна гипсометрическом уровне 15 км до (а) и после (б) Сарýжазского землетрясения

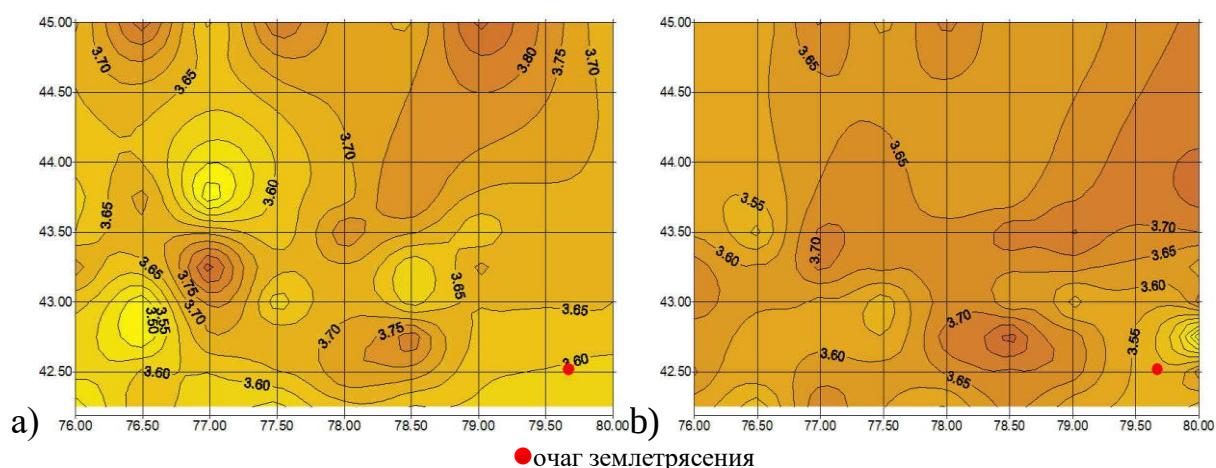


Рисунок 33– Структурная схема распределения параметра V_s км/сна гипсометрическом уровне 15 км до (а) и после (б) Сарýжазского землетрясения

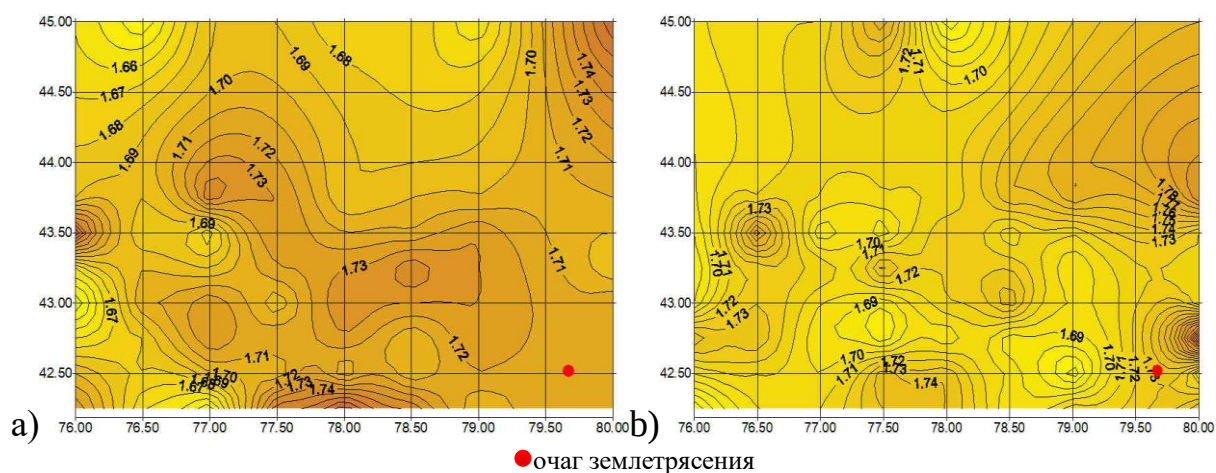


Рисунок 34– Структурная схема распределения параметра V_p/V_s на гипсометрическом уровне 15 км до (а) и после (б) Сарýжазского землетрясения

На рисунках 32-34 представлены схемы изменения скоростных параметров до и после Сарыжазского землетрясения, которые показывают изменения геофизической среды области очага во времени и пространстве. Значения скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне до землетрясения незначительно варьируются, тогда как значение отношения V_p/V_s , значительно уменьшается. Полученные результаты свидетельствуют о наличии локальных аномалий изменения скоростных параметров, как в области очага землетрясения, так и на всей территории планшета, что свидетельствует об изменении упругих свойств геологической среды в целом. Анализ исследований, проведенных на данных Сарыжазского землетрясения показал, что эпицентр очага находился в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня под действием близгоризонтального напряжения сжатия в субмеридиональном направлении и близгоризонтального растяжения – в субширотном направлении, что также соответствует расчетные данные параметра V_p/V_s до и после сейсмического события (рисунок 34).

При анализе всех полученных данных выявилась общая дифференциации средних значений параметров за 1 год и 5 лет до и после сейсмического события, наблюдается вариативность параметров в различных тектонических режимах очаговых зон исследуемых землетрясений. Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Мозаичная скоростная структура области подготовки очага до землетрясения, не противоречит модели А. Сыдыкова о формировании очага землетрясения [54], и консолидационной тектонической модели И.П. Добровольского [52].

Распределение в структурных схемах характеристических скоростных, упруго-плотностных аномалий имеет сложный рисунок, показатели которых во многом зависят от состояния исследуемой среды. Отметим, что указанная градиентная среда усложняется и отмечается значительными неоднородностями с увеличением глубины. Вариативность расчетных параметров не дает использовать такие данные, как однозначные при прогнозе землетрясений, но позволяет исследовать упруго-прочностные свойства геологической среды для комплексного анализа тектонических процессов.

Структурные схемы показали, что геофизическими методами контролируются геодинамические процессы в целом, а прогнозирование места отдельных землетрясений внутри динамической системы определяется с точностью до пространственных масштабов неоднородностей геофизической среды. Таким образом, высокая сейсмическая активность района хорошо согласуется с его геологической обстановкой: контрастностью новейших движений, линейной выдержанностью неотектонических структур, наличием новейших разломов и др.

Таблица 4 – Значения исследуемых параметров до и после землетрясения

Значения параметров до и после землетрясения	V _p , км/с	V _s , км/с	V _p /V _s
Значения параметров за 1 год до Торайгырского землетрясения	6.46	3.82	1.70
Значения параметров за 1 год после Торайгырского землетрясения	6.50	3.81	1.71
Значения параметров за 5 лет до Торайгырского землетрясения	6.38	3.68	1.73
Значения параметров за 5 лет после Торайгырского землетрясения	6.46	3.74	1.73
Значения параметров за 1 год до Первомайского землетрясения	6.49	3.85	1.70
Значения параметров за 1 год после Первомайского землетрясения	6.55	3.80	1.72
Значения параметров за 5 лет до Первомайского землетрясения	6.33	3.70	1.71
Значения параметров за 5 лет после Первомайского землетрясения	6.40	3.73	1.72
Значения параметров за 1 год до Сарыжазское землетрясения	6.45	3.67	1.67
Значения параметров за 1 год после Сарыжазское землетрясения	6.30	3.63	1.73
Значения параметров за 5 лет до Сарыжазское землетрясения	6.15	3.59	1.715
Значения параметров за 5 лет после Сарыжазское землетрясения	6.05	3.53	1.735

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований разработана новая вычислительная схема 4D сейсмической томографии, позволяющая отображать пространственно-временные изменения геофизических параметров земной коры в очаговых зонах сильных землетрясений.

Разработаны объемные модели земной коры Алматинского сейсмоактивного района по комплексу геофизических параметров (скорости продольных волн V_p , скорости поперечных волн V_s , отношения V_p/V_s).

Выявлены локальные аномалии скоростных параметров сейсмоактивной среды, как в пространстве, так и во времени, характеризующие условия подготовки и пространственную приуроченность землетрясений.

Выявленные аномалии скоростных параметров характеризуют состояние среды до и после сейсмического события. Проведенное исследование подтверждает значимость мониторинга скоростей глубинных недр в изучении процессов подготовки и возникновения землетрясений и выявления прогностических признаков.

Установлено, что наибольшие вариации скоростных параметров V_p , V_s и V_p/V_s наблюдается в сейсмоактивном слое земной коры мощностью 10-35 км.

Исследована принципиальная возможность использования мониторинга вариаций геофизических параметров (скорости продольных волн V_p , скорости поперечных волн V_s , отношения V_p/V_s) в очаговых зонах сильных землетрясений Алматинского сейсмоактивного района для прогноза сейсмической активности с помощью метода 4D сейсмотомографии.

Представленные в работе результаты являются лишь начальным этапом в использовании и развитии томографического метода для выявления вариаций геофизических параметров в периоды до и после сейсмических событий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Любецкий В.Н., Горбунов П.Н., Шацлов В.И. и др. Методические рекомендации по изучению глубинного строения Казахстана на основе геотраверсов. Алма-Ата: КазИМС, 1990. 101 с.
- 2 Непомнящих И.А. 4D сейсмическая томография в пределах Алматинского полигона (методика, результаты) //Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. – Бишкек, 2009. Вып.4. –С. 123-128
- 3 Хованский Б.Н. Тектоника, рельеф и сейсмичность Северного Тянь-Шаня. М., «Недра», 1977, 127с.
- 4 Геологическая карта Казахской ССР, масштаб 1: 500 000. / Министерство геологии СССР, Чекабаев С.Е. и др., 1976.
- 5 Геология и полезные ископаемые юга Казахстана. /Под ред. Шлыгина А.Е. Южказгеология. - Алматы, 1991. – 42 с.
- 6 Беспалов В.Ф. Тектоническая карта Казахской ССР и прилегающих территорий Союзных республик, масштаб 1:1500000. (Объяснительная записка). – Алма-Ата, Наука, Каз.ССР, 1975. – 159 с.
- 7 Схема разрывной тектоники и неотектоники западной части Илийской впадины, масштаб 1: 100 000. / Куликовский К.Т. и др., 1976.
- 8 Схема новейшей тектоники юго-востока Казахстана, масштаб 1: 1 000 000. / Ержанов Ж.С. и др., 1982.
- 9 Чедия О. К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. – Фрунзе, 1986. – 314 с.
- 10 Тимуш А.В. Сейсмоструктура литосферы Казахстана. Алматы, 2011. – 590 с.
- 11 Ержанов Ж.С., Курскеев А.К., Тимуш А.В., Чабдаров Н.М. Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1982.–232с.
- 12 Шацлов В.И., Пушкарев И.К., Старикович В. Н., Волков А. Л. Опыт использования обменных волн при ГСЗ. Геология и геофизика. Новосибирск, 1970, №10, с.40–48
- 13 Любецкий В.Н. Системы глубинных разломов Казахстана. – В кн.: Тектоническое строение Казахстана. Алма-Ата, 1975, с. 54–98
- 14 Курилова О.К., Степаненко Н.П. Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района // Геология и охрана недр. 2022, №2. С. 47-52.
- 15 Геофизические поля и глубинное строение Алма-Атинского сейсмоактивного района. – Алма-Ата: Наука, 1988.–136с.
- 16 <http://some.kz>
- 17 Скоростные модели земной коры Казахстана/ Коллектив авторов. – Алматы, «Евразия», 1993, 105с.
- 18 Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. 2-е изд.— Москва: Гостоптехиздат, 1959.— 378с.

- 19 Шацлов В.И., Тимуш А.В., Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Белоусова Н.П. Особенности строения литосферы Тянь-Шаня и прилегающих платформ //Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. –Алматы, 2005. –С. 118-129.
- 20 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К. Разработка двумерных сейсмотомографических Р-скоростных моделей земной коры и подкоревой мантии //Геология и охрана недр, №3 (72), 2019. –С. 71-76.
- 21 Шацлов В.И., Сайипбекова А.М. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии //Доклады НАН РК, – 1994, №6. – С. 47-52.
- 22 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К. Разработка двумерных сейсмотомографических Р-скоростных моделей земной коры и подкоревой мантии //Геология и охрана недр, №3 (72), 2019. С. 71-76.
- 23 Короновский Н.В., Абрамов В.А. Землетрясения: Причины, последствия, прогноз // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 12. С. 71-78.
- 24 Шацлов В.И., Грибанов Ю.Е., Сайипбекова А.М. Изучение глубинного строения Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии. // InlandEarthquake, 1995, Vol.9, №4. P. 375-381.
- 25 Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x,l)$ рефрагированных волн. // Численные методы в сейсмических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1983. С. 140-152.
- 26 Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. – М.: Наука, 1984. –108с.
- 27 Геодинамика и сейсмичность литосферы Казахстана. – Алматы, 2007. – 411 с.
- 28 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Белоусова Н.П., Шершнев В.В., 3DР-скоростное моделирование литосферы центральной части Казахстана. //Известия НАН РК, серия геологии и технических наук, 2012. №3. – с. 68-74.
- 29 Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии в двух книгах. книга 2. – Москва: Недра, 1990. – 267 с.
- 30 Силкин К.Ю. Геоинформационная система GoldenSoftwareSurfer. – Воронеж, ВГУ, 2008. – 65 с.
- 31 Попов А.А. Сейсмические модели земной коры складчатых сооружений Казахстана и Дальнего Востока. М.: Наука, 1983. 192с.
- 32 Kovesligethy S. L'hysteresis seismique. Math. und Naturwiss. Ber. Ungar, 1908, № 3.
- 33 Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений, М., “Наука”, 1978, с. 15.
- 34 Голицын Б.Б. Лекции по сейсмометрии. С.–Петербург, 1912, с. 212.
- 35 Рикитаки Т. Предсказание землетрясений, М., “Мир”, 1979. с. 388.
- 36 Могои К. Предсказание землетрясений, М., “Мир”, 1988. с. 382.

- 37 Zongjin M., Zhengxiang F., Yingzhen Z., Chengmin W., Defi L. Earthquake Prediction. Nine Major Earthquake in China (1966 – 1976). Seismological Press Beijing, 1989. p. 322.
- 38 Nur A. Dilatancy, porefluids, and premonitory variations of t_s / t_p travel times, Bull. Seism. Soc. Am. 1972, 62, 1217-1222.
- 39 Аки К., Нерсесов И.Л., Николаев А.В., Седова Е.Н. Шаймер Д.Д. Временные изменения флуктуаций амплитуд и времен пробега телесейсмической волны Р на группах Гарм, Калифорния, ЛАСА и НОРСАР. В сборнике советско-американских работ по прогнозу землетрясений, т. 1, книга 1. “Дониш”, Душанбе-Москва, 1978, с. 171-184.
- 40 Lee W.H.K., Stewart S.W. Principles and Application of Microearthquake Newworks, Academic Press, New York, 1981. 293 p.
- 41 Poupinet G., Ellsworth W.L., Frecher J. Monitoring velocity variation in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault, California, J. Geophys. Res. 1984, 89, 5719-5731.
- 42 Li Y.G., Vidale J.E., Aki K., Xu F., Burdette T. Evidence of shallow fault zone strengthening after the 1992 M 7.5 Landers, California, earthquake, Science 1998, 279, 217-219.
- 43 Nadeau R., Antolik M., Johnson P.A., Foxall W., McEvilly T.V. Seismological studies at Parkfield III: microearthquake clusters in the study of fault-zone dynamics, Bull. Seism. Soc. Am. 1994, 84, 247-263.
- 44 Chen C.H., Wang W.H., Teng T.L. 3D velocity structure around the source area of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: before and after the mainshock. Bull. Seism. Soc. Am. 2001, 91, 1013-1027.
- 45 Lee C-P., Tsai Y-B. Variation of P-Wave Travel-Time Residuals before and after the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Bull Seism. Soc. Am. 2004, 94, 2348-2365
- 46 Rubinstein J.L., Beroza G.C. Evidence for widespread nonlinear strong ground motion in the M_w 6.9 Loma Prieta earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 2004, 94, 1595-1608.
- 47 Rubinstein J.L., Beroza G.C. Depth constraints on nonlinear strong ground motion from the 2004 Parkfield earthquake, Geophys. Res. Lett., 2005, 32, L14313, doi 10.1029/2005GL023189.
- 48 Шацлов В., Такаяма Х., Жунусова А., Степаненко Н., Кайдаш Т. Вариации V_p/V_s в очаговой зоне землетрясения в Японии 17 января 1995 года. // Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии. Доклады пятого Казахстанско-Китайского международного симпозиума 24-27 сентября 2003 года, Алматы, 2004. С. 48-58.
- 49 Нерсесов И.Л., Семенов А.Н., Симбирева И.Г. Пространственно-временное распределение времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С 334-345.
- 50 Шацлов В.И., Такаяма Х., Жунусова А.Ж., Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М. Разработка 2D скоростных моделей тектоносферы Японии по

данным регио-нальной сейсмометрии // Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. Алматы: Эверо, 2003. С 145-150.

51 Шацлов В.И., Сайипбекова А.М. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии // Доклады НАН РК, №6. 1994. С. 47-52.

52 Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217с.

53 Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. М.:Наука, 1988. 208с.

54 Sydykov A. and Sadykova A.B. Seismic Regime of Moderate Earthquakes and Intermediate-Term Prediction // Journal of earthquake prediction research, 1997, vol.6, N3. Pp. 448-458

55 Методика и результаты изучения пространственно-временных вариаций геофизических" полей: Сб. науч. тр. /РАН, Сиб.отделение: Объед.ин-т геологии, геофизики и минералогии. Науч. редакторы А..Д.Дучко: В. В. Кузнецов. - Новосибирск, 1992.- 253 с.

56 Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике: Пер. с англ./ Под ред. Г. Нолета. –М.: Мир,1990.–416 с., ил.

57 Яновская Т. Б., Порохова Л. Н. Обратные задачи геофизики: Учеб, пособие. - 2-е изд., доп. и перераб. - СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2004. - 214 с.

58 Усольцева О.А., Китов И.О. Методика расчета локальных томографических моделей и ее применение на примере территории Северного Тянь-Шаня и данных киргизской телеметрической сети (KNET); Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли, Сборник научных трудов ИДГ РАН, Книга 1, М: ИДГ РАН, 2003, с.244-255

59 Gupta I. N. Seismic velocities in rocks subjected to axial loading up to shear fracture. //J. Geophys. Res., 78, 1973. P.6936-6942.

60 Program VELEST USER'S GUIDE Version 3.1 (10.4.95)- Short Introduction E. Kissling, Institute of Geophysics, ETH Zuerich.

61 Kissling E., Ellsworth W.L., Eberhart-Phillips D., Kradolfer U. Initial reference model in local earthquake tomography //JGR. 1994. V.99, N.B 10, P. 19, 635-19, 646, Oct. 10.

62 Силкин, К. Ю. Геоинформационная система GoldenSoftwareSurfer8 : учеб.-метод. пособие / К. Ю. Силкин. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2008. – 66 с.

63 Тарадаева Т.В., Тарадаев Н.П., Степаненко Н.П., Аширов Б.М. Сейсмотектоника района Сарыжазского землетрясения // Известия НАН РК, серия геологии и технических наук, 2013. №6. С. 58-65.

64 Белослюдцев О.М. Краткосрочные предвестники землетрясения 1 мая 2011 г., K=13 // Azərbaycanərazisindəseysmoproqnozmuşahidələrinkataloqu, 2011, səh. 119-123

65 Рябенко О.В. Соколов А.Н.. Инструментальные записи землетрясений Алматинской области станциями сильных движений ИГИ.Я34
Ядерный потенциал Республики Казахстан: Сборник докладов / Ассоциация «Ядерное общество Казахстана». — Астана, 2014, С. 10-16.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева
Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова
Кафедра Геофизики и сейсмологии

№ п/п	Наименование	Формат работы	Наименование издательства, журнала (№, год.)	Кол-во печатных листов или стр.	Фамилия соавторов работы
1	2	3	4	5	6
1.	Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района.	Статья	Геология и охрана недр- ISSN 2414-4282. - 2022,- №2	бстр	Степаненко Н.П.
2.	Цифровая карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района.	Доклад	Сборник международной научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 16-18.06.2022. -Алматы .	2стр	
3.	Параметр геодинамической нестабильности границы кора-мантия как критерий выявления зон юго-восточного Казахстана.	Стендовый доклад	Сборник международной научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 16-18.06.2022. -Алматы .	5 стр.	Степаненко Н.П. Кайдаш Т.М. Еркинова А.Б.
4.	Особенности Р-скоростной структуры земной коры и верхней мантии юго-востока Казахстана в связи с сейсмичностью.	Статья	Геология и охрана недр. 2023, №2 (87)	9 стр.	Степаненко Н.П. Кайдаш Т.М. Еркинова А.Б.

5.	«Geological and geophysical foundations for assessing seismic hazard in eastern Kazakhstan».	Доклад	VII International Conference "Seismology and Engineering Seismology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Nationwide Leader Heydar Aliyev, held on June 6-9, 2023. –Baku	3 стр	Степаненко Н.П.
6.	Структурно-геофизические и структурно-тектонические критерии оценки сейсмической опасности Восточного Казахстана.	Доклад	Материалы XI Казахско-Китайского Международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в Центральной Азии», 26-28 сентября 2023 г. – Алматы, 2023.	4 стр	Степаненко Н.П. Кайдаш Т.М. Еркинова А.Б
7.	Detailed seismic zoning of the East Kazakhstan region in the Republic of Kazakhstan.	Статья	Geodesy and Geodynamics. https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.08.005	10 стр	Silacheva, N.V., Stepanenko N.P., Kudabayeva A.D., Danabayeva A.T.

Автор

Курилова О.К.

Научный руководитель

Степаненко Н.П.

Заведующий кафедрой

Ратов Б.Т.



Метаданные

Название

Курилова_Ольга_2023зим (2).docx

Автор

Курилова Ольга

Научный руководитель / Эксперт

Надежда Степаненко

Подразделение

ИГИНГД

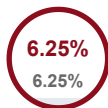
Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		0
Интервалы		0
Микропробелы		1
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		42

Объем найденных подобиий

Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

12719

Количество слов



КЦ

110220

Количество символов

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
1	Особенности геологического строения и сейсмический режим Жонгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона.docx 9/19/2023 Satbayev University (ИГИНГД)	108	0.85 %
2	Р-СКОРОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА ПО МАТЕРИАЛАМ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОМЕТРИИ 6/25/2021 Satbayev University (ИГИНГД)	67	0.53 %
3	https://kndc.kz/kndc/docs/earthquakes/kapch.doc	48	0.38 %

4	Р-СКОРОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА ПО МАТЕРИАЛАМ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОМЕТРИИ 6/25/2021 Satbayev University (ИГиНГД)	44	0.35 %
5	Особенности геологического строения и сейсмический режим Жонгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона.docx 9/19/2023 Satbayev University (ИГиНГД)	33	0.26 %
6	https://studfile.net/preview/19366236/page:4/	33	0.26 %
7	Особенности геологического строения и сейсмический режим Жонгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона.docx 9/19/2023 Satbayev University (ИГиНГД)	31	0.24 %
8	Р-СКОРОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА ПО МАТЕРИАЛАМ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОМЕТРИИ 6/25/2021 Satbayev University (ИГиНГД)	29	0.23 %
9	https://studfile.net/preview/19366236/page:4/	23	0.18 %
10	https://azdok.org/document/zlgelp1o-%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B5%D0%B9-%D1%81%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5-%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B8-%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F-%D1%81%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D1%80%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85.html	23	0.18 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из домашней базы данных (3.64 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Особенности геологического строения и сейсмический режим Жонгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона.docx 9/19/2023 Satbayev University (ИГиНГД)	222 (10) 1.75 %
2	Р-СКОРОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА ПО МАТЕРИАЛАМ ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОМЕТРИИ 6/25/2021 Satbayev University (ИГиНГД)	221 (12) 1.74 %

3	Использование исторических сейсмограмм мирных ядерных взрывов для изучения строения литосферы.docx 6/21/2022 Satbayev University (ИГИНГД)	20 (1)	0.16 %
---	---	--------	--------

из программы обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из интернета (2.61 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)	
1	https://studfile.net/preview/19366236/page:4/	98 (5)	0.77 %
2	https://kndc.kz/kndc/docs/earthquakes/kapch.doc	85 (4)	0.67 %
3	https://azdok.org/document/zlgelp1o-%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B5%D0%B9-%D1%81%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5-%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8F%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B8-%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D1%83%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F-%D1%81%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D1%80%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85.html	58 (4)	0.46 %
4	https://www.vnedra.ru/tehnologii/informacionnye-tehnologii/metod-kriginga-na-palczah-kak-ustroen-vnutri-samyj-populyarnyj-metod-ocenki-soderzhanij-v-blochnyh-modelyah-18409/	51 (4)	0.40 %
5	http://igfuran.ru/bulash2009/450-462.pdf	29 (2)	0.23 %
6	https://earthpapers.net/staticheskie-i-kinematicheskie-osnovy-seysmicheskoy-geodinamiki-ochagovyh-zon-zemletryaseniy-i-prostranstvenno-vremennogo	11 (1)	0.09 %

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Курилова Ольга

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Курилова_Ольга_2023зим (2).docx

Научный руководитель: Надежда Степаненко

Коэффициент Подобия 1: 6.3

Коэффициент Подобия 2: 3.1

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование: *допуск к защите.*

Дата 16.01.2024.

Жуф.

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Курилова Ольга

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Курилова_Ольга_2023зим (2).docx

Научный руководитель: Надежда Степаненко

Коэффициент Подобия 1: 6.3

Коэффициент Подобия 2: 3.1

Микропробелы: 1

Знаки из здругих алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата

17.01.2024

Заведующий кафедрой



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

научного руководителя о магистерской диссертационной работе Куриловой Ольги Константиновны «Вариации геофизических параметров очаговых зон сильных землетрясений Алматинского сейсмоактивного района», представленной на соискание ученой степени магистра по специальности 7М05302-«Сейсмология» (научно-педагогическое направление)

Магистерская работа Куриловой О.К. содержит исследование одной из важнейших проблем современной сейсмологии, заключающейся в изучении вариаций геофизических параметров в очаговых зонах сильных землетрясений, произошедших на территории Алматинского сейсмоактивного района. Цель и задачи, решаемые диссертантом, несомненно актуальны, так как представляют не только научный, но и практический интерес в решении проблемы поиска предвестников сейсмических событий и оценке сейсмической опасности.

В процессе написания работы автором большое внимание уделено сбору, анализу и систематизации информации из литературных и фондовых источников, проявлен высокий уровень навыка при работе с теоретической базой, освоены методическая и экспериментальная основы моделирования. Был изучен и адаптирован к выполнению поставленных задач метод 4D сейсмической томографии, позволяющий решать широкий круг задач, заключающихся в разработке сейсмотомографической объемной многопараметрической модели земной коры Алматинского сейсмоактивного района по данным землетрясений, зарегистрированных на сейсмостанциях региона в период с 2002-2022 гг., выявлению локальных аномалий скоростных характеристик сейсмоактивной среды, как в пространстве, так и во времени, характерных при подготовке землетрясений. Обоснованием для разработки нового алгоритма сейсмической томографии послужило то, что существующие подходы не удовлетворяют решению задачи мониторинга скоростей для выявления локальных аномалий во времени.

Содержание работы свидетельствует об успешном решении поставленных задач на современном научно-методическом уровне. Логичность проведения исследования, а также последовательность подачи и структурированность расположения информации позволяет охарактеризовать диссертацию как работу с глубоким и качественным раскрытием темы.

Диссертант является достойным представителем нынешнего поколения исследователей недр Земли геофизическими методами, занимающими важное место в таких ключевых проблемах сейсмологии как изучение сейсмических процессов и оценка сейсмической опасности, прогноз землетрясений. В работе использован большой объем фактического материала, полученного диссертантом при его непосредственном участии в плановых фундаментальных и прикладных исследованиях ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», полученные результаты обладают высокой степенью

В процессе работы над диссертацией Курилова О.К. проявила подобающие трудолюбие, целеустремленность и ответственность, успешно освоила суть разрабатываемой проблемы, одновременно пополнила багаж знаний по смежным проблемам сейсмологии.

Заведующая лабораторией
структурной геофизики
Национального центра
сейсмологических исследований
и наблюдений,
кандидат технических наук



Н.П. Степаненко

4.01.2024₂

Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева
Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова
Кафедра Геофизики и сейсмологии

РЕЦЕНЗИЯ

На диссертацию Куриловой Ольги
на соискание академической степени магистра естественных наук по
специальности: 7M05302-«Сейсмология»

Тема диссертации: Вариации геофизических параметров очаговых зон
сильных землетрясений Алматинского сейсмоактивного района.

Научный руководитель: канд. техн. наук Н.П. Степаненко

В представленной диссертационной работе исследовалась принципиальная возможность использования мониторинга вариаций геофизических параметров (скорости продольных волн V_p , скорости поперечных волн V_s , отношения V_p/V_s) в очаговых зонах сильных землетрясений Алматинского сейсмоактивного района, относящегося к Северо-Тянь- Шаньской деструктивной зоне, для прогноза сейсмической активности с помощью метода 4D сейсмотомографии, позволяющего отобразить пространственно-временные изменения скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений. Этот метод обладает высокой точностью и значительными возможностями более полного использования кинематических и динамических характеристик волн разной поляризации при детальном профильных и площадных системах наблюдений.

Актуальность исследований. Актуальность исследований определяется высоким уровнем сейсмической опасности территории юго-востока Казахстана, где с одной стороны, расположены сейсмогенерирующие зоны, ответственные за высокие уровни возможных сейсмических воздействий от землетрясений, с другой стороны, здесь находится самый большой по населению мегаполис а Казахстане – г. Алматы с рядом ответственных сооружений, промышленных объектов и т.д. Сочетание этих двух факторов определяет самую высокую степень сейсмического риска в Алматинском сейсмоактивном районе. Один из методов прогноза землетрясений заключается в возможности обнаружить процесс подготовки еще не проявившего себя очага и выявить по близким и далеким предвестникам время формирования (пробуждения) собственно очага и фазы развивающихся очаговых зон. Пространственная приуроченность очагов сильных землетрясений и процессы их подготовки в значительной степени

геологической среды. Без знания глубинных неоднородностей едва ли можно рассчитывать на прогресс в понимании и предсказании этих явлений.

2. Структура работы

Магистерская работа состоит из введения, 6 глав и заключения.

В *первой главе* дается необходимый минимум сведений о геотектонических особенностях региона исследований.

Вторая глава посвящена обзору современного этапа изучения неотектонического строения земной коры юго-востока Казахстана. Приведена более детальная информация о внутриблоковом дроблении геологических структур рассматриваемой территории, полученная при создании цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района.

В *третьей главе* изложен обзор сведений о сложившейся практике использования материалов глубинной геофизики при изучении сейсмоопасных территорий, а так же состояние геофизической изученности региона, главенствующая роль в которой принадлежит методам глубинных сейсмических зондирований и сейсмометрии. Должное внимание уделено описанию этапов развития сети сейсмических станций в регионе.

Четвертая глава посвящена обзору результатов изучения вариаций скоростных параметров в очаговых зонах сильных землетрясений зарубежными и казахстанскими учеными.

В *пятой главе* изложена постановка задачи разработки программно-математического обеспечения 4D сейсмической томографии. Обоснована разработка нового алгоритма сейсмической томографии, так как существующие подходы не удовлетворяют решению задачи мониторинга скоростей для выявления локальных аномалий во времени.

Создана новая объемная томографической модель скоростного строения геологической среды Алматинского сейсмоопасного района по кинематическим данным от записей землетрясений, произошедших за временной отрезок 2002-2022 гг.

Шестая глава посвящена изучению вариаций скоростных параметров в очаговых зонах характеристических землетрясений Алматинского сейсмоопасного района - Капчагайского, Торайгырского и Сарыжаского. Выявленные аномалии скоростных параметров характеризуют состояние среды до и после сейсмического события. Проведенное исследование подтверждает значимость мониторинга скоростей глубинных недр в изучении процессов подготовки и возникновения землетрясений и выявления прогностических признаков.

3. Личный вклад

Автором проведена большая работа по сбору, обработке, моделированию и интерпретации огромного объема фактического материала по сейсмологическим данным в аспекте решения поставленных задач, главным образом, к решению проблемы прогноза и оценки сейсмической опасности.

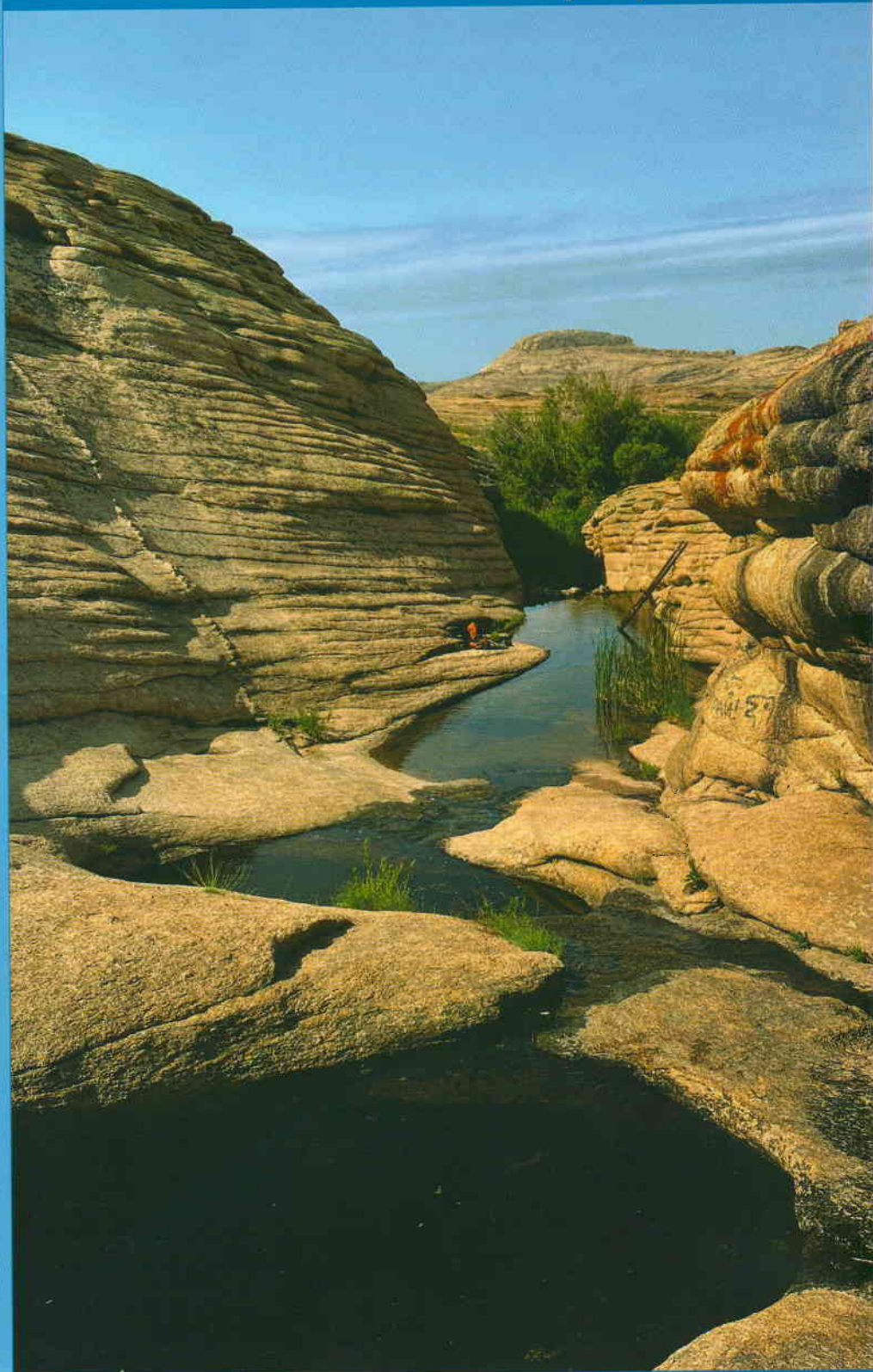
ISSN 2414-4282

ГЕОЛОГИЯ

**И ОХРАНА
НЕДР**

Основан в 2001 году

2(83) 2022



СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАГЕНИЯ

Гинатулин А. М., Гинатулин Д. А. Некоторые тенденции на мировом рынке минерального сырья	4
Накитина О.И. Опорные разрезы региональных подразделений ордовика Казахстана. I. Корреляция региональной шкалы ордовика с МСШ. Опорные разрезы нижнего ордовика.....	8
Исмаилов В. А., Тогизов К. С., Акшолоков Е. Б., Муратханов Д. Б. Проблемы и перспективы редкоземельной отрасли в Казахстане	29
Хамзин Б. С., Тангишев А. А. Перспективы Терисакканской площади (Карагандинская область, Улытауский район).....	35

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Abramson G. Structure of anomalous geochemical ore fields of various hierarchies (ore body to ore deposit).....	43
Курилова О. К., Степаненко Н. П. Разработка цифровой карты и атрибутивной базы данных тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района	47

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, СЕЙСМОЛОГИЯ

Елисеев А. В. Сток реки Тобол и его использование в целях водоснабжения Костанайской области	53
Досайбекова С. К., Досымбекова Ж. Б., Мырзагазиева Г. М. Сейсмотектоническая обстановка Северного Тянь-Шаня и Джунгарии по данным механизмов очагов землетрясений за 2019 год	62

ДИСКУССИЯ

Чудин С.С. Загадки степи. Новый Аркаим	70
---	----

ТОЧКА ЗРЕНИЯ

Идырышев Р.Б. Сущность развития материи и Земли	76
--	----

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

Ахметов Ермек Мауленович (К 75-летию со дня рождения)	81
Акентьев Александр Иванович (К 60-летию со дня рождения)	82

ВОСПОМИНАНИЯ ГЕОЛОГОВ

Оздоев С. М. Памяти Беспяева Халела Абдулхаковича	83
Баяндинова А. А. Ученый и педагог	86

ПАМЯТИ ТОВАРИЩА

Долгополов Владимир Федорович	87
Козловский Евгений Александрович	88
Вершков Александр Федорович	90
Шестак Геннадий Иванович	91
Антонюк Ростислав Михайлович	92

УДК 550.34

О. К. Курилова, Н. П. Степаненко
O. K. Kurilova, N. P. Stepanenko

ТОО «Институт сейсмологии»
«Сейсмология институты» ЖШС
«Institute of seismology» LLP
e-mail: kurilova.o@mail.ru, nstep56@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ КАРТЫ И АТРИБУТИВНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ АЛМАТИНСКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РАЙОНА

АЛМАТЫНЫҢ СЕЙСМОАКТИВТІ АУДАНЫНЫҢ ТЕКТНИКАЛЫҚ ЖАРЫЛЫМДАРДЫҢ ЦИФРАЛЫҚ КАРТАСЫН ЖӘНЕ АТРИБУТИВТІК ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫН ӘЗІРЛЕУ

DEVELOPMENT OF A DIGITAL MAP AND ATRIBUTIVE DATABASE OF TECTONIC FAULTS ALMATY SEISMOACTIVE REGION

Анализ геолого-тектонического строения и картирование тектонических разломов земной коры являются одной из главных задач геологии и геофизики сейсмоактивных районов. Доказано, что с разломами связаны сильные землетрясения, различные опасные геологические процессы и геофизические аномалии. В связи с этим существует потребность в картах и атрибутивных базах данных разломов, выполненных в цифровом виде и удобных для интеграции в различных областях. Разработанная карта разломов и сопутствующая атрибутивная база в цифровом виде могут использоваться как тектоническая основа для обобщения геологических, геофизических, гидрогеологических данных в целях прогнозирования опасных эндогенных геологических процессов, прежде всего сейсмических. Преимуществом такой цифровой карты перед другими региональными картами является ее комплексная основа, объединяющая большое количество данных в единый формат.

Ключевые слова: атрибутивная база, тектоника, разлом, землетрясение.

Жер қыртысының геологиялық-тектоникалық құрылымын талдау және тектоникалық бұзылуларды картаға түсіру сейсмикалық белсенді аймақтардың геологиясы мен геофизикасының негізгі міндеттерінің бірі болып табылады. Қатты жер сілкінісі, әртүрлі қауіпті геологиялық процестер мен геофизикалық аномалиялар жарылымдармен байланысты екені дәлелденген. Осыған байланысты цифрлық нысанда жасалған және әртүрлі салаларда біріктіруге ыңғайлы карталар мен ақаулардың атрибуттық деректер базасы қажет. Жасалған жарылымдар картасы және ілесіп атрибуттық база цифрлық нысанда қауіпті эндогендік геологиялық процестерді, ең алдымен сейсмикалық процестерді болжау үшін геологиялық, геофизикалық, гидрогеологиялық мәліметтерді жалпылау үшін тектоникалық негіз ретінде

пайдаланылуы мүмкін. Бұл цифрлық картаның басқа аймақтық карталардан артықшылығы оның кең көлемді мәліметтерді бір форматқа біріктіретін кешенді негізі болып табылады.

Түйінді сөздер: атрибутивтік база, тектоника, жарылым, жер сілкінісі.

Analysis of the geological and tectonic structure and mapping of tectonic faults in the earth's crust is one of the main tasks of geology and geophysics of seismically active regions. It has been proven that strong earthquakes, various dangerous geological processes and geophysical anomalies are associated with faults. In this regard, there is a need for maps and attribute databases of faults, made in digital form and convenient for integration in various fields. The developed fault map and accompanying attribute base, in digital form, can be used as a tectonic basis for generalizing geological, geophysical, hydrogeological data in order to predict dangerous endogenous geological processes, primarily seismic ones. The advantage of this digital map over other regional maps is its comprehensive basis, which combines a large amount of data into a single format.

Keyword: attribute database, tectonic, fault, earthquake.

Введение. На территории наиболее промышленно развитого и густонаселенного Алматинского района юго-востока Казахстана расположены потенциально опасные сейсмогенерирующие зоны с максимальной магнитудой ожидаемых землетрясений. Эти зоны являются источниками мощных динамических воздействий на геологическую среду, а через нее – на различные строительные конструкции и среду обитания челове-

ка. По сложившимся представлениям активность сейсмических районов предопределяется предшествующей историей их геологического развития, особенно на последнем неотектоническом этапе.

Важная, по сути основная, сейсмогенерирующая роль приписывается подвижным зонам разломов. Одна из ключевых проблем оценки сейсмической опасности и изучения закономерностей сеймотектонического процесса связана с отсутствием электронных картографических проектов, выполненных на современном научном уровне с использованием новых информационных технологий [5]. Цифровые карты тектонических разломов с сопутствующей атрибутивной базой в электронном виде могут использоваться как тектоническая основа для обобщения геологических, геофизических, гидрогеологических данных в целях прогнозирования опасных эндогенных геологических процессов, прежде всего сейсмических. Их преимуществом является комплексная основа, объединяющая большое количество данных в единый формат.

Задача настоящего исследования заключалась в разработке цифровой (электронной) карты тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района в рамках координат в $76^{\circ}00'$ – $78^{\circ}00'$ в.д. и $42^{\circ}40'$ – $44^{\circ}00'$ с.ш. и сопутствующей ей атрибутивной базы данных. Площадь работ составила 25 336 км².

Методика составления карты тектонических разломов с использованием ГИС-технологий. Карта организована в системе координат проекции Гаусса–Крюгера, единицы измерения – метры, что позволило делать автоматически расчет географических характеристик разлома: координат объекта, длины, азимута простираения. При векторизации разломов учтены масштабы растровых материалов, проведена детализация разломов. Работы осуществлялись в программе ArcGIS.

На первом этапе исследований проведены сбор, анализ, критическое осмысление, обобщение большого количества фондовых и литературных материалов, а также изданных в предыдущие годы геологических, тектонических, гидрогеологических, космоструктурных и других карт Казахстана и сопредельных территорий. Алгоритм создания цифровой карты разломов состоит из привязки, оцифровки (векторизации) растровых носителей и заполнения атрибутивной базы данных характеристиками разрывных нарушений,

включающих максимально полные сведения о них, сепарацию разломов по слоям и типам карты. Детализация разломов включает работу по изменению положения уже существующих векторных объектов и их сегментации, если на это указывают новые источники. При этом соблюдается правило топологической корректности, масштабирования. Кроме тематических слоёв карты, создаются технические слои (географические точки привязки раstra, картографические репера для связывания карты с определенной системой координат и др.). В ГИС объекты изображаются в векторном виде и связываются с записями различной информации в базах атрибутивных данных.

В процессе работ на основании изменения географического простираения разломы сегментированы. Это сказалось на заполнении атрибутивной базы, так как в литературных и полевых источниках разлом описывается полностью, то есть характеристики одного сегмента распространяются по аналогии на всю протяженность этого разрывного нарушения. В частном случае в атрибутивной базе сегменты одного разлома имеют одинаковые характеристики, но, как показывает интерпретация новых сейсмических данных и анализ космоснимков, это не всегда соответствует реальным характеристикам сегмента разлома.

При составлении базы данных разломы разделены по типу и проявлению в рельефе местности [5]. Среди разломов выделяется три основных категории.

Первая категория представлена активными неотектоническими разломами, выраженными на поверхности или погребенными под осадочным чехлом (рисунок 1). К таким разломам отнесены нарушения, которые присутствуют на неотектонических картах; при дешифрировании детальных дистанционных материалов; при анализе сейсмичности – признаки движений в новейшее время; по структурным уступам изобат кровли консолидированного фундамента и по данным бурения.

Сведения о таких разломах различны по объему и характеристикам, с повторяющимися или неполными данными. Специфика геологических съемок, состоящая из субъективных оценок наблюдателей, часто неоднозначна, что влияет на достоверность исходной информации. Это касается и графических материалов, так как разные исследователи, исходя из собственных взглядов, предлагают различные варианты карт. С учетом

этого в цифровую карту внесены и увязаны все графические материалы. Отбор достоверной информации по объектам совершался путем накопления как картографического материала, так и различных отчетных данных. Методика позволила обобщить объемный и детальный материал многих ученых в формат, который будет удобным для сопоставления с другими материалами и пригодным для всестороннего анализа. Современные ГИС-системы баз данных представляют удобную форму для работы и интерпретации.

Поскольку большинство казахстанских геологов придерживается мнения, что формирование альпийских структур Тянь-Шаня и окружающих горных областей и впадин началось в позднем мелу, то к неотектоническим (альпийским) отнесены разломы, которые смещают отложения верхнего мела и любые отложения кайнозоя [2-4, 6].

Ко *второй категории* относятся палеоразломы, выраженные на поверхности или погребенные под осадочным чехлом. Отличительной чертой таких нарушений является присутствие смещений при палеоземлетрясениях (верхнеплейстоцен-голоценового возраста Q_{III-IV}) вдоль разломов (см. рисунок 1). В слоии палеоразломов вошли не только отдельные разломы, но и зоны наибольшей трещиноватости, дробления и расщепления пород, так как у них минимальная достоверность активности; такие нарушения уточняют общий структурно-динамический режим и некоторые активные разломы связаны с ними динамически. В связи с тем, что материалов по такой категории разломов практически нет, модель записи характеристик по палеогруппе разломов откорректирована. Данные с нумерацией, названием, активностью, азимутом и углом падения разлома не приводятся.

Третья категория дизъюнктивных структур – это надвиги (см. рисунок 1). Для исследуемого района надвиги совсем не характерны, тем не менее на участке зафиксировано 27 надвигов, состоящих из 155 сегментов. Наиболее крупные из них – Алматинский, Кунгейский (Каракиинский) и Коктозекский надвиги.

В итоге количество сегментов всех разломов на территории Алматинского района составило 3644, из них неоразломов – 2365, подчехольных – 1124, надвигов – 155.

Для качественного и количественного анализа категорий дизъюнктивных структур в базе данных, а также и на векторной карте представ-

лены в виде пяти геоинформационных слоев (см. рисунок 1).

В статистику активных неотектонических разломов не вошли палеоразломы (рисунок 2), так как данный тип разломов показывает общую изученность района. Всего в группе палеоразломов 844 сегмента, из них 708 – палеоразломы, выраженные на поверхности, и 136 – палеоразломы, скрытые под осадочным чехлом. Этот тип разломов также важен, так как показывает зоны наибольшей трещиноватости, дробления и расщепления пород, но встречаются и неактивные разломы большей раздробленности, имеющие смещение пород верхнеплейстоцен-голоценового возраста, проследить длину которых весьма проблематично. Длины таких разломов не превышают 5-30 км. Конечно, данных по таким разломам недостаточно, но они имеют значение для оценки сложной тектоники района в целом и важны для анализа при долгосрочном прогнозе землетрясений.

Разработанная атрибутивная база ориентирована на обобщение в цифровом виде данных о разломах в целях прогнозирования опасных геологических процессов, связанных с деструкцией земной коры. Комплексный анализ, интерпретируемый на основе нескольких факторов, позволяет получить наиболее объективную оценку территории по заданным условиям. База данных является важнейшим звеном в создании цифровых карт и может учитывать разнообразнейшие сведения о развитии тектогенеза как локального, так и регионального масштабов [1]. Этот большой объем информации систематизировался и приводился к единому уровню компактности и четкости исходных данных.

Отображенные в базе данных названия разломов, признаки возраста и характер структурного залегания, шифр региона (по данным районирования) и другие параметры позволят на будущих этапах работ при помощи ГИС-технологий делать выборку по заданному признаку и проводить сравнительную характеристику различных структурно-тектонических районов, получать количественные параметры осредненных значений простирания преобладающих систем разломов, их плотности и др.

При накоплении новых сведений и материалов база данных может непрерывно уточняться и обновляться, интерпретируя материалы по заданной модели. Данные о каждом объекте составляют отдельный блок таблицы, включающий в себя

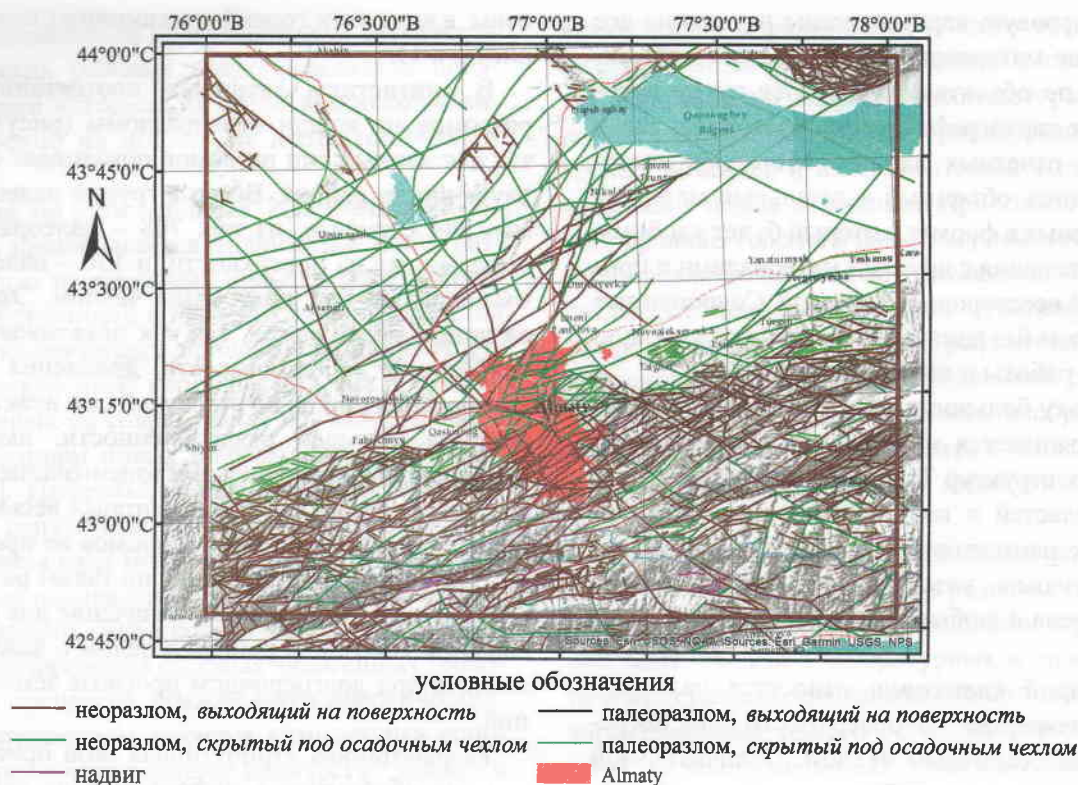


Рисунок 1 – Цифровая карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района

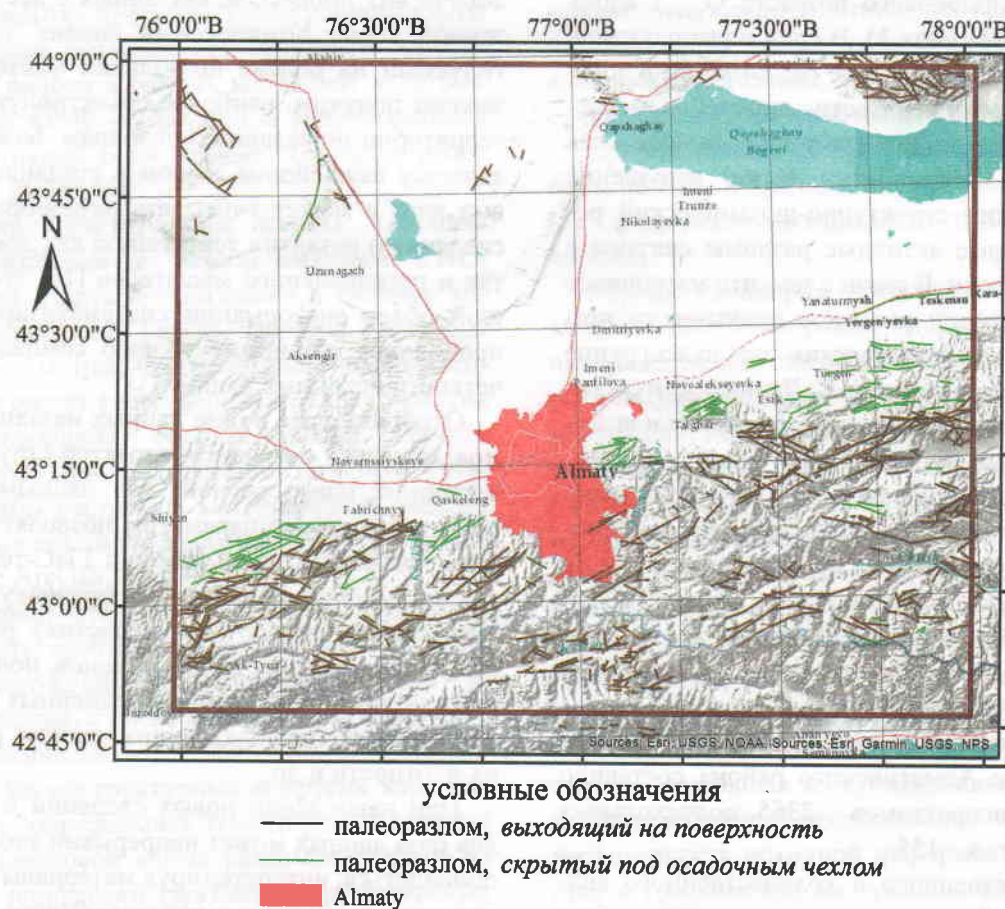


Рисунок 2 – Цифровая карта палеоразломов Алматинского сейсмоактивного района

Фрагмент атрибутивной базы данных неоразломов, выраженных на поверхности, Алматинского сейсмоактивного района

ID	Номер разлома	Разлом	Кинематика	Глубина проникновения	Азимут простирания	Азимут падения	Угол падения	Долгота X1, м	Широта Y1, м	Долгота X2, м	Широта Y2, м	Длина, м	Геопринадлежность
17	KAZ69_11	Каскеленский	Взброс	Гранитный	35,16°ССВ	Нет данных	80°СЗ	621957,377	4791785,5	623243,3	4793611,1	2233,03	Рельефообразующий, приурочен к гидросети
18	KAZ69_12	Каскеленский	Взброс	Гранитный	34,94°ССВ	Нет данных	80°СЗ	623243,3	4793611,14	624973,6	4796087,6	3021,14	Рельефообразующий, приурочен к гидросети
19	KAZ69_13	Каскеленский	Взброс	Гранитный	41,5°ССВ	Нет данных	80°СЗ	624973,6	4796087,6	626084,9	4797341,8	1675,62	Рельефообразующий, приурочен к гидросети
20	KAZ69_14	Каскеленский	Взброс	Гранитный	41,97°ССВ	Нет данных	80°СЗ	626084,9	4797357,6	628799,5	4800375,5	4059,14	Рельефообразующий, приурочен к гидросети
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1376	KG139_13	Северо-Иссык-Кульский	Нет данных	Нет данных	78,8°В	30°ЮВ	90°	668079,2	4730887,5	669611,6	4731191	1562,16	Рельефообразующий
1377	KG139_14	Северо-Иссык-Кульский	Нет данных	Нет данных	76,32°В	30°ЮВ	90°	669611,6	4731191	672654,3	4731931,8	3131,60	Рельефообразующий
1378	KG139_15	Северо-Иссык-Кульский	Нет данных	Нет данных	70,69°В	30°ЮВ	90°	672654,3	4731931,8	675749,9	4733016,6	3280,20	Рельефообразующий
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3056	KG40/4_2	Ю. ветвь Чон-Кеминской зоны разломов	Взбросо-сдвиг	Базальт	63,11°ВСВ	Нет данных	90°	585719,2	4726347,8	587222	4727109,8	1684,98	Рельефообразующий

также характеристики как наименование разлома, географические координаты сегментов, их длину, тип разлома, кинематику, глубину залегания, азимут простираения, угол падения, геопринадлежность, является ли он активным.

Разработанную методику составления карты разломов при необходимости можно распространить на аналогичные сейсмоактивные районы, для которых требуется составление карт сейсмического микрозонирования. Карта разломов может применяться для сопоставления механизмов очагов землетрясений с моделью блоково-разрывных структур земной коры, чтобы определить, с каким разломом могло быть связано смещение в очаговой зоне.

Заключение. Моделирование географического пространства упростило внедрение геоинформационных систем (ГИС) за счет принципиально нового подхода к обработке и представлению результатов в формате цифровых моделей. ГИС-технологии позволяют обобщать огромные массивы информации, на основе которой создается атрибутивная база данных исследуемых объектов. Кроме того, геоинформационные системы эффективны для определения тектонического режима района, его динамического потенциала и геологического строения в целом. Безусловным преимуществом цифровых карт является возможность дополнения новой информации по выбранным критериям и расширения рамок проекта при накоплении новых данных.

Карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района может быть использована в различных сеймотектонических и геодинамических построениях, в том числе и прикладного характера для прогнозирования опасных

природных процессов, связанных с деструкцией земной коры. Вместе с базой данных она является прочным фундаментом для накопления информации, ее тектонофизического анализа и развития других картографических проектов, что позволит глубже понять особенности сеймотектонического процесса юго-востока Казахстана.

Работа выполнена в рамках «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе», код программы Ф.0980, ИРН ОР11465449. Источник финансирования – Министерство образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бачманов Д. М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – №4. – С. 711–736. doi: 10.5800/GT-2017-8-4-0314.
- 2 Геология СССР. Т. XL. Южный Казахстан. Геологическое описание. Кн. 2 / Ред. Ш. Е. Есенов. – М., 1971. – 288 с.
- 3 Ержанов Ж. С., Курскеев А. К., Тимуш А. В., Чабдаров Н. М. Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана. – Алма-Ата, 1982. – 232 с.
- 4 Курскеев А. К., Тимуш А. В., Шапилов В. И., Сыдыков А., Горбунов П. Н., Садыкова А. Б. Сейсмическое районирование Республики Казахстан. – Алматы: Эверо, 2000. – 220 с.
- 5 Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири 2010 г. // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433, № 5. – С. 1-6.
- 6 Тимуш А.В. Сеймотектоника литосферы Казахстана. – Алматы: LuxeMediaGroup, 2011. – 590 с.





МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ИНСТИТУТ СЕЙСМОЛОГИИ

СЕЙМОЛОГИЧЕСКАЯ ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ТЕРРИТОРИЯСЫНДАҒЫ
СЕЙСМИКАЛЫҚ КАУІПТІ БАҒАЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ
МЕН ЖЕР СІЛКІНІСІН БОЛЖАУ**

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ
ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**MODERN METHODS OF SEISMIC HAZARD ASSESSMENT AND
EARTHQUAKE FORECASTING FOR REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

16.06.2022 - 18.06.2022

АЛМАТЫ - 2022

МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ИНСТИТУТ СЕЙСМОЛОГИИ

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКАЯ ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ

*Қазақстан Республикасының территориясындағы сейсмикалық
қауіпті бағалаудың заманауи әдістері мен жер сілкінісін болжау*

*Modern methods of seismic hazard assessment and
earthquake forecasting for Republic of Kazakhstan*

*«Современные методы оценки сейсмической опасности и
прогноза землетрясений для территории Республики Казахстан»*

16.06.2022 - 18.06.2022

Организатор: Департамент предупреждения чрезвычайных ситуаций Министерство по
Чрезвычайным Ситуациям Республики Казахстан, ТОО «Институт сейсмологии» МЧС РК
Адрес и место: г.Алматы, ул. Амангельды, 73.

«Центр по чрезвычайным ситуациям и снижению риска стихийных бедствий»

Участники: Представители Министерства по чрезвычайным ситуациям,
национальных и зарубежных институтов

Алматы - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВЫСТУПЛЕНИЕ		
1	Приветственное слово Вице министра МЧС РК <i>Пшембаева Мереке Кудайбергеновича</i>	7
2	Приветственное слово заместителя начальника Департамента предупреждения чрезвычайных ситуаций МЧС РК <i>Мырзабаева Алтая Сапарбаевича</i>	9
3	Вступительное слово директора Института сейсмологии МЧС РК <i>Сарсенбаева Даулета Абдужановича</i>	11
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ		
4	<i>Аубакиров С.Г.</i> - ЦЧССРСБ – О принимаемых мерах по созданию Центрально-Азиатской региональной системы раннего оповещения о чрезвычайных ситуациях	12
5	<i>Амрин Р.Н., Сарсенбаев Д.А., Узбеков Н.Б., Садыкова А.Б., Данабаева А.Т.</i> ИС МЧС РК - Карты сейсмического зонирования территории Казахстана на различных масштабных уровнях - как основа для разработки государственных нормативных строительных документов	15
6	<i>Силачева Н.В.</i> ИС МЧС РК – Современная оценка сейсмической опасности в Казахстане	23
7	<i>Dimitar Ouzounov</i> (Center of Excellence in Earth Systems Modeling & Observation, Chapman University, Orange, CA, USA), <i>Sergey Pulinets</i> (Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia) – The new concept of multidisciplinary short-term earthquake warnings based on the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) associated with pre- earthquake processes Новая концепция мультидисциплинарного краткосрочного прогноза землетрясений, основанная на теории литосферно-атмосферно- ионосферных связей в период подготовки землетрясения	27
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ		
8	<i>Михайлова Н.Н.</i> Институт геофизических исследований РГП НЯЦ РК – Система сейсмического мониторинга национального ядерного центра в задачах обеспечения сейсмической безопасности	29
9	<i>Нигметов Г.М.</i> - Оценка индивидуального риска для населения городов с учетом реальных данных о сейсмичности и сейсмостойкости	35
10	<i>Аширов Б.М.</i> СОМЭ МЧС РК - Расширение сети сейсмического мониторинга	41
11	<i>Шокбаров Е.М.</i> КазНИИСА – Паспортизация зданий и сооружений существующей застройки города Алматы <i>Дурсынов С.Б.</i> КазНИИСА – Влияние тектонического разлома на поверхностные геологические напластования.	45
12	<i>Kazuo Sasaki</i> Challenge Co., Ltd – Advanced EEW for the people. Передовая СРО для людей	53
13	<i>Копничев Ю.Ф.</i> Соколова И.Н. ИФЗ РАН – Прогнозирование мест и магнитуд сильных землетрясений по кольцевым структурам сейсмичности	58
14	<i>Шайторов В.Н.</i> Институт геофизических исследований РГП НЯЦ РК – Геофизические методы при выявлении мест фильтрации воды в плотинах с целью предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций	63
15	<i>Камчыбеков М.П.</i> Институт сейсмологии НАН КР – Сейсмический риск	69

	сейсмотектонической деформации земной коры и частоты возникновения сильных землетрясений на Северном Тянь-Шане	
33	Данько Е. Т. КазНУ Кафедра Юнеско по УР – Организация связи в период землетрясений	172
34	Тулеев А.Т, Абаканов Т.Д., МОК КазГАСА – Экспериментальное определение динамических параметров колебаний высотных зданий из монолитных железобетона	177
35	Силачева Н.В., Кудабая А.Д., Кулбаева У.К., Кравченко Н.А. ИС МЧС РК – Банк параметров движений грунта для юго-востока Казахстана	180
36	Вилляев А.В. ИС МЧС РК - О возможности среднесрочного прогноза сильных землетрясений ($M \geq 5.5$) на основе статистического анализа сейсмичности земной коры	185
37	Шайдулла М.Р. КазГАСА МОК – Опыт обследования существующих высоковольтных линий электропередачи 500кВ при действии статических и динамических нагрузок	190
38	Курилова О.К. - Цифровая карта тектонических разломов Алматинского сейсмоактивного района	196
39	Серазетдинова Б.З., Суровцева Н.В - Изучение электрического сопротивления кожи в биологически активных точках норных животных на Алматинском прогностическом полигоне	199
40	Суровцева Н.В., Нью В.А., Ариффулова И.И. ИС МЧС РК - Изучение двигательной активности птиц и рептилий в зоне сейсмического риска г. Алматы	202
41	Степаненко Н.П. Кайдаш Т.М., Курилова О.К. Еркинова А.Б. ИС МЧС РК - Параметр геодинамической неустойчивости границы кора-мантия как критерий выявления сейсмогенерирующих зон юго-востока Казахстана	207
42	Абдрахматов К.Е. Институт сейсмологии НАН КР, Ельдеева М.С. ИС МЧС РК - Сейсмическая опасность Колпаковской впадины	212
43	Егинбекова Н.Т., Жакупов Н.С., Кадырханова Н.Ж. ИС МЧС РК - Картографические работы при создании карт для обеспечения сейсмической безопасности	217
44	Сайлаубаева З.А., Катубаева А.М. ИС МЧС РК - Исследования сейсмичности территории Жамбылской области для оценки сейсмической опасности	220
45	Даурбаева Г.Х., Сиылканова А.О. ИС МЧС РК - Исследование сейсмичности на территории г. Усть-Каменогорск для построения карты сейсмомикрорайонирования	225
46	Сиылканова А.О., Даурбаева Г.Х. ИС МЧС РК - Сейсмичность и сейсмический режим Восточно-Казахстанской области	230
47	Белослюдов О.М., Аязбаева А.Б., Исагалиева А.К. ИС МЧС РК - Комплексирование данных системы сейсмологического мониторинга для краткосрочного прогноза	236
48	Досайбекова С.К. СОМЭ МЧС РК, Бектурганова Б.Б., Мырзагазиева Г.М. ИС МЧС РК - Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Северного Тянь-Шаня по данным механизмов очагов землетрясений в 2019 г	241
49	Акжалов Ж.Б., Жетписбай А.Н.- Состояние и возможность развития сети радиотелеметрических сейсмостанций в сейсмоактивных районах Казахстана	247
50	Досымбекова Ж.Б., Досайбекова С.К., Жунусова Ж.К. СОМЭ МЧС РК - 2020 жылғы жер сілкінісі ошақтары механизмдерінің деректері бойынша	249

ЦИФРОВАЯ КАРТА ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ АЛМАТИНСКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РАЙОНА

Аннотация. Анализ геолого-тектонического строения и картирование тектонических разломов земной коры, является одной из главных задач геологии и геофизики сейсмоактивных районов. В связи с этим существует потребность в картах и атрибутивных базах данных разломов, выполненных в цифровом виде и удобных для интеграции в различных областях. Разработанная цифровая карта разломов и сопутствующая атрибутивная база, могут использоваться, как тектоническая основа для обобщения геологических, геофизических, гидрогеологических данных в целях прогнозирования опасных эндогенных геологических процессов, прежде всего, сейсмических. Преимуществом данной цифровой карты является комплексная основа, объединяющая большое количество данных в единый формат.

Ключевые слова: атрибутивная база данных, тектоника, разлом.

В рамках научно-исследовательской работы по теме ПЦФ: «Комплексные исследования сейсмоопасных районов юго-востока Казахстана и разработка основы системы раннего предупреждения о сильных землетрясениях», создана цифровая карта глубинных разломов Алматинского сейсмоактивного района. В качестве первого этапа исследований при разработке цифровой карты и атрибутивной базы данных Алматинского сейсмоактивного района использована карта сейсмического микрорайонирования г. Алматы, разработанная в Институте сейсмологии совместно с ТОО «КазГИИЗ» в 2014-2017 годах. Объектом изучения стала площадь в рамках трапеции между долготами $76^{\circ}30'$ - $78^{\circ}00'$ и широтами $42^{\circ}40'$ и $44^{\circ}30'$ и составила $25\,336\text{ км}^2$.

Цифровая карта организована в системе координат проекции Гаусса-Крюгера, единицы измерения – метры, что позволило делать автоматически расчет географических характеристик разлома: координат объекта, длины, азимута простирания.

Сведения о разломах различны по объему и характеристикам, с повторяющимися или неполными данными. Отбор достоверной информации по объектам совершался путем накопления как картографического материала, так и различных отчетных данных.

Методика позволила обобщить объемный и детальный материал многих ученых [1-3,5] в формат, который будет удобным для сопоставления с другими материалами и пригодным для всестороннего анализа. На данной карте представлены 5 геоинформационных слоев (рисунок 1):

1) неотектонические разломы, выраженные на поверхности; разломы, смещающие отложения альпийского структурного этажа;

данных в последующем могут быть использованы как основа подтверждения изученности тектоники и геологии района. Таким образом обобщение фондовых, бумажных и других носителей является важным аспектом для детальной проработки всех имеющихся материалов. Безусловным преимуществом цифровых карт является возможность дополнения новой информации по выбранным критериям и расширения рамок проекта при накоплении новых данных [2].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Геология СССР. Том XL. Южный Казахстан. Геологическое описание, книга 2 / Ред. Ш. Е. Есенов. – М., 1971. – 288 с.
- 2 Ержанов Ж. С., Курскеев А. К., Тимуш А. В., Чабдаров Н. М. Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана. – Алма-Ата, 1982. – 232 с.
- 3 Курскеев А. К., Тимуш А. В., Шацлов В. И., Сыдыков А., Горбунов П. Н., Садыкова А. Б. Сейсмическое районирование Республики Казахстан – Алматы: Эверо, 2000. – 220 с.
- 4 Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П.. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири 2010 г. / Доклады Академии Наук, 2010, том 433, № 5, С. 1-6.
- 5 Тимуш А.В. Сеймотектоника литосферы Казахстана.–Алматы: LuxeMediaGroup, 2011.–590 с.

Курилова О.К.

АЛМАТЫ СЕЙСМОБЕЛСЕНДІ АУДАНЫНЫҢ ТЕКТНИКАЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫҢ САНДЫҚ КАРТАСЫ

Аңдатпа: Геологиялық-тектоникалық құрылымды талдау және жер қыртысының тектоникалық сынықтарын картаға түсіру сейсмикалық белсенді аудандардың геологиясы мен геофизикасының басты міндеттерінің бірі болып табылады. Осыған байланысты цифрлық түрде жасалған және әртүрлі салаларда біріктіруге ыңғайлы карталар мен атрибутивті ақаулық туралы мәліметтер базасы қажет. Қауіпті эндогендік геологиялық процестерді, ең алдымен сейсмикалық процестерді болжау мақсатында геологиялық, геофизикалық, гидрогеологиялық деректерді жалпылау үшін тектоникалық негіз ретінде әзірленген ақаулардың сандық картасы мен ілеспе атрибутивтік база пайдаланылуы мүмкін. Бұл цифрлық картаның артықшылығы деректердің үлкен көлемін бірыңғай форматқа біріктіретін кешенді негіз болып табылады.

Түйін сөздер: атрибутивті мәліметтер базасы, тектоника, жарылым.

Kurilova O.K.

DIGITAL MAP OF TECTONIC FAULTS OF THE ALMATY SEISMOACTIVE REGION

Abstract. Analysis of the geological and tectonic structure and mapping of tectonic faults of the Earth's crust is one of the main tasks of geology and geophysics of seismically active areas. In this regard, there is a need for maps and attribute databases of faults made in digital form and convenient for integration in various fields. The developed digital fault map and the accompanying attributive base can be used as a tectonic basis for generalizing geological, geophysical, hydrogeological data in order to predict dangerous endogenous geological processes, primarily seismic. The advantage of this digital card is a comprehensive framework that combines a large amount of data into a single format.

Keywords: attribute database, tectonics, fault.

Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К., Еркинова А.Б.
к.т.н., зав. лабораторией, ТОО «Институт сейсмологии» МЧС РК

ПАРАМЕТР ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГРАНИЦЫ КОРА-МАНТИЯ КАК КРИТЕРИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЗОН ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА

Аннотация. Приведены основные методические аспекты прогнозирования геодинамически нестабильных зон по геофизическому параметру – скорости распространения продольных волн и сейсмологических данных для юго-востока Казахстана. Подтверждена возможность территориального разделения литосферы на участки с нормальным и аномальным геодинамическим состоянием, где происходят и могут происходить в будущем активные геодинамические процессы, в том числе землетрясения.

Ключевые слова: скорость продольных волн, земная кора, активная мантия, сейсмическая активность, геодинамическая нестабильность.

Юго-восток Казахстана относится к хорошо изученным в сеймотектоническом отношении сейсмоактивным территориям, обеспеченным обширной сейсмологической информацией. Очаги произошедших здесь землетрясений, и тех, которые произойдут в будущем, связаны с геодинамически нестабильными зонами, для которых характерны интенсивные современные тектонические движения земной коры, происходящие на границах крупных геоблоков [1]. Невозможно выделить единственный признак, значение которого может свидетельствовать о сейсмическом режиме региона. Современные исследования геофизических и геологических полей, их интегрированный анализ позволяют найти наиболее значимые параметры, связанные с сейсмической активностью, и выделить зоны возможных очагов землетрясений.

Региональная геофизика является основным источником глубинной информации для выделения сейсмогенерирующих зон и оценки физических условий подготовки землетрясений [2]. При этом ведущая роль в проведении геофизических исследований принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной интерпретации геофизических материалов. Одной из составных частей геофизической основы геодинамического районирования литосферы являются скорости продольных волн V_p , характеризующие внутреннюю структуру земной коры и верхней мантии.

В данном исследовании предложен новый подход к изучению современной сейсмичности юго-востока Казахстана, основанный на изучении

Р-скоростных свойств приподошвенного слоя на границе кора-мантия, позволяющий уточнить строение земной коры и понять происходящие в ней процессы, выделить геодинамически нестабильные зоны и установить их связь с очагами землетрясений.

Экспериментальной основой исследования являются результаты двумерного и объемного Р-скоростного моделирования земной коры и подкоровой мантии юго-востока Казахстана по материалам фондовых и опубликованных первичных данных (систем годографов) региональной сейсморазведки и сейсмометрии [3]. Поэтапные итоги Р-скоростного моделирования для профилей глубинных сейсмических зондирований и сейсмотомографии и опубликованы, в основном, в работах [4, 5, 6].

Учитывая большое влияние процессов, проходящих в верхней мантии, на развитие, геодинамическое состояние и режим сейсмичности земной коры, представляет интерес детальное изучение зоны перехода кора-мантия [7]. В представленной работе исследуется параметр $G=(V_K/V_M)$ как относительный показатель ее геодинамической нестабильности, где V_K – скорость продольных волн в слое, залегающем непосредственно выше границы Мохо (нижняя кора), V_M – скорость продольных волн в подкоровом верхнемантийном слое.

Граница кора-мантия на скоростных разрезах в общем случае выражается высокоградиентным слоем мощностью до сотен метров или первых километров [8], внутри которого надежное определение положения изолиний скорости весьма проблематично. Для уменьшения влияния этой неопределенности на значения параметра геодинамической нестабильности для расчетов выбраны поля скорости на гипсометрических уровнях соответственно выше и ниже этой границы на 4 километра.

Значения скорости выше границы Мохо на 4 км для территории юго-востока Казахстана находятся в пределах от 5,4 км/с до 7,8 км/с. Этот диапазон значений можно разделить на две неравные части: локальные участки с мощностью коромантийной смеси ($V_p=7,2-7,6$ км/с) и преобладающую остальную территорию без коромантийной смеси, замещенной вышележащими слоями консолидированной коры снизу-вверх от гранулит-базитового ($V_p=6,4-7,2$ км/с) до гранито-гнейсового ($V_p=5,6-6,4$ км/с). Скоростной срез на гипсометрическом уровне ниже границы Мохо на 4 км характеризуется значениями $V_p=6,2-8,4$ км/с. Участки развития слоя активной мантии мощностью более 10 км имеют диапазон значений $V_p=7,2-8,0$ км/с.

Вычисленное поле значений параметра геодинамической нестабильности G статистически обработано для четырех типов зоны перехода кора-мантия, разделенных по признаку наличия или отсутствия в приподошвенных слоях коромантийной смеси и активной мантии: 1 тип – нормальная кора и нормальная мантия, 2 тип – нормальная кора и активная мантия, 3 тип – коромантийная смесь и нормальная мантия, 4 тип – коромантийная смесь и активная мантия.

Для выделения геодинамически нестабильных зон, связанных с очагами землетрясений, на поле относительных значений параметра геодинамической нестабильности G наложены схемы коромантийной смеси и активной мантии, а

также эпицентры землетрясений [9], произошедших на юго-востоке Казахстана в 1962-2019 гг.

Четвертому типу границы кора – мантия соответствуют участки, для которых значения параметра геодинамической неустойчивости близки к единице ($G=0,93-0,98$), откуда следует, что скорости продольных волн в низах коры и прилегающем к границе Мохо слое активной мантии практически не различаются между собой (нет скачка скоростей), т.е. граница Мохо становится нечеткой, что может свидетельствовать об активном энергообмене в таких зонах и являться условием геодинамической неустойчивости. В этом случае не исключено, что формирование коромантийной смеси во взаимодействии с активной мантией происходит и в настоящее время (а не только палео), за счет чего повышается геодинамическая неустойчивость границы кора-мантия. Для модели перехода кора-мантия четвертого типа условия геодинамической неустойчивости наилучшие.

Установлено, что очаги большинства землетрясений приурочены к областям с самыми высокими значениями G , для которых характерно сочетание мощностей активной мантии (более 10 км) и коромантийной смеси (более 4 км). В этих районах наблюдается самая высокая сейсмическая активность. Такими территориями являются высокосейсмичные орогены Тянь-Шаня, Памира, Тарбагатая и Алтая на востоке и юго-востоке Казахстана.

Участки со значениями $G=0,85-0,90$ и $G=0,90-0,93$ занимают промежуточное положение между типами 1 и 4, однако представляют самостоятельное значение при выделении слабосейсмичных территорий (тип 2 с активной мантией при нормальной коре) и локализации палеорифтовых зон (тип 3 с коромантийной смесью на нормальной мантии). Последние (тип 3) распространены по северо-западной периферии Тянь-Шаня, в Иссык-Кульской, Жаркентской впадинах. Возможно, здесь еще не созданы условия для возникновения новых сильных землетрясений.

Низкие значения параметра $G=0,83-0,88$ (первый тип) свидетельствуют о наличии резкого скачка от коровых скоростей к мантийным, что может означать отсутствие в зоне перехода кора-мантия активного энергетического обмена и соответствует стабильному геодинамическому состоянию среды. При сопоставлении поля (V_K/V_M) с эпицентрами землетрясений установлено, что здесь практически не происходили сейсмические события или их очень мало на большей части платформенных территорий (Казахский щит, Тургайский прогиб, юго-восток Туранской плиты).

Заключение. В результате анализа скоростных моделей юго-востока Казахстана в зоне перехода кора-мантия подтверждена возможность территориального разделения литосферы на участки с нормальным геодинамическим состоянием и аномальным, где происходят и могут происходить в будущем активные геодинамические процессы. Установлено, что очаги большинства землетрясений лежат в зонах одновременного присутствия коромантийной смеси и активной мантии, что является достоверным признаком сейсмичности. Выявленные аномальные скоростные свойства в зоне перехода кора-мантия могут оказаться прогностическими при оценке "перспективности"

отдельных районов на землетрясения, другие опасные явления, а также при выяснении природы геофизических полей. Предложенный подход для выделения зон возможных очагов землетрясений не может являться универсальным решением, но позволяет применить ранее не востребованные данные, оценить их значимость и возможность их интерпретации.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Блинова Т.С. Прогноз геодинамически неустойчивых зон. / Т.С. Блинова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
- 2 Шацков В.И., Степаненко Н.П. Геофизические критерии выявления очаговых зон сильных землетрясений на Тянь-Шане. // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных районов. – Москва-Бишкек, 2003. – С. 129-139.
- 3 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М. Структурно-скоростные критерии оценки сейсмической опасности на основе объемной Р-скоростной модели литосферы Казахстана и прилегающих территорий // Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. № 6, 2014 г. – С. 41- 48.
- 4 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Еркинова А.Б., Курилова О.К. Р-скоростная и плотностная объемные модели земной коры и подкоровой мантии как базовая геофизическая основа оценки сейсмической опасности Казахстана // Промышленность Казахстана, №3 (107), 2019. – С. 72-76.
- 5 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К. Разработка двумерных сейсмотомографических Р-скоростных моделей земной коры и подкоровой мантии // Геология и охрана недр, №3 (72), 2019. – С. 71-76.
- 6 Шацков В.И., Тимуш А.В., Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Белоусова Н.П. Особенности строения литосферы Тянь-Шаня и прилегающих платформ // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. – Алматы, 2005. – С. 118-129.
- 7 Краснопевцева Г.В., Щукин Ю.К. Объемная глубинная модель земной коры Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований // Глубинное строение литосферы по результатам сейсмических исследований. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 73-84.
- 8 Шацков В.И., Горбунов П.Н., Степаненко Н.П. и др. Скоростные модели земной коры Казахстана. – Алматы: Евразия, 1993. – 105 с.
- 9 Региональный каталог землетрясений 1962-2019 гг. / ТОО «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция» (СОМЭ).

Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К., Еркинова А.Б.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫСЫНДАҒЫ СЕЙСМОГЕНЕРАЦИЯЛАЙТЫН АЙМАҚТАРДЫ АНЫҚТАУ КРИТЕРИЙІ РЕТІНДЕ ҚАБЫҚ-МАНТИЯ ШЕКАРАСЫНЫҢ ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ ТҰРАҚСЫЗДЫҒЫ ПАРАМЕТРІ

Аңдатпа: Геофизикалық параметр бойынша геодинамикалық тұрақсыз аймақтарды болжаудың негізгі әдіснамалық аспектілері – бойлық толқындардың таралу жылдамдығы және Қазақстанның оңтүстік-шығысы үшін сейсмологиялық мәліметтер келтірілген. Литосфераны қалыпты геодинамикалық жағдайы бар және болашақта белсенді геодинамикалық процестер жүретін және аномальды аймақтарға бөлу мүмкіндігі расталған.

Түйін сөздер: бойлық толқын жылдамдығы, жер қыртысы, белсенді мантия, сейсмикалық белсенділік, геодинамикалық тұрақсыздық.

Stepanenko N.P., Kaidash T.M., Kurilova O.K., Erkinova A.B.

**PARAMETER OF HEMODYNAMIC INSTABILITY OF THE BORDER
CRUST-MANTLE AS A CRITERION FOR IDENTIFYING
SEISMOGENERATING ZONES OF THE SOUTH-EAST OF KAZAKHSTAN**

Abstract. The main methodological aspects of forecasting geodynamically unstable zones are presented in this work by geophysical parameter - the propagation velocity of longitudinal waves and seismological data for southeast Kazakhstan. The possibility of territorial division of the lithosphere into areas was confirmed with a normal geodynamic state and anomalous, where active geodynamic processes occur and may occur in the future.

Keyword: longitudinal wave velocity, searh's crust, mantle activity, seismic activity, geodynamic instability.

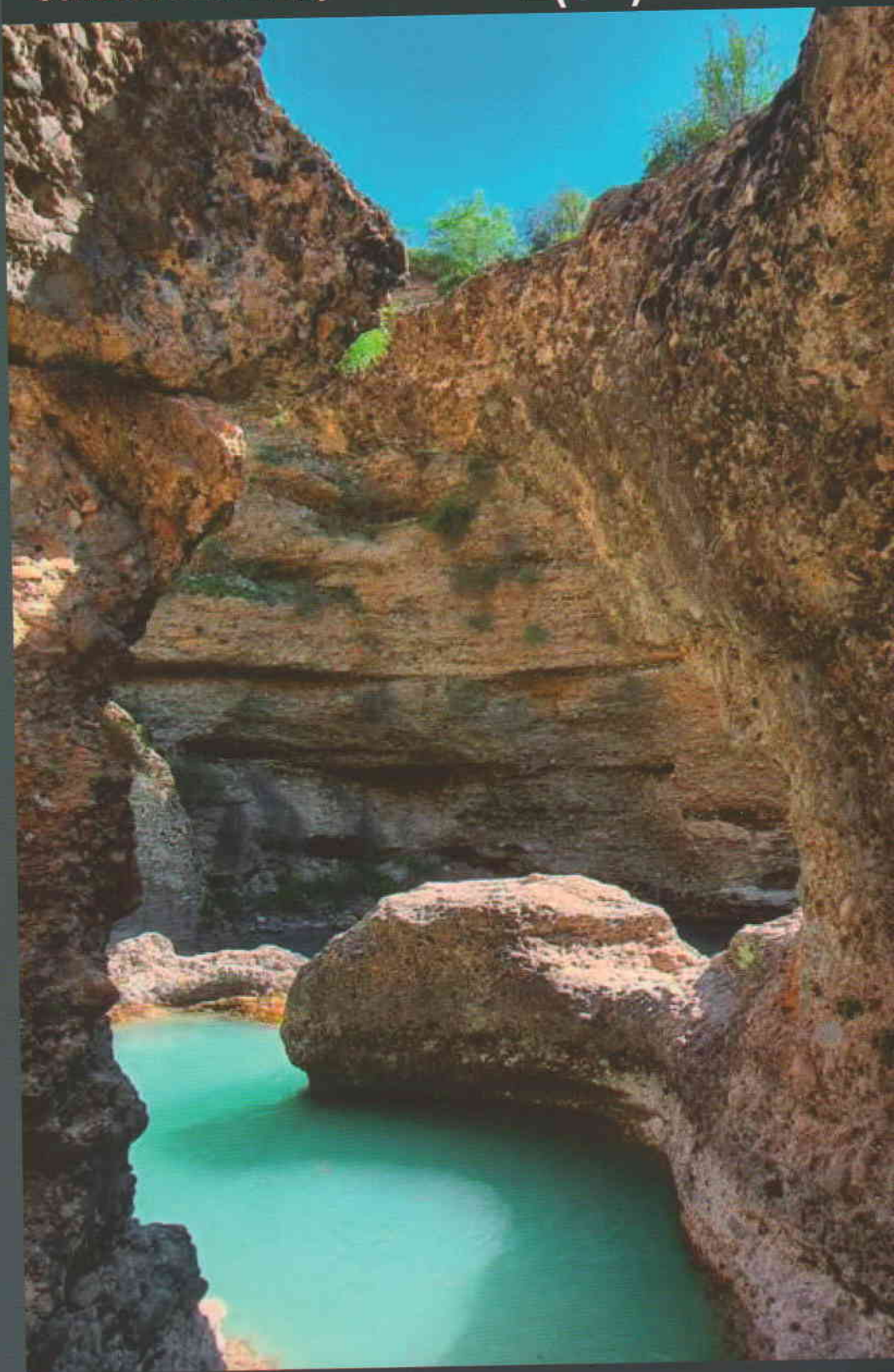
ISSN 2414-4282

ГЕОЛОГИЯ

И ОХРАНА
НЕДР

Основан в 2001 году

2(87) 2023



ГЕОЛОГИЯ И ОХРАНА ЖӘНЕ ЖЕР ҚОЙНАУЫН НЕДР ҚОРҒАУ

GEOLOGY AND BOWELS OF THE EARTH

Журнал издается при содействии Объединения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей
«Союз геологов "KazGEO"»

Журнал «KazGEO "Геологтар одағы"» заңды тұлғалар мен жеке кәсіпкерлер бірлестігінің көмегімен шығарылады
The journal is published with the assistance of The Association of legal entities and individual entrepreneurs
«Union of geologists "KazGEO"»

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ОО «Казакхстанское геологическое общество „KazGEO“»

ҚҰРЫЛТАЙШЫ:

«Қазақстандық геологиялық қоғам „KazGEO“» ҚҰ

FOUNDER:

«Kazakhstan Geological Society „KazGEO“»

Основан в октябре 2001 г.
2001 ж. қазан айында құрылған
Founded in October 2001

ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД
ЖЫЛЫНА 4 РЕТ ШЫҒАДЫ
PUBLISHES 4 TIMES A YEAR

2(87) 2023

Журнал зарегистрирован в Министерстве культуры,
информации и общественного согласия Республики Казахстан.
Регистрационное свидетельство № 2363-ж от 12 октября 2001 г.

Журнал Қазақстан Республикасының Мәдениет, ақпарат
және қоғамдық келісім министрлігінде тіркелген.
Тіркеу куәлігі 2001 жылдың 12 қазаннан №2363-ж

The magazine is registered by the Ministry of Culture,
Information and Public Accord of the Republic of Kazakhstan.
Registration Certificate № 2363-zh 12 October 2001

Журнал «Геология и охрана недр» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и
представлен в Научной электронной библиотеке www.elibrary.ru, а также
в Казахстанскую базу АО «НЦ ГНТЭ».

«Геология және жер қойнауын қорғау» журналы Ресейлік ғылыми дәйексөз келтіру индексіне (РГДИ)
енгізілген және Ғылыми электронды кітапханада www.elibrary.ru ұсынылған, сонымен қатар
«ҰМ FТСО» АҚ Қазақстандық базасына кіргізілген.

The journal «Geology and bowels of the earth» is included in the Russian Scientific Citation Index (RSCI)
and is presented in the Scientific Electronic Library www.elibrary.ru
and in the Kazakhstan base of JSC «NC STE».



Алматы, «KazGEO» ♦ Алматы, «KazGEO» ♦ Almaty, «KazGEO»

Главный редактор
президент «КазГЕО», д. г.-м. н., акад. МАМР, НИА РК **Б. С. Ужкенов**

Заместитель главного редактора
вице-президент АМР РК, д.г.-м.н., акад. МАМР **Б. М. Куандыков**

Ответственный секретарь
Е. Н. Грекина

Редакционный совет:
М. Ж. Битимбаев (д.т.н., акад. МИА, МАМР), **И. С. Гольдберг** (к.г.-м.н., Австралия),
Р. Д. Дженчураева (д.г.-м.н., акад. НА КР, Кыргызстан), **А. А. Кременецкий** (д.г.-м.н., Россия),
В. В. Кузнецов (к.г.-м.н., Россия), **Ф. А. Летников** (д.г.-м.н., акад. РАН, Россия),
В. Л. Лось (д.г.-м.н., акад. МАИН, АМР РК), **И. Д. Мандель** (д.э.н., США),
Т. Н. Мендебаев (д.т.н., акад. КазНАЕН), **А. А. Поцелуев** (д.г.-м.н., Россия),
Э. Ю. Сейтмуратова (д.г.-м.н., чл.-кор. НАН РК), **В. А. Смоляр** (д.г.-м.н.),
В. Н. Старостин (д.г.-м.н., акад. РАЕН, Россия)

Бас редакторы
«КазГЕО» президенті, геология-минералогия ғылымдарының докторы,
ХМРА, ҚР ҰИА академигі **Б. С. Ужкенов**

Бас редактордың орынбасары
ҚР МРА вице-президенті, геология-минералогия
ғылымдарының докторы, ХМРА академигі **Б. М. Куандыков**

Жауапты хатшы
Е. Н. Грекина

Редакция алқасы:
М. Ж. Битимбаев (т.ғ.д., ХИА, ХМРА акад.), **И. С. Гольдберг** (г.-м.ғ.к., Австралия),
Р. Д. Дженчураева (г.-м.ғ.д., ҚР акад. ҚР, Кыргызстан), **А. А. Кременецкий** (г.-м.ғ.д., Ресей),
В. В. Кузнецов (г.-м.ғ.к., Ресей), **Ф. А. Летников** (г.-м.ғ.д., РФА акад., Ресей),
В. Л. Лось (г.-м.ғ.д., ХАА, ҚР МРА акад.), **И. Д. Мандель** (э. ғ.д., Америка Құрама Штаттары),
Т. Н. Мендебаев (т.ғ.д., ҚҰЖА акад.), **А. А. Поцелуев** (г.-м.ғ.д., Ресей),
Э. Ю. Сейтмуратова (г.-м.ғ.д., ҚР ҰҒА кор.-мүшесі), **В. А. Смоляр** (г.-м.ғ.д.),
В. Н. Старостин (г.-м.ғ.д., РЖА акад., Ресей)

Editor in Chief
President of "KazGEO". Doctor of geology and mineralogy, academician IAMR, NEA RK **B. S. Uzhkenov**

Deputy Editor in Chief
Vice-president of IAMR. Doctor of geology and mineralogy, acad. IAMR **B. M. Kuandykov**

Executive secretary
E. N. Grekina

Editorial board:
M. Zh. Bitimbayev (doctor of technical sciences, acad. IAE, IAMR), **I. S. Goldberg** (candidate of geology and mineralogy, Australia), **R. D. Djenchuraeva** (doctor of geology and mineralogy, acad. NAS KR, Kyrgyz Republic), **A. A. Kremenetskiy** (doctor of geology and mineralogy, Russia),
V. V. Kuznetsov (candidate of geology and mineralogy, Russia), **F. A. Letnikov** (doctor of geology and mineralogy, acad. RAS, Russia), **V. L. Loss** (doctor of geology and mineralogy, acad. IIA, AMR RK),
I. D. Mandel (Doctor. of economic sciences, USA), **T. N. Mendebayev** (doctor of engineering sciences, acad. KNANS), **A. A. Potseluyev** (doctor of geology and mineralogy, Russia), **E. Yu. Seitmuratova** (doctor of geology and mineralogy, corresponding member NAS RK), **V. A. Smolyar** (doctor of geology and mineralogy),
V. N. Starostin (doctor of geology and mineralogy, acad. RANS, Russia)

Адрес редакции: 050000, Казахстан, г. Алматы, пр. Абылай хана, 91,
ОО «Казахстанское геологическое общество "КазГЕО"».
Тел.: (727) 279-59-50, факс: (727) 279-59-21.
E-mail: amr_rk@mail.ru, www.amr.kz

-
- © ОО «Казахстанское геологическое общество „КазГЕО“», 2023
 - © «Қазақстандық геологиялық қоғам „КазГЕО“» ҚҰ, 2023
 - © «Kazakhstan Geological Society „KazGEO“», 2023

На обложке журнала: каньон Аксу и река Аксу
Фото Садыковой Алтын

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ

<i>Сейтмуратова Э. Ю., Горяева В. С., Сайдашева Ф. Ф., Аршамов Я. К., Баратов Р. Т., Даутбеков Д. О., Бердина Л. Е., Маширапова М. А., Даулетулы А.</i> Характеристика вторичных кварцитов и их золотоносности вулканоплутонической структуры Кызылтас (Центральный Казахстан)	4
<i>Ажгалиев Д. К., Максотова Ш. Ж.</i> Особенности геологического строения и нефтегазоносность юрско-меловых отложений Южно-Эмбинского региона	30
<i>Гинатулин Д. А., Гинатулин А. М.</i> О возможности открытия медно-порфирового месторождения на участке Западный Жалтырбулак (Центральный Казахстан)	40
<i>Umarbekova Z.T., Amanbaev R.A., Miniskul Sh.D., Shamsutdin D.A.</i> Formation and development promises of the Arkharly ore center: stages and prospects	49

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

<i>Лагутин Е. И.</i> Геогидрология в современной Центральной Азии	56
---	----

СЕЙСМОЛОГИЯ

<i>Степаненко Н. П., Кайдаш Т. М., Курилова О. К., Еркинова А. Б.</i> Особенности р-скоростной структуры земной коры и верхней мантии юго-востока Казахстана в связи с сейсмичностью	66
--	----

ТОЧКА ЗРЕНИЯ

<i>Лось В. Л., Фрейман Г. Г., Цеховой А. Ф.</i> Развитие геологоразведочной отрасли Казахстана	75
<i>Идырышев Р. Б.</i> Влияние космоса на геологические процессы	81

ХРОНИКА

Вручение нагрудных знаков и дипломов лауреатам премий имени академиков Ш. Есенова и Е. А. Букетова за 2022 год	85
--	----

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

<i>Петров Анатолий Иннокентьевич</i> (К 90-летию со дня рождения)	86
<i>Буктуков Николай Садвакасович</i> (К 75-летию со дня рождения)	87

ПАМЯТИ ТОВАРИЩА

<i>К 115-летию со дня рождения Н. А. Кенесарина</i>	88
<i>Коротовский В. Г.</i>	94

НОВЫЕ КНИГИ

Природные подземные кладовые Актобе: ювелирные, ювелирно-поделочные, поделочные и коллекционные камни	95
---	----

УДК 550.834(574)

Н. П. Степаненко, Т. М. Кайдаш, О. К. Курилова, А. Б. Еркинова
N. P. Stepanenko, T. M. Kaidash, O. K. Kurilova, A. B. Erkinova

Институт сейсмологии, Алматы, Казахстан
Сейсмология институты, Алматы, Қазақстан
Institute of Seismology, Almaty, Kazakhstan
e-mail: nstep56@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ Р-СКОРОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

СЕЙСМИКАЛЫҚ БАЙЛАНЫСТЫ ЖЕР ҚЫРТЫСЫНЫҢ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫСЫНДАҒЫ ЖЕРАСТЫ МАНТИЯСЫНЫҢ Р-ЖЫЛДАМДЫҚ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

FEATURES OF P-VELOCITY STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE OF THE SOUTH-EAST OF KAZAKHSTAN IN CONNECTION WITH SEISMICITY

Приведены основные методические аспекты выявления сейсмогенерирующих зон юго-востока Казахстана по геофизическому параметру – скорости распространения продольных волн. Дана характеристика объемной цифровой Р-скоростной модели земной коры и верхней мантии. Модель разработана на основе системной переинтерпретации и обобщения ретроспективных материалов глубинных сейсмических зондирований, а также региональных сейсмологических наблюдений, обработанных по методике профильной сейсмической томографии. Описание и сопоставительный анализ модели проведены в соответствии со структурно-вещественными комплексами консолидированной коры и верхней мантии. Выявлены основные закономерности распределения структурно-скоростных неоднородностей на орогенных и платформенных территориях юго-востока Казахстана и установлена их связь с сейсмичностью. Результаты моделирования в виде набора структурных схем мощностей основных геофизических слоев консолидированной коры, активной мантии позволяют получить общее представление о возможностях модели как региональной геофизической основы оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: скорость продольных волн, томография, активная мантия, сейсмическая активность, землетрясение.

Мақалада геофизикалық параметр бойынша Қазақстанның оңтүстік-шығысындағы сейсмогендік аймақтарының – бойлық толқындардың таралу жылдамдығын анықтаудың негізгі әдістемелік аспектілері келтірілген. Жер қыртысының және жер асты мантиясының көлемді цифрлық Р-жылдамдықты үлгісіне сипаттама берілген. Үлгі терең сейсмикалық зондтаудың ретроспективті материалдары, сондай-ақ бейінді сейсмикалық томография әдістемесі бойынша өңделген аймақтық сейсмологиялық бақылауларды жүйелі қайта түсіндіру және жалпылау негізінде әзірленген. Үлгінің сипаттамасы мен салыстырмалы талдауы шоғырланған қыртыстың және жоғарғы мантияның құрылымдық-заттық кешендеріне сәйкес жүргізілді. Қазақстанның оңтүстік-шығысындағы орогендік және платформалық аймақтардағы құрылымдық-жылдамдық біркелкі емес таралудың негізгі заңдылықтары ашылып, олардың сейсмикалықпен байланысы анықталды. Шоғырландырылған қыртыстың, белсенді мантияның

негізгі геофизикалық қабаттарының қуаттылықтарының құрылымдық тізбектерінің жиынтығы түріндегі модельдеу нәтижелері сейсмикалық қауіпті бағалаудың аймақтық геофизикалық негізі ретінде модельдің мүмкіндіктері туралы жалпы түсінік алуға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: бойлық толқын жылдамдығы, томография, белсенді мантия, сейсмикалық белсенділік, жер сілкінісі.

The article presents the main methodological aspects of identifying seismogenic zones in the south-east of Kazakhstan according to the geophysical parameter – the velocity of propagation of longitudinal waves. The characteristic of volumetric digital P-velocity model of the earth's crust and subcrustal mantle is given. The model was developed on the basis of a systemic reinterpretation and generalization of retrospective data from deep seismic soundings, as well as regional seismological observations processed using the profile seismic tomography technique. The description and comparative analysis of the model were carried out in accordance with the structural and material complexes of the consolidated crust and upper mantle. The main regularities of the distribution of structural-velocity inhomogeneities in the orogenic and platform areas of the southeast of Kazakhstan are revealed and their connection with seismicity is established. The results of modeling in the form of a set of structural diagrams of the thicknesses of the main geophysical layers of the consolidated crust, the active mantle allow us to get a general idea of the capabilities of the model as a regional geophysical basis for assessing seismic hazard.

Keywords: P-wave velocity, tomography, active mantle, seismic activity, earthquake.

Введение. Юго-восток Казахстана – один из самых высокосейсмичных регионов Евразийского сейсмического пояса характеризуется интенсивными геодинамическими процессами, одним из проявлений которых являются сейсмические события. Предотвратить землетрясения невозможно, однако их разрушительные последствия могут быть уменьшены путем исследований и оценки сейсмической опасности и, как следствие, создания достоверных карт сейсмического районирования. Объективная оценка строения земной коры и верхней мантии позволяет выделить неоднородности их структуры, с которыми может быть связано возникновение очагов сильных землетрясений.

Региональная геофизика является основным источником глубинной информации для выделения сейсмогенерирующих зон и оценки физических условий подготовки землетрясений. При этом ведущая роль в проведении геофизических исследований принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной интерпретации геофизических материалов. С этой позиции, в первую очередь, исследования должны включать в себя структурно-скоростное моделирование на базе инструментальных данных и другой геолого-

геофизической информации. Сейсмические исследования в комплексе геофизических методов изучения строения коры и верхней мантии получили существенное развитие на протяженных профилях, в результате чего получены важные практические и теоретические результаты [2, 10, 11]. В связи с этим важной задачей представляется выявление наиболее общих закономерностей строения земной коры и верхней мантии рассматриваемого региона и возможной связи с ними основных новейших морфоструктур (орогенов и платформ). Наиболее эффективным способом, ведущим к решению этой задачи, является структурно-скоростное моделирование, обсуждению и интерпретации последних результатов которого посвящена настоящая работа.

Методика формирования объемной Р-скоростной модели земной коры и верхней мантии юго-востока Казахстана. На обширной территории, включающей юго-восток Казахстана и прилегающие регионы Узбекистана, Кыргызстана и Китая, проведен большой объем детальных профильных и площадных сейсмических исследований, в результате создана плотная сеть профилей глубинных сейсмических зондирований (рисунок 1) [2, 10]. Однако наиболее опасными в сейсмическом отношении являются высокогорные районы, где невозможна организация наблюдений ГСЗ из-за сложности рельефа. В этом случае для получения скоростных разрезов применялась методика профильной сейсмической томографии, основанная на обработке данных о вступлении продольных волн, регистрируемых от местных землетрясений, и позволяющая с достаточной достоверностью и полнотой извлекать сейсмическую информацию из волновых полей [9, 12]. На основе экспериментальных ретроспективных и новых материалов глубинных сейсмических зондирований и современной профильной сейсмотомографии для всех профилей разработаны двумерные Р-скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубины 70 км.

При интерпретации скоростных характеристик исследуемой среды двумерные модели вдоль профилей не дают полного представления о морфологии выделенных структур, что снижает информативность таких моделей и не позволяет получить объективные признаки для реконструкции геодинамических процессов, в том числе землетрясений. Решение задачи по созданию объемной Р-скоростной модели земной коры и верхней мантии позволяет создать наиболее полную геолого-геофизическую модель строения исследуе-

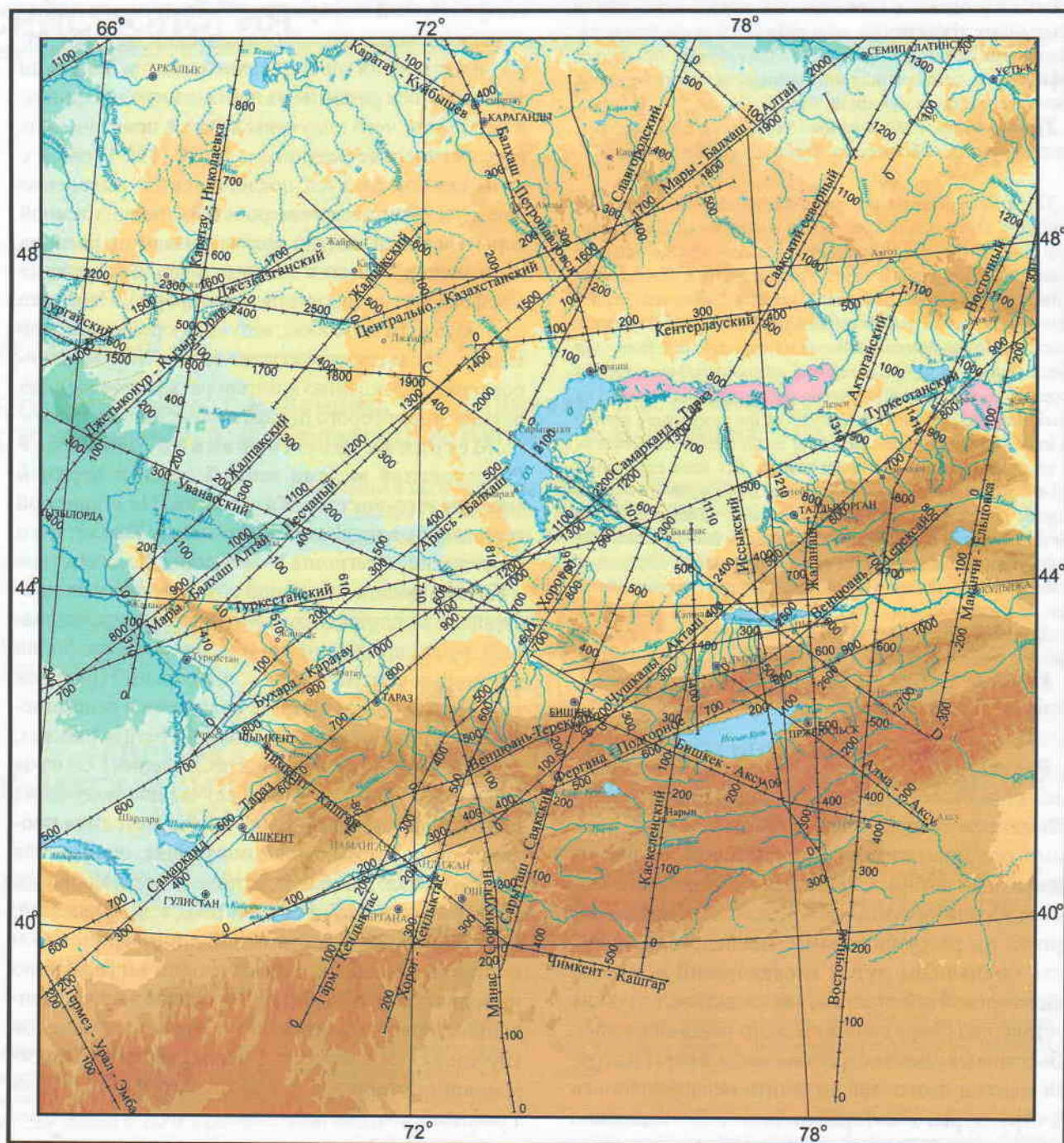


Рисунок 1 – Схема профилей глубинных сейсмических зондирований и сейсмической томографии юго-востока Казахстана

мой среды и дать оценку внутренней структуры в трехмерном пространстве.

Для создания модели в цифровом виде разработана собственная компьютерная программа, позволяющая все данные по профилям собрать в объемную структуру. Основной задачей программы является вычисление скоростей продольных волн V_p в узлах прямоугольной сетки, так как реальные значения скоростей известны вдоль скоростных разрезов, причем линии этих разрезов

расположены в произвольном порядке. На первом шаге координаты данных скоростных разрезов приводятся к общей системе координат, затем разделяются по срезам глубин. Полученные в результате двумерные профильные модели необходимо дополнить без потери информации, вычислив значения в узлах равномерной сетки. Для нахождения скорости V_p в узлах равномерной сетки использовался метод Крайгинга [4, 8], который позволяет с высоким качеством создавать цифровые модели

поверхности по неравномерно распределённым данным в пространстве. Полученные этим методом значения скоростей оптимальны в том смысле, что окончательные оценки являются несмещенными и имеют минимальную оценку дисперсии.

Входные данные представляют собой набор прямоугольных матриц (по количеству двумерных моделей), состоящих из значений скоростей продольных волн с дискретностью 20 км по латерали и 2 км по вертикали. Для каждого профиля задаются его код, шаг дискретизации и координаты точек начала, изломов (если профиль – не прямая линия) и конца. Эти данные преобразуются в прямоугольные матрицы, в узлах которой известны скорости продольных волн на гипсометрических уровнях 0, 2, 4, ..., 70 км, а затем в специальную объемную структуру с распределением скоростей продольных волн V_p в узлах прямоугольной сетки с шагом 20×20 км по латерали и 2 км по вертикали.

Объемная модель V_p в зависимости от решаемых задач, может быть представлена в виде срезов на различных гипсометрических уровнях, разрезов в любом требуемом направлении или набором структурных схем характерных скоростных уровней и мощности слоев между ними. Предпочтительным является такое представление, которое позволяет наилучшим образом проследить изменение скоростной структуры исследуемой среды по глубине или по латерали в объеме этой среды.

Наиболее информативными, с позиций возможности обнаружения контрастных внутрикоровых неоднородностей, влияющих на формирование пространственного режима сейсмичности, являются структурные схемы мощности сиалического (гранитогнейсового) слоя (между скоростными уровнями 5,6 и 6,4 км/с), мощности обобщенного базитового слоя (между скоростными уровнями 6,4 и 7,2 км/с), охватывающие весь диапазон консолидированной коры, а также схемы подошвы земной коры М и мощности активной мантии (между подошвой коры М и скоростным уровнем 8,0 км/с) [3].

Результаты исследований и их интерпретация позволяют более надежно определять структурные неоднородности земной коры и подкоровой мантии, аномалии геофизических полей, что в конечном счете будет способствовать более точному выделению сейсмогенерирующих зон и оценке сейсмической опасности территории юго-востока Казахстана и прилегающих регионов и усовершенствованию технологии разработки карт сейсмического районирования различной масштабности. Методика успешно апробирована при разработке

последних версий карт сейсмического районирования Республики Казахстан и ее отдельных регионов (территорий областей) [1]. Оказалось, что она весьма эффективна при районировании слабосейсмичных территорий, преобладающих в Казахстане и испытывающих дефицит информации о пространственно-временном режиме сейсмичности [5].

Обсуждение результатов. На рисунке 2 представлена структурная схема сиалического слоя консолидированной коры юго-востока Казахстана с прилегающими территориями сопредельных государств.

Мощность сиалического слоя в регионе варьирует от 5-15 км на платформе до 41 км в высокосейсмичных орогенах на юге и юго-востоке с высокоградиентными переходами от платформы к орогену и менее градиентными внутри каждой из этих территорий. Ее минимальные значения от 5 до 15 км наблюдаются на платформенной территории Южно-Прибалхашской, Восточно-Прибалхашской, Алакольской впадин. Здесь практически отсутствуют землетрясения или их очень мало на отдельных локальных участках.

Увеличение мощности слоя до 20 км фиксируется при переходе от платформенных территорий к области высокосейсмичных орогенов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау. Его аномально повышенные значения до 30-45 км отмечены в районе хребтов Терской Алатау, Заилийский Алатау, Кунгей Алатау, Каргаузского хребта, а также в Джунгарии, что является одним из наиболее характерных структурно-геофизических признаков высокой сейсмичности и подтверждается концентрацией очагов землетрясений, произошедших на этой территории. Слабая сейсмичность платформенных территорий с $M=4,5-5,5$ преимущественно приурочена к зонам локальных аномалий мощности слоя 10-15 км.

Количественная оценка значений этого параметра устойчиво связана с сейсмичностью территорий: меньшие характерны для асейсмичной или слабосейсмичной континентальной (платформенной) коры, аномально высокие – для высокосейсмичной коры орогенов. При этом слабая сейсмичность платформенной территории преимущественно приурочена к зонам локальных аномалий мощности слоя.

Для нижнего обобщенного базитового слоя консолидированной коры (рисунок 3) в общих чертах характерно обратное соотношение мощности на платформе и в орогенах по сравнению с верхним

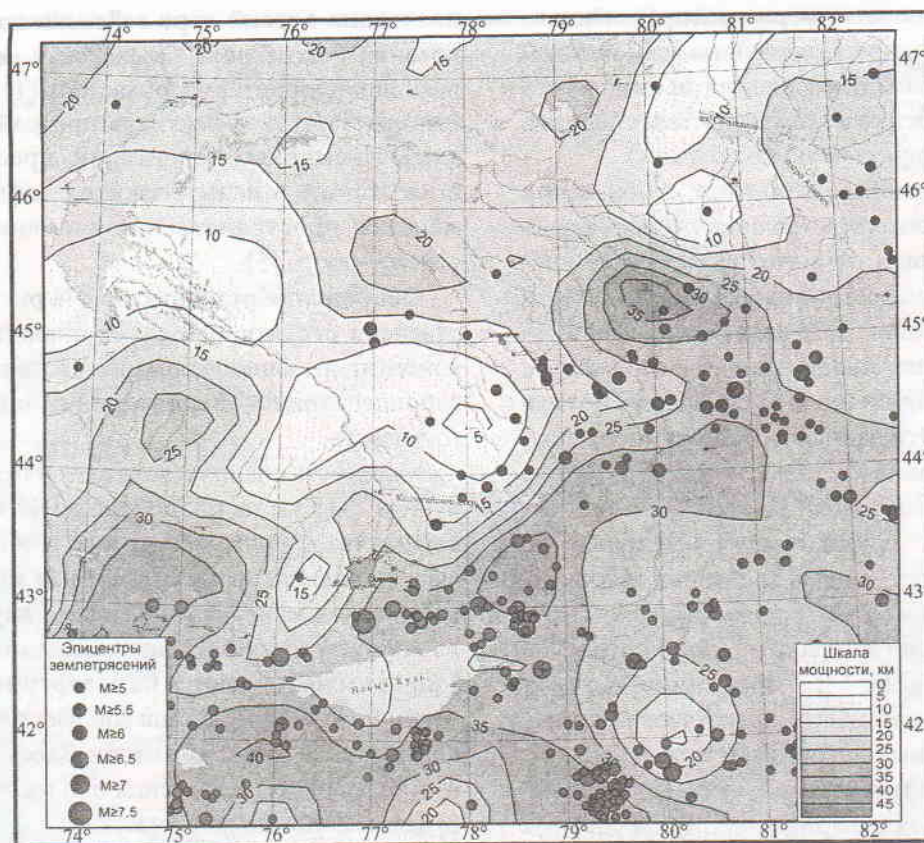


Рисунок 2 – Структурная схема мощности сиалического (гранитогнейсового) слоя консолидированной коры юго-востока Казахстана с очагами землетрясений магнитудой $M=4,6-7,5$

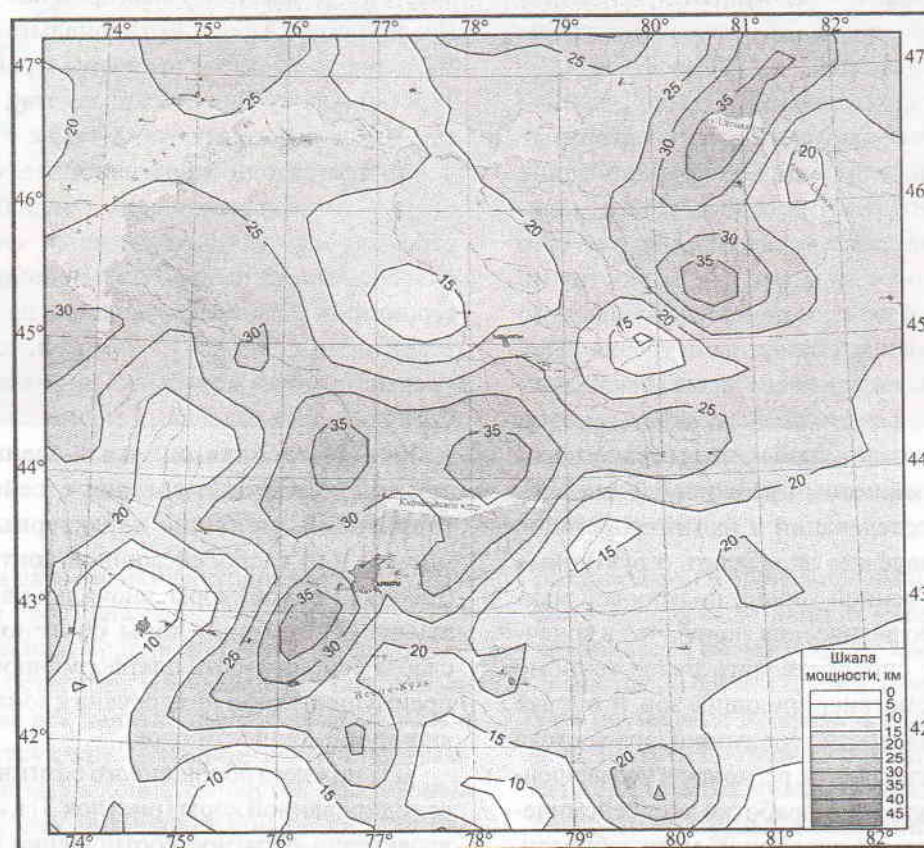


Рисунок 3 – Схема мощности обобщенного базитового слоя консолидированной коры юго-востока Казахстана

сиалическим слоем. Однако в деталях диапазон значений мощности этого слоя на платформе варьирует в больших пределах (15-35 км), чем в орогенах (15-25 км). Аномально высокая мощность (>35 км) отмечена в слабосейсмичных Южно-Прибалхашской, Восточно-Прибалхашской, Алакольской, Алматинской, Жаркентской впадинах. В орогенах Северного Тянь-Шаня, Джунгарии мощность слоя составляет 10-20 км. Количественная оценка значений этого параметра также устойчиво связана с сейсмичностью территорий: низкие значения характерны для высокосейсмичной коры орогенов (5-10 км), при этом мощность верхнего сиалического слоя максимальна. В деталях диапазон мощности слоя на платформе составляет 10-35 км, в орогенах – 5-20 км.

Основное достоинство этой схемы в свете поисков внутрикоровых неоднородностей, осложняющих сейсмическую обстановку, заключается в том, что осложнения выявлены не только в орогенах, где они ожидаемы, но и на платформе.

Важным критерием сейсмичности является рельеф поверхности Мохоровичича (подошвы

земной коры). В результате обобщенных построений с единых методических позиций и увязки различных материалов глубинных сейсмических зондирований, с учетом опубликованных и фондовых результатов большого числа авторских данных [3] составлена структурная схема подошвы земной коры (рисунок 4).

Ее гипсометрическое положение отражает глубинные геодинамические процессы и находится в соответствии с распределением альпийских структур региона, причем области ее наибольшего погружения приурочены к орогеническим поясам. Основные особенности земной коры, обуславливающие локализацию в ней потенциальных очаговых зон сильных землетрясений, пространственно связаны с ее консолидированной частью, ограниченной сверху кровлей кристаллического фундамента (или подошвой мезозой-кайнозойского осадочного чехла) и подошвой земной коры (граница М) снизу. В случае присутствия в низах коры коромантийной смеси значимой мощности ее лучше исключать (для чистоты геодинамических интерпретаций) из состава консолидированной коры. В количе-

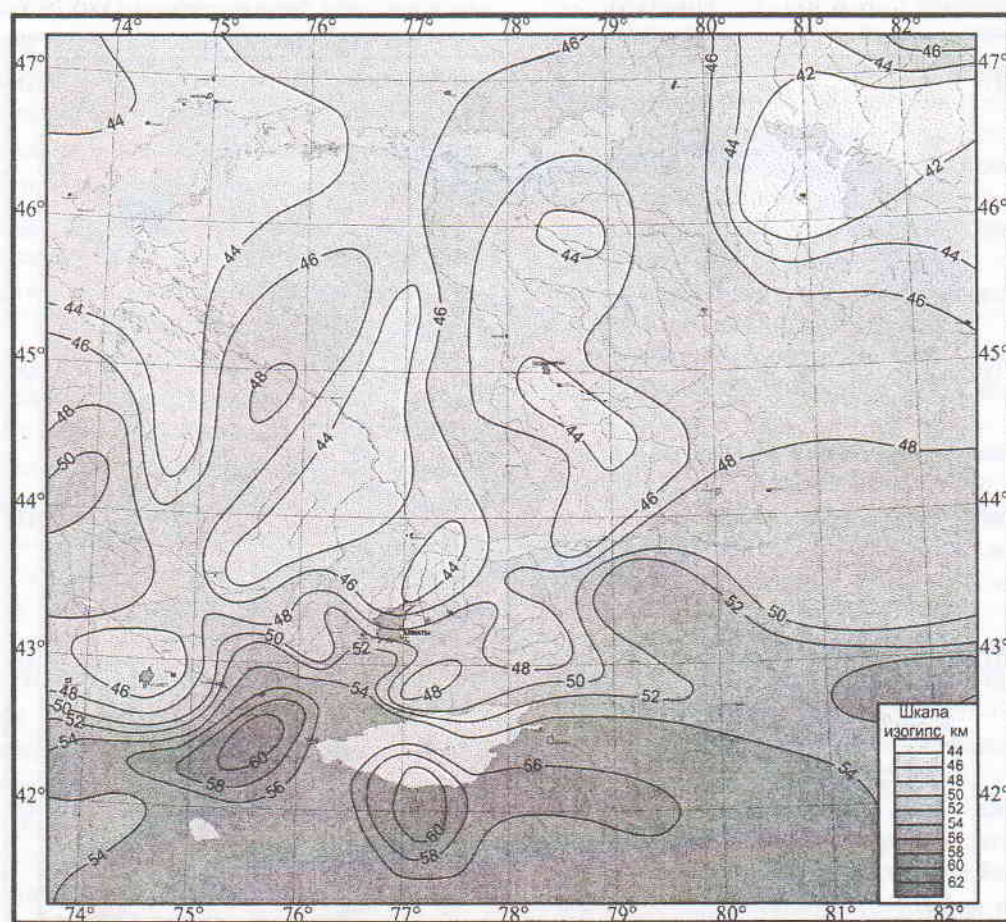


Рисунок 4 – Структурная схема подошвы земной коры юго-востока Казахстана

ственных представлениях о скоростной структуре консолидированной коры (без коромантийной смеси) ее кровля контролируется изолинией $V_p=5,6$ км/с, а подошва – $V_p=7,2$ км/с. На представленной структурной схеме подошва земной коры понимается как переходный слой малой мощности, контролируемый снизу изолиниями $V_p \geq 8,2$ км/с для асейсмичных или слабосейсмичных платформ и $7,6 < V_p < 8,0$ км/с для высокосейсмичных орогенов.

Глубина залегания подошвы коры колеблется от 42 до 60 км. Однако её аномально низкое положение от 48 до 60 км отмечается только в узкой южной полосе территории, занятой структурами хребтов Тянь-Шаня. Граница между Тянь-Шанем и преобладающей остальной приорогеной территорией примерно контролируется изогипсой 48 км. Гипсометрический уровень в предгорных впадинах варьирует в основном от 44 до 46 км. Минимальная мощность коры выявлена в Алакольской впадине и составляет 42-44 км. По этому параметру (в отличие от других) не обозначается какая-либо устойчивая структурная закономерность, позво-

ляющая дифференцировать территорию впадин по потенциальной сейсмичности. Тем не менее с достаточной уверенностью можно отнести этот район к слабосейсмичным. Другой особенностью структуры подошвы коры, представляющей непосредственный интерес при поиске умеренных сейсмогенерирующих зон в комплексе с другими данными глубинной геофизики, являются ее локальные погружения до 50 км.

В процессе объемного Р-скоростного моделирования земной коры и верхней мантии высокосейсмичных регионов юго-востока Казахстана и сопоставительного анализа его результатов с распределением в геологической среде сильных землетрясений установлено, что одним из важнейших критериев геодинамической (в том числе сейсмической) активности литосферы является наличие активной мантии, характеризующейся низкими значениями скорости и аномально высокой температурой. Понятие активной мантии и его экспериментальное обеспечение обоснованы в работах [6, 7, 13, 14].

В верхней мантии Тянь-Шаня выявлено слож-

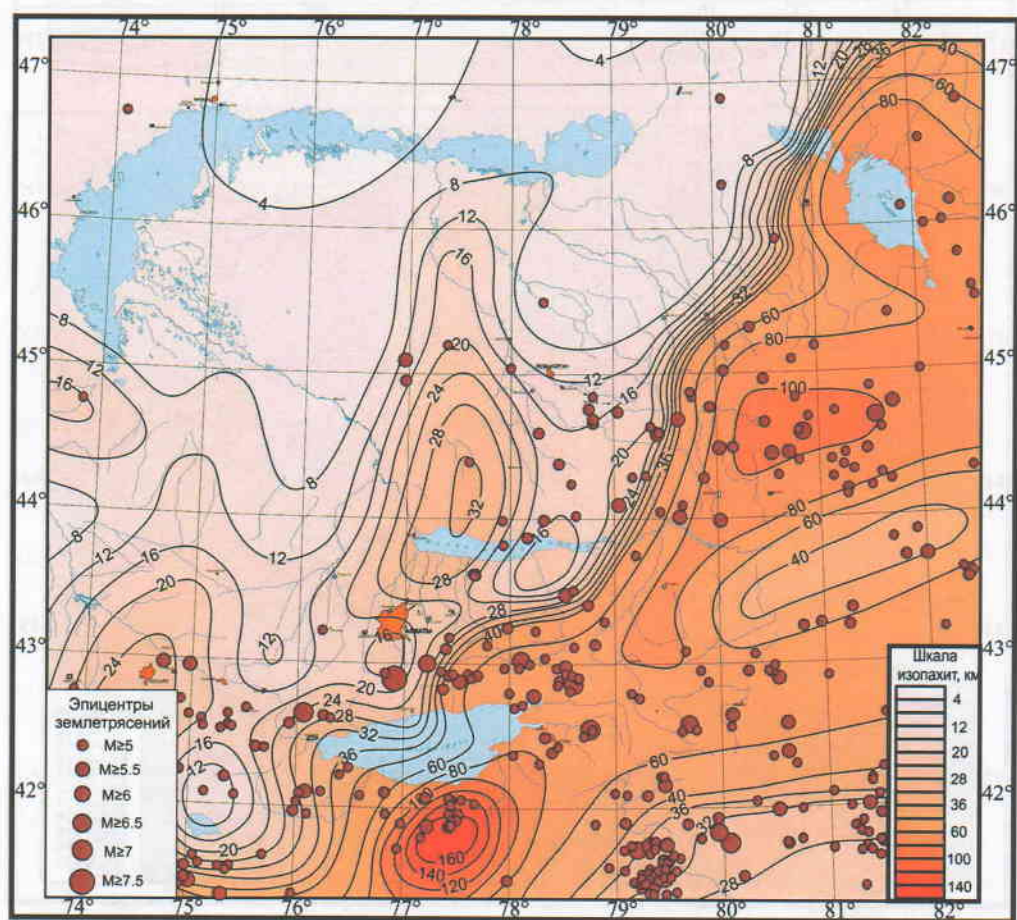


Рисунок 5 – Схема мощности активной мантии юго-востока Казахстана

ное гетерогенное поле скорости V_p , характеризующееся серией чередующихся неоднородностей, аномально высоко- и низкоскоростных по отношению к нормальным значениям (рисунок 5).

Неоднородности наиболее контрастны в зоне сочленения Тянь-Шаня с Памиром. При удалении от этой зоны на север и юг структура поля V_p упрощается. Высокоскоростные включения интерпретируются как охлажденные протоплюмы (слэбы), испытывающие в настоящее время опускание под действием гравитации, а низкоскоростные – как восходящие потоки (плюмы) разогретого вещества мантии (глубинные энерговоды). В низах разреза, в его изученной части до глубины 500 км, те и другие локализованы на фоне нормального поля значений V_p . При продвижении вверх разогретое вещество мантии постепенно занимает весь подкоровый объем в орогене, контролируя его высокосейсмичные территории. К низкоскоростным неоднородностям ($V_p = 7,6-8,0$ км/с) приурочены высокотемпературные аномалии интенсивностью 1100-1400°C [6, 7]. Эти неоднородности отнесены к активной мантии как отличающиеся повышенной интенсивностью физико-химических преобразований, обуславливающих спектр геодинамических процессов.

При сопоставлении структуры активной мантии с картами эпицентров землетрясений установлена устойчивая зависимость: очаги сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ повсеместно фиксируются в орогенах Северного, Южного Тянь-Шаня, Джунгарии, подстилаемых слоем активной мантии наибольшей мощности (более 120 км). Для слабосейсмичной территории Южно-Прибалхашской и Восточно-Прибалхашской впадин мощность активной мантии составляет менее 8 км.

Заключение. На основании объемного Р-скоростного моделирования земной коры и верхней мантии выявлены основные закономерности распределения структурно-скоростных неоднородностей на орогенных и платформенных территориях юго-востока Казахстана в связи с сейсмичностью:

1. Консолидированная земная кора высокосейсмичных орогенов юго-востока Казахстана характеризуется аномально повышенной мощностью верхнего сиалического комплекса пород и соответственно пониженной мощностью нижнего базитового комплекса, что являются одним из критериев выделения сейсмогенерирующих зон. Типичная платформенная слабосейсмичная кора характеризуется примерно равным соотношением мощностей сиалического и базитового слоев.

2. Форма рельефа подошвы коры, со значительными колебаниями глубины залегания, является однозначным признаком высокой сейсмической активности.

3. Пространственное положение очагов сильных и умеренных землетрясений связано с наличием объемов активной мантии, что подтверждает возможность рассматривать присутствие активной мантии в качестве одного из критериев современной геодинамической нестабильности литосферы юго-востока Казахстана и выделения сейсмогенерирующих зон.

Финансирование. Работа выполнена в рамках программы целевого финансирования «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе», код программы Ф.0980, ИРН ОР11465449. Источник финансирования – Министерство образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Абаканов Т.Д., Ли А.Н., Садыкова А.Б., Степаненко Н.П., Силачева Н.В., Садыров Р.К. Методология разработки карт сейсмического районирования сейсмоопасных территорий Казахстана (на примере Восточно-Казахстанской области). – Алматы, 2013. – 127 с.
- 2 Белоусова Н.П., Кайдаш Т.М., Степаненко Н.П., Тимуш А.В., Шацлов В.И. Обработка, обобщение и интерпретация материалов взрывной и невзрывной сейсмологии при создании глубинной геофизической основы оценки сейсмической опасности территории Казахстана. – Санкт-Петербург, 2008.
- 3 Геодинамика и сейсмичность литосферы Казахстана / Под ред. Б.С. Ужкенова, Е. Нусипова. – Алматы, 2007. – 411 с.
- 4 Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. В 2 кн. – Москва: Недра, 1990. – Кн.2. – 267 с.
- 5 Нусипов Е.Н., Кайдаш Т.М., Степаненко Н.П., Шацлов В.И. Объемное Р-скоростное моделирование литосферы Каспийского региона // Геология и охрана недр. – 2006. – №1. – С. 52-59.
- 6 Нусипов Е.Н., Оспанов А.Б., Рахымбаев М.М. и др. Особенности структуры активной мантии территории Казахстана в связи с сейсмичностью // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск, 2005. – Вып. 3. – С. 54-59.
- 7 Нусипов Е.Н., Шацлов В.И., Тимуш А.В. Картирование и особенности структуры активной мантии в связи с сейсмичностью территории Республики Казахстан // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. – Москва-Бишкек, 2006. – С. 85-88.
- 8 Силкин К.Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 65 с.

9 Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К. Разработка двумерных сейсмотомографических Р-скоростных моделей земной коры и подкоровой мантии // Геология и охрана недр. –2019. –№3 (72). –С. 71-76.

10 Степаненко Н.П., Тимуш А.В., Шацлов В.И., Кайдаш Т.М., Белоусова Н.П., Тарадаева Т.В. Скоростные модели литосферы как структурно-геофизическая основа при оценке сейсмической опасности территории Казахстана // Материалы 7-го Казахстанско-Китайского симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии». –Алматы, 2010. –С. 280-283.

11 Шацлов В.И. Региональные особенности строения земной коры в связи с сейсмичностью // Сейсмическое районирование Республики Казахстан. –Алматы: Эверо, 2000. – С. 65-74.

12 Шацлов В.И., Сайипбекова А.М. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии // Доклады НАН РК. –1994. –№6. –С. 47-52.

13 Maruyama Sh. Plume tectonics // Jour. Geol.Soc. Japan. –1994. –Vol. 100, №1. – P. 24-49.

14 Su W.-J., Woodward R.L., Dziewonski A.M. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle // J.of Geophys.Res. –1994. –Vol.99, №134. –P. 6945-6980.





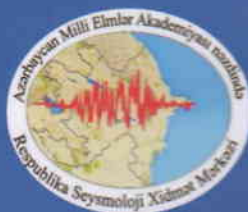
*Azərbaycan Respublikasının
Fövqəladə Hallar Nazirliyi*

*Ministry of Emergency
Situations of the Republic of
Azerbaijan*



*Azərbaycan Milli Elmlər
Akademiyası*

*Azerbaijan National
Academy of Sciences*



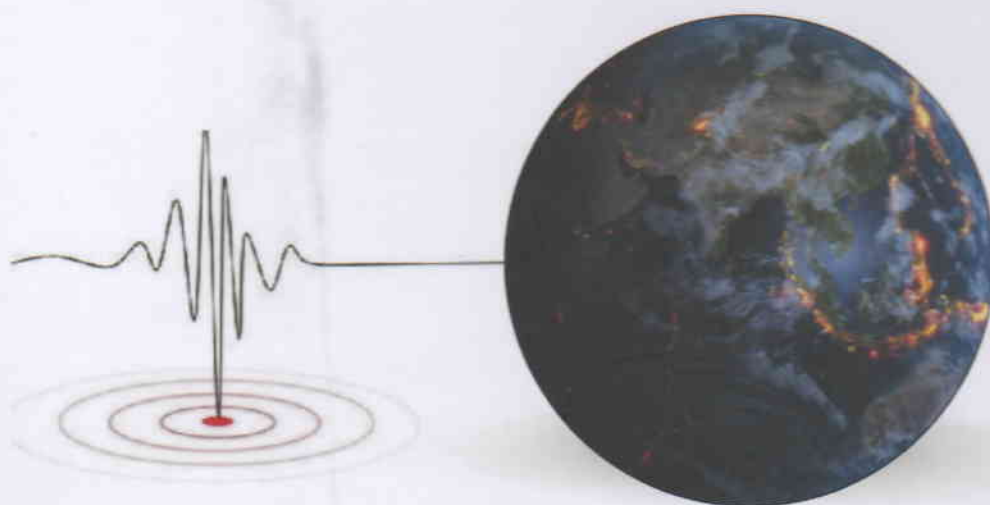
*Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası nəzdində
Respublika Seysmoloji Xidmət Mərkəzi
Republican Seismic Survey Center of the
Azerbaijan National Academy of Sciences*

*Ulu Öndər Heydər Əliyevin anadan olmasının
100 illiyinə həsr olunmuş
"Seysmologiya və mühəndis seysmologiyası" üzrə*

VII Beynəlxalq Konfransın materialları

Materials of VII International Conference

*"Seismology and Engineering Seismology"
dedicated to the 100th anniversary of the birth
of the Nationwide Leader H. Aliyev*



**06-09 June
BAKU-2023**

**ULU ÖNDƏR HEYDƏR ƏLİYEVİN ANADAN OLMASININ
100 İLLİYİNƏ HƏSR EDİLMİŞ “SEYSMOLOGİYA VƏ
MÜHƏNDİS SEYSMOLOGİYASI” ÜZRƏ VII
BEYNƏLXALQ KONFRANS**

**VII INTERNATIONAL CONFERENCE “SEISMOLOGY
AND ENGINEERING SEISMOLOGY” DEDICATED TO
THE 100TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF THE
NATIONWIDE LEADER H. ALİYEV**

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПО ТЕМЕ
«СЕЙСМОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ»
ПОСВЯЩЕННАЯ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ОБЩЕНАЦИОНАЛЬНОГО ЛИДЕРА Г.АЛИЕВА**

Ulu Öndər Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr edilmiş “Seysmologiya və mühəndis seysmologiyası” üzrə VII Beynəlxalq konfrans materialları (toplu)

REDAKSIYA HEYƏTİ

İ.S.Quliyev, Q.C.Yetirmişli, Ç.S.Əliyev,
F.Ə.Qədirov, P.Z.Məmmədov, T.Y.Məmmədli,
A.Q.Rzayev, C.Ə. Camalov.

BEYNƏLXALQ REDAKSIYA ŞURASI

E.Sandvol (ABŞ), R. Gök (ABŞ), D. Kalafat (Türkiyə), T.Qodoladze (Gürcüstan), T.A.Abakanov (Qazaxıstan), K.N.Abdullabekov (Özbəkistan), İ.A.Kerimov (Rusiya), A. Kijko (CAR)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

И.С.Гулиев, Г.Д.Етирмишли Ч.С.Алиев,
Ф.А.Кадиров, П.З.Маммедов, Т.Я.Маммадли,
А.Г.Рзаев, Дж.А.Джамалов.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Э. Сандвол (США), Д. Калафат (Турция), Р. Гёк (США), Т. Годоладзе (Грузия), Т.А.Абаканов (Казахстан), К.Н.Абдуллабеков (Узбекистан), И.А. Керимов(Россия), А. Кижко (ЮАР)

EDITORIAL BOARD

I.S.Guliyev, G.J.Yetirmishli, Ch.S.Aliyev,
F.A.Kadirov, P.Z.Mammedov, T.Y.Mammadli,
A.G.Rzayev, J.A. Jamalov.

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

E. Sandvol (USA Missouri), D. Kalafat (Turkey), R.Gok (USA), T.Godoladze (Georgia), T.A.Abakanov (Kazakhstan), K.N.Abdullabekov (Uzbekistan), I.A. Kerimov(Russia), A.Kijko (SAR)

Toplumda Ulu Öndər Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr olunmuş “Seysmologiya və mühəndis seysmologiyası” mövzusunda 06-09 iyun 2023-cü il tarixində keçirilən VII Beynəlxalq konfransın materiallarından ibarət elmi məqalələr verilmişdir. Toplum seysmologiya, zəlzələlərin proqnozu, seysmik rayonlaşdırma və zəlzələyə davamlı tikinti məsələləri ilə məşğul olan mütəxəssislər üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Сборник содержит научные статьи из материалов VII Международной конференции «Сейсмология и инженерная сейсмология», посвященной 100-летию со дня рождения Общенационального Лидера Гейдара Алиева, состоявшейся 6-9 июня 2023 года. Сборник предназначен для специалистов, занимающихся вопросами сейсмологии, прогнозирования землетрясений, сейсмического районирования и сейсмостойкого строительства.

The collection contains scientific articles from the materials of the VII International Conference "Seismology and Engineering Seismology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Nationwide Leader Heydar Aliyev, held on June 6-9, 2023. The collection is intended for specialists involved in seismology, earthquake prediction, seismic zoning and earthquake-resistant construction.

Ф. Г. Габибов О влиянии физических полей, вызванных активизацией сейсмики на интенсификацией оползневых процессов.....	205
Ф. Г. Габибов О возможности использования энергии землетрясений при глубинном уплотнении лессовых просадочных суглинков гидровзрывами.....	209
Ф. Г. Габибов, А. З. Зейналов Паспортизация устойчивости Байловского оползневого склона города Баку с учетом сейсмичности.....	218
Q.C.Yetirmişli, S.S.İsmayılova Qarabağ zonasının seysmikliyinin inkişaf dinamikası.....	223
V.M.Əliyev Hündür binaların zəlzələyə davamlılığının təmin olunmasında ‘Autriqer və Kəmər’ sistemlərinin səmərəliliyinin tədqiqi.....	233
А.С. Зверева Спектральные и динамические параметры очагов наиболее сильных землетрясений Восточного Кавказа в 2021-2022 гг.	239
Z. Bayramov, A.Maggi, A. Irzayev, A. Gahramanli, C. Doubre, G. Babayev Clustering-based analysis of the Gunnels et al. (2021) Seismic hazard analysis – in 50 years perspective.....	245
N.V.Qarayeva “Tikinti işləri aparılacaq sahələrdə zəlzələnin təsirindən qruntların fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərinin anomal dəyişmələrinin nəzərə alınması üsulları”.....	257
G.R. Babayev, T.H. Babayev, Y.N. Aliyev, I.B. Muradi Numerical earthquake ground motion modeling for southern slope of Greater Caucasus.....	264
О. В. Павленко Эффекты направленности излучения крупных очагов на примере катастрофических землетрясений Японии и Турции.....	269
Z. V. Aliyev, G. R. Babayev Impact of magneto-seismicity to earthquake hazard analysis.....	270
О.К. Курилова, Н. П. Степаненко Geological and geophysical foundations for assessing seismic hazard in eastern Kazakhstan.....	272
A. Kijko Seismic hazard analysis – in 50 years perspective.....	274
A. Chiang, R. Gök, T. Godoladze, A. Berezina, K. Aderhold, A. Aguiar, K. Hafner, R. Woodward, K. Mackey, J. Stachnick, G. Yetirmishli, N. Mikhailova, B. Ashirov, S. Negmatullayev Seismic network expansion in the Caucasus and Central Asia (Snecca).....	275

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL FOUNDATIONS FOR ASSESSING SEISMIC HAZARD IN EASTERN KAZAKHSTAN

Курилова О.К. Степаненко Н.П.

ТОО «Институт сейсмологии» МЧС РК

Abstract. This paper discusses the analysis of active fault tectonics, seismotectonics, geophysical, seismological data in order to predict dangerous endogenous geological processes, primarily seismic in the territory of East Kazakhstan.

Active faults of various morphokinematic types play a key role in controlling the seismicity of the study area. They are the most important deformation structural elements of the earth's crust, they form regularly oriented systems, the study of which creates the prerequisites for identifying structural criteria for the localization of earthquake sources.

We studied faults, the activity of which is confirmed by modern seismicity. During the work, a large amount of materials from literary and stock sources, electronic maps, geological and tectonic maps on paper were used. As a result of the analysis and generalization of the collected data at the modern level using GIS technologies, a vector digital Map of active faults of East Kazakhstan was developed with an attributive database, including the name of the fault, segmentation, segment length and their geographical coordinates, data on kinematics (direction of movement), azimuth strike, dip angle, movement speeds, estimated magnitude M_w .

The identified factors of the activity of the earth's crust made it possible to substantiate the seismic hazard of the region, presented on the map of seismotectonics, from a seismotectonic position. The map reflects, on the one hand, the block structure of the earth's crust, i.e. geotectonic elements at different deep levels (thickness of the earth's crust; the presence of an active mantle; regional deep faults established by geological and geophysical methods; material composition), and on the other hand, the direction of their movement at the neotectonic stage (amplitudes of displacement of the pre-orogenic alignment surface along the faults during the neotectonic stage).

Conducted geological-tectonic, geophysical, seismological studies served as the basis for creating a seismotectonic model of real and potential zones of occurrence of earthquake sources (seismogenic zones), which are the source of possible seismic effects.

Аннотация. В данной работе рассматривается анализ активной разломной тектоники, сейсмотектоники, геофизических, сейсмологических данных в целях прогнозирования опасных эндогенных геологических процессов, прежде всего, сейсмических на территории Восточного Казахстана.

Активные разломы различных морфокинематических типов играют ключевую роль в контроле сейсмичности региона исследований. Они являются важнейшими деформационными структурными элементами земной коры, образуют закономерно ориентированные системы, изучение которых создает предпосылки для выявления структурных критериев локализации очагов землетрясений.

Исследовались разломы, активность которых подтверждается современной сейсмичностью. В ходе работ использован большой объем материалов из литературных и фондовых источников, электронных карт, геологических и тектонических карт на бумажных носителях. В результате анализа и обобщения собранных данных на современном уровне с применением ГИС-технологий разработана векторная цифровая Карта активных разломов Восточного Казахстана с атрибутивной базой данных, включающая название разлома, сегментацию, длину сегментов и их географические координаты, данные о кинематике (направлении перемещений), азимут простираения, угол падения, скорости движений, расчетную магнитуду M_w .

Выявленные факторы активности земной коры позволили с сейсмотектонической позиции обосновать сейсмическую опасность региона, представленную на карте сейсмотектоники. Карта отражает, с одной стороны, блоковую структуру земной коры, т.е. геотектонические элементы на разных глубинных уровнях (мощность земной коры; наличие активной мантии; установленные геологическими и геофизическими методами региональные глубинные разломы; вещественный состав), а с другой – направленность их движения на неотектоническом этапе (амплитуды смещения доорогенной поверхности выравнивания вдоль разломов в течение неотектонического этапа).

Проведенные геолого-тектонические, геофизические, сейсмологические, исследования послужили основой создания сейсмотектонической модели реальных и потенциальных зон возникновения очагов землетрясений (сейсмогенерирующих зон), являющихся источником возможных сейсмических воздействий.



МИНИСТЕРСТВО ПО
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



АГЕНТСТВО ПО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ
СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО
АВТОНОМНОГО РАЙОНА



НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ



АДМИНИСТРАЦИЯ ПО
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ КИТАЙСКОЙ
НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

XI ҚАЗАҚСТАН-ҚЫТАЙ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СИМПОЗИУМЫ
«ОРТА АЗИЯ АЙМАҒЫ БОЙЫНША СЕЙСМИКАЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ПЕН
ҚАТЕРДІ БАҒАЛАУ, ЖЕР СІЛКІНІСІН БОЛЖАУ»

XI КАЗАХСТАНСКО-КИТАЙСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ
«ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ»

XI KAZAKHSTAN-CHINESE INTERNATIONAL SYMPOSIUM
«EARTHQUAKE FORECAST, SEISMIC HAZARD AND SEISMIC RISK
ASSESSMENT IN CENTRAL ASIA»

26-28 September
ALMATY-2023

МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

АГЕНТСТВО ПО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ
СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО АВТОНОМНОГО РАЙОНА

НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ
РЕСПУБЛИКИ

ХІ ҚАЗАҚСТАН ҚЫТАЙ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СИМПОЗИУМЫ
*«Орта Азия аймағы бойынша сейсмикалық қауіпсіздік
пен қатерді бағалау, жер сілкінісін болжау»*

ХІ КАЗАХСТАНСКО-КИТАЙСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ
*«Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности
и сейсмического риска в Центральной Азии»*

ХІ KAZAKHSTAN-CHINESE INTERNATIONAL SYMPOSIUM
«Earthquake forecast, seismic hazard and seismic risk assessment in Central Asia»

26.09.2023 - 28.09.2023

Организаторы:

Министерство по Чрезвычайным Ситуациям Республики Казахстан,
Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований

Алматы - 2023

	DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES, THE UNIVERSITY OF HONG KONG, POKFULAM ROAD, HONG KONG, CHINA - GEOMETRY AND KINEMATICS OF ACTIVE KASHA BACKTHRUST FAULT SINCE LATE PLEISTOCENE: IMPLICATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE URUMQI FOLD-AND-THRUST BELT, NORTHERN TIANSHAN	
5	<i>Yingfeng Zhang, Xinjian Shan, Wenyu Gong, Guohong Zhang, Chunyan Qu, Tao Li</i> , STRAIN ACCOMMODATION AND SEISMIC HAZARDS OF THE KALPIN FOLD-AND-THRUST BELT, SOUTHWESTERN TIAN SHAN FORELAND, CHINA: INSIGHTS FROM THE 2020 MW 6.0 KALPIN EARTHQUAKE	380
6	<i>Zuo Hong</i> , STUDY ON SIGNIFICANT SEISMIC ACTIVITY AND RUPTURE SCALE IN THE REGION OF SOUTHEASTERN SICHUAN	382
7	<i>Абдуллаев А.У., Борисов В.Н., Есенжигитова Е.Ж., Маркин М.Ю.</i> ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКСХАЛЯЦИИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА В РАЙОНЕ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСК В ВОСТОЧНОМ КАЗАХСТАНЕ В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧЕСКИМ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕМ	387
8	<i>Данабаева А. Т., Абдрахматов К. Е., Силачева Н.В., Сыдыков А., Нурмагамбетов А.,</i> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «OPENQUAKEENGINE» ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ (ВОСО) ЖОНГАРО-БАЛХАШСКОГО РЕГИОНА	398
9	<i>Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ашуров С.Х.</i> , КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА	410
10	<i>Литовченко И.Н.</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	415
11	<i>Михайлова Н.Н., Узбеков А.Н.</i> К ВОПРОСУ О СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА	420
12	<i>N.V. Silacheva, U.K. Kulbayeva, N.A. Kravchenko, L.S. Kaliyeva,</i> STRONG MOTION OBSERVATIONS IN THE TERRITORY OF KAZAKHSTAN	427
13	<i>N.V. Silacheva,</i> PROBABILISTIC DETAILED SEISMIC ZONING OF REGIONS IN KAZAKHSTAN (PGA CASE)	431
14	<i>Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К., Еркинова А.Б.,</i> СТРУКТУРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА	436
15	<i>М.Ю.Маркин</i> , ВЫЯВЛЕНИЕ ПЕРЕКРЫТЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ УСТЬ-КАМЕНОГОРСК (РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)	441
16	<i>Ребецкий Ю.Л.</i> , ОПЫТ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ РАЗЛОМОВ ПО УРОВНЮ КУЛОНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	447
17	<i>Д.А. Сарсенбаев, А.Б. Садыкова, Н.Б. Узбеков., Силачева Н.В., А.Т.Данабаева,</i>	453

Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. vol. 14. p. 4489-4503

[12] Akkar, S., Sandikkaya, M.A., Bommer, J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *Bull. Earthq. Eng.* 12(1) (2014) 359–387

[13] Zhao, J.X., Zhou, Sh., Zhou, J., Zhao, Ch., Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Irikura, K. Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2016. V. 106(4). P.1552–1569.

[14] Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Campbell, K.W., Rowshandel, B., Y., Shantz, T. NGA-West2: A Comprehensive Research Program to Update Ground Motion Prediction Equations for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions. Proceedings of the 15 WCEE, Lisboa (2012).

[15] Goulet, C.A., Bozorgnia, Y., Kuehn, N., Al Atik, L., Youngs, R.R., Graves, R.W., Atkinson, G.M. NGA-East Ground-Motion Characterization model part I: Summary of products and model development, Earthquake Spectra, 2021. <https://doi.org/10.1177/87552930231173454>

Степаненко Н.П., Кайдаш Т.М., Курилова О.К., Еркинова А.Б.

ТОО «Институт сейсмологии»МЧС РК

пр. Аль- Фараби 75а, 050060, г. Алматы, Казахстан

Телефон 8(727) 269-46-05, 87055070108, E-mail: kurilova.o@mail.ru

СТРУКТУРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Аннотация. По комплексу геофизических, геолого-тектонических и сейсмологических данных выявлены структурно-геофизические, структурно-тектонические критерии оценки сейсмической опасности Восточного Казахстана. Охарактеризованы наиболее принципиальные элементы глубинной структуры коры орогенов и платформенных территорий, определяющие формирование сейсмогенерирующих структур. Создана карта тектонических разломов с атрибутивной базой данных, активность которых подтверждается современной сейсмичностью. Разработана региональная сеймотектоническая модель реальных и потенциальных зон возникновения очагов землетрясений (сейсмогенерирующих зон), являющихся источником возможных сейсмических воздействий на селитебные и промышленные объекты исследуемой территории.

Annotation. According to the complex of geophysical, geological-tectonic and seismological data, structural-geophysical, structural-tectonic criteria for assessing the seismic hazard of East Kazakhstan have been identified. The most fundamental elements of the deep structure of the crust of orogens and platform territories that determine the formation of seismogenerating structures are characterized. A map of tectonic faults with an attribute database has been created, the activity of which is confirmed by modern seismicity. A regional seismotectonic model of real and potential zones of occurrence of earthquake foci (seismogenerating zones), which are a source of possible seismic impacts on residential and industrial facilities of the studied territory, has been developed.

Решающий вклад в разработку объективных моделей формирования сейсмогенерирующих зон и оценку физических условий подготовки землетрясений вносят результаты глубинных геофизических исследований, которые позволяют выделить в земной коре и верхней мантии структурные неоднородности, играющие важную роль в современной сейсмической активности. Геофизические данные, подтверждая основные закономерности тектонического строения земной коры, установленные геологическими исследованиями, позволяют оценить их количественно. При этом ведущая роль в проведении геофизических исследований принадлежит сейсмическим методам, обеспечивающим объективным информационным каркасом процесс комплексной

интерпретации геофизических материалов. Одной из составных частей геофизической основы геодинамического районирования литосферы являются данные, характеризующие внутреннюю структуру земной коры и верхней мантии – скорость распространения продольных волн [1].

Территория Восточного Казахстана покрыта сетью профилей глубинных многоволновых сейсмических наблюдений, для которых разработаны двумерные Р-скоростные модели коры и верхней мантии до глубины 70 км в цифровом виде и в изолиниях. Исходной информацией для их формирования явились материалы глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ, МОВЗ) [1]. В труднодоступных высокогорных областях Джунгарии, Алтая, где из-за сложности рельефа невозможно провести глубинное сейсмическое зондирование, применялась методика профильной сейсмической томографии, основанная на обработке данных о вступлении продольных волн, регистрируемых от местных землетрясений [2].

Однако, при интерпретации скоростных характеристик исследуемой среды двумерные модели не дают полного представления о морфологии выделенных структур, что снижает информативность таких моделей и не позволяет получить объективные признаки для реконструкции геодинамических процессов, в том числе землетрясений. Решение задачи по созданию объемной Р-скоростной модели земной коры и верхней мантии на основе двумерных профильных Р-скоростных моделей позволяет создать наиболее полную геолого-геофизическую модель строения исследуемой среды и дать оценку внутренней структуры в трехмерном пространстве.

Модель, в зависимости от решаемых задач, может быть представлена в виде срезов на различных гипсометрических уровнях, разрезов в любом требуемом направлении или набором структурных схем характерных скоростных уровней и мощности слоев между ними. Наиболее информативными, с позиций возможности выявления контрастных внутрикоровых неоднородностей, влияющих на формирование пространственного режима сейсмичности, являются: мощность сиалического (гранито-гнейсового) слоя между скоростными уровнями $V_p=5,6-6,4$ км/с, мощность базитового слоя ($V_p=6,4-7,2$ км/с), рельеф подошвы коры, мощность активной мантии (между подошвой коры и скоростным уровнем 8,0 км/с) [3].

Мощность верхнего сиалического слоя на территории Восточного Казахстана (рисунок 1а) варьирует в пределах 0-35 км. Количественная оценка значений этого параметра устойчиво связана с сейсмичностью: меньшие характерны для асейсмичной или слабосейсмичной нормальной платформенной коры, аномально высокие – для высокосейсмичной коры орогенов. При этом слабая сейсмичность платформенной территории преимущественно приурочена к зонам локальных аномалий мощности слоя Центрально-Казахстанского свода, Алакольской впадины, Северо-Казахстанского свода. Его аномально повышенная мощность (более 35 км) отмечена в пределах Рудного Алтая, является одним из наиболее характерных структурно-геофизических признаков ее высокой сейсмичности, что подтверждается концентрацией очагов землетрясений, произошедших на этой территории. На Алтае в зоне сочленения Кальбинского и Нарымского хребтов в разное время были зафиксированы землетрясения с магнитудой $M=4-5$. Эта область совпадает с локальным повышением мощности сиалического слоя до 20 км. На территории Зайсанской впадины, где были зафиксированы землетрясения с $M=5,5-6,5$, также отмечены зоны повышенных значений до 25 км.

Для обобщенного базитового слоя консолидированной коры (рисунок 1б) в общих чертах характерно обратное соотношение мощности на платформе и в орогенах. Однако, в деталях диапазон значений мощности этого слоя на платформе варьирует в больших пределах (15-35 км), чем в орогенах (15-25 км). Пониженные значения мощности слоя отмечаются на локальном участке в Южно-Прибалхашской впадине и на Алтае (<15 км). Аномально высокая мощность отмечена в пределах слабосейсмичного Центрально-Казахстанского свода (>35 км). Более дифференцированная структура обобщенного

базитового слоя определяется, в основном, сложной формой рельефа поверхности скоростного уровня 6,4 км/с, разделяющего этот слой с вышележащим сиалическим, обусловленной структурными выступами и включениями в него. Несмотря на отмеченные осложнения, в целом структура поверхности скоростного уровня 6,4 км/с характеризуется более плавными формами, а также повышенным гипсометрическим положением на платформе и пониженным – в пределах орогенов на юге территории. Основное достоинство схемы обобщенного базитового слоя, заключается в том, что осложнения выявлены не только в пределах орогенов, где они ожидаемы, но и на платформе.

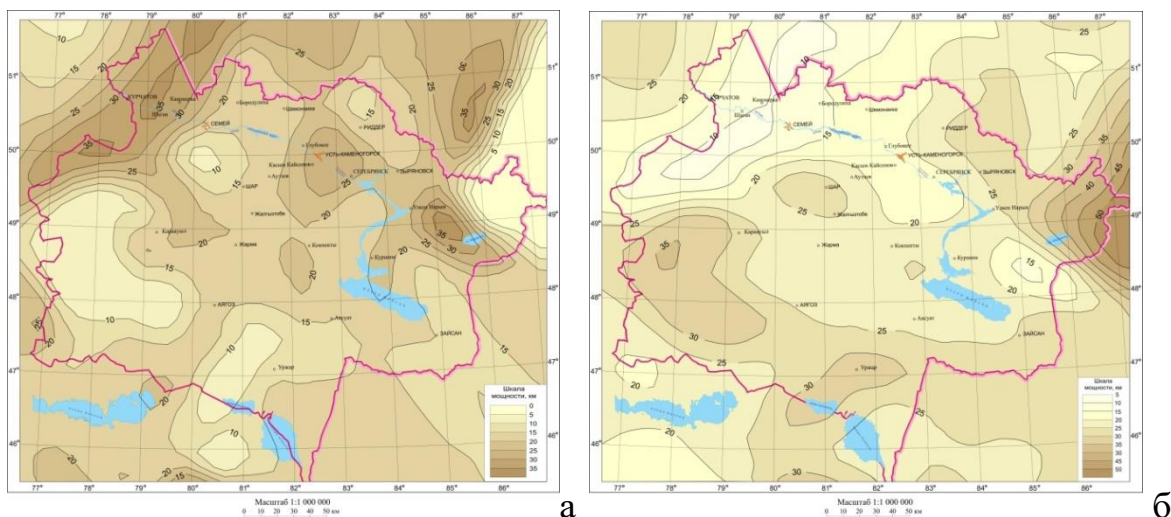


Рисунок 1– Структурные схемы: а – мощности сиалического слоя консолидированной коры, б – мощности обобщенного базитового слоя консолидированной коры Восточного Казахстана

Важным критерием сейсмичности является рельеф поверхности Мохо (подошвы земной коры), структурная схема которого (рисунок 2а) разработана в результате обобщенных построений с единых методических позиций и увязки различных материалов глубинных сейсмических зондирований с учетом опубликованных и фондовых данных большого числа авторских данных [3].

Гипсометрическое положение подошвы коры отражает глубинные геодинамические процессы и находится в соответствии с распределением альпийских структур региона, причем области ее наибольшего погружения приурочены к орогеническим поясам. Глубина залегания подошвы коры колеблется в пределах 40-46 км в западной, северной, южной и центральной частях планшета. В восточном горном регионе Алтая она увеличивается до 55 км. В обоих случаях на описываемой территории наблюдается увеличение мощности коры в восточном и юго-восточном направлениях с частым чередованием и сложной формой изолиний в Рудном Алтае и их относительно плавной – в Горном Алтае. Ее сложная форма со значительными колебаниями глубины залегания, пространственно контролируемые обновленными в новейшее время зонами глубинных разломов, является однозначным признаком высокой сейсмической активности центральной и северо-восточной частей территории Восточного Казахстана.

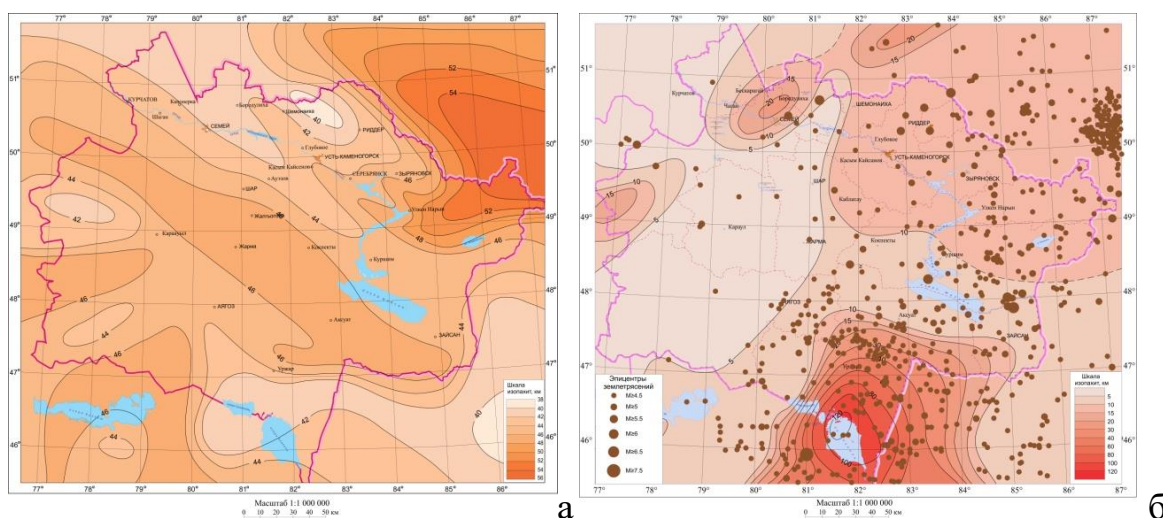


Рисунок 2 – Структурные схемы: а – подошвы земной коры, б – мощности активной мантии Восточного Казахстана

При сопоставительном анализе результатов объемного моделирования с распределением в геологической среде очагов сильных землетрясений установлено, что одним из важнейших критериев геодинамической (в том числе сейсмической) активности литосферы является наличие активной мантии, характеризующейся низкими значениями скорости и аномально высокой температурой. Понятие активной мантии и его экспериментальное обеспечение обоснованы в работах [4-7]. В верхней мантии выявлено сложное гетерогенное поле скорости V_p , характеризующееся серией чередующихся неоднородностей, аномально высоко- и низкоскоростных по отношению к нормальным значениям (рисунок 2б). Высокоскоростные включения интерпретируются как охлажденные протоплюмы (слэбы), испытывающие в настоящее время опускание под действием гравитации, а низкоскоростные – как восходящие потоки (плюмы) разогретого вещества мантии (глубинные энерговоды). При продвижении вверх разогретое вещество мантии постепенно занимает весь подкоровый объем в пределах орогена, контролируя его высокосейсмичные территории. Низкоскоростные неоднородности ($V_p=7,6-8,0$ км/с) отнесены к активной мантии, как отличающиеся повышенной интенсивностью физико-химических преобразований, обуславливающих спектр геодинамических процессов. При сопоставлении структурной схемы активной мантии с картами эпицентров землетрясений установлена устойчивая зависимость: очаги сильных землетрясений ($M \geq 6$) повсеместно фиксируются в пределах орогенов, подстилаемых слоем активной мантии повышенной мощности ($H > 8$ км). На асейсмичных территориях активная мантия отсутствует ($H = 0$ км), а в переходных зонах от асейсмичных к высокосейсмичным активная мантия выклинивается ($0 \text{ км} \leq H \leq 8 \text{ км}$).

На обширной территории между Джунгарским Алатау и Тарбагатаем, где мощность активной мантии достигает 120 км, отмечено наибольшее скопление очагов сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6$. Практически всю казахстанскую часть Алтая подстилается активной мантией мощностью более 10 км. В Южном и Рудном Алтае также были зафиксированы землетрясения $M=5-6$. Локальные участки повышенной мощности до 15 км отмечаются на западной и юго-западной границах планшета: между северным окончанием гор Агузбель и хребтом Канчингиз, расположенных на восточной окраине Казахского мелкосопочника, на границе с Южно-Прибалхашской впадиной. Меньшие по площади локальные участки выделены в Прииртышской равнине, расположенной на севере планшета в зоне сочленения Западно-Сибирской синеклизы с Северо-Казахстанским сводом. Здесь мощность активной мантии достигает 20 км. Этот регион традиционно считался асейсмичным, но с получением новых данных о строении коры и мантии его следует отнести к сейсмически активным. На платформенных территориях

(Туранская низменность, Казахский щит), где мощность активной мантии составляет менее 5 км, зафиксированы землетрясения с магнитудой не более 4,5.

Связь пространственного положения очагов сильных и умеренных землетрясений с наличием объемов активной мантии подтверждает возможность рассматривать присутствие активной мантии в качестве одного из критериев современной геодинамической нестабильности литосферы Восточного Казахстана и выделения по ним сейсмогенерирующих зон.

При выявлении структурно-тектонических критериев сейсмичности проведен анализ новейших тектонических движений и их интенсивности в различных неотектонических областях. Важным показателем сейсмичности региона является наличие активных разломов. Активные разломы различных морфокинематических типов играют ключевую роль в контроле сейсмичности региона исследований. Разрывные дислокации ограничивают подвижные блоки и образуют закономерно ориентированные системы, изучение которых создает предпосылки для выявления структурных критериев локализации очагов землетрясений [8]. Современные ГИС-системы баз данных представляют удобную форму для работы и интерпретации больших объемов информации. Исследовались разломы, активность которых подтверждается современной сейсмичностью по данным инструментальных исследований и анализа космоснимков, снимков ДЗЗ (рисунок 3а). Атрибутивная база данных содержит сведения по 26 географически привязанным объектам (разломам и их сегментам с признаками последних перемещений в позднем плейстоцене и голоцене): их названия, сегментацию, длину сегментов и их географические координаты, данные о кинематике (направлении перемещений), азимут простираия, угол падения, скорости движений, расчетную магнитуду M_w [9].

Бюллетени инструментальных сейсмологических исследований и анализ архивных данных показали, что на территории Восточного Казахстана происходили и происходят тектонические землетрясения [10]. Из-за того, что сильные землетрясения редки, многие очаговые зоны, постоянно действующие в геологическом масштабе времени, мало изучены. В редких случаях имеются сейсмостатистические данные за промежутки времени, измеряемые сотнями или тысячами лет; но срок, в течение которых проводились инструментальные наблюдения в данном регионе, не превышает 80 лет. Максимальная магнитуда зарегистрированных землетрясений составляет $M=6,5$ и фоновая сейсмичность позволяет отнести регион к сейсмоопасным.

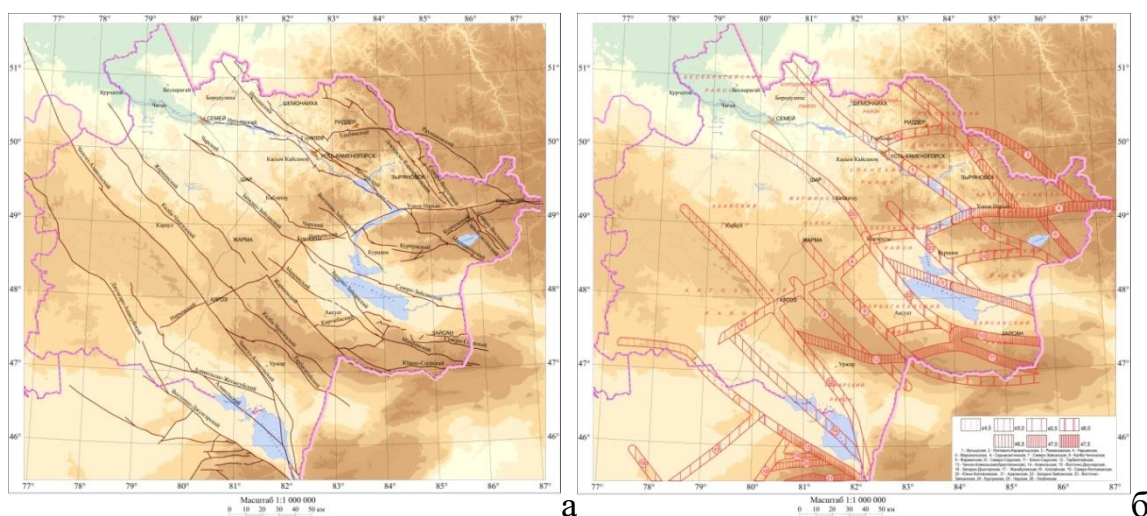


Рисунок 3: а – карта активных разломов, б – карта сейсмогенерирующих зон Восточного Казахстана

Обобщенный анализ и интерпретация геолого-геофизического, сейсмологического материала с позиции активной тектоники и ее роли в сейсмическом процессе исследуемого района позволили выявить закономерности размещения очагов

землетрясений и обосновать сейсмическую активность региона, оценить геотектонические элементы на разных глубинных уровнях установленные геологическими и геофизическими методами (мощность земной коры; региональные глубинные разломы; вещественный состав), выявить направленность движения основных геологических структур на неотектоническом этапе [11]. В результате проведенных исследований разработана сеймотектоническая модель (Карта сейсмогенерирующих зон) (рисунок 3б) территории Восточного Казахстана. Установленные геофизические, тектонические и сейсмологические критерии послужили основой дифференциации сейсмогенерирующих зон по максимальной магнитуде ожидаемых землетрясений.

Литература

- 1 Шацлов В.И., Горбунов П.Н. Степаненко Н.П. и др. Скоростные модели земной коры Казахстана // Алматы, "ЕВРАЗИЯ", 1993. - 105 с.
- 2 Шацлов В.И., Сайипбекова А.М. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии. // Доклады НАН РК. 1994. №6. - С. 47-52.
- 3 Геодинамика и сейсмичность литосферы Казахстана. / Под ред. Б.С. Ужкенова, Е. Нусипова. - Алматы, 2007. - 411 с.
- 4 Нусипов Е.Н., Оспанов А.Б., Рахымбаев М.М. и др. Особенности структуры активной мантии территории Казахстана в связи с сейсмичностью // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. - Иркутск, 2005. Вып. 3. - С. 54-59.
- 5 Нусипов Е.Н., Шацлов В.И., Тимуш А.В. Картирование и особенности структуры активной мантии в связи с сейсмичностью территории Республики Казахстан // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. - Москва-Бишкек, 2006. - С. 85-88.
- 6 Maruyama Sh. Plume tectonics. // Jour. Geol.Soc.Japan, 1994, Vol. 100, №1. - P. 24-49. Jour/Geol.Soc.Japan, Vol.100, №1, 1994. - P.24-49.
- 7 Su W.-J., Woodward R.L., Dziewonski A.M. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. // J.ofGeophys.Res. 1994. Vol.99, №134. - P. 6945-6980.
- 8 Активные разломы Казахстана и соседних регионов. Масштаб: 1: 2 500 000. / Отчет «Разработка карты общего сейсмического зонирования на территории Республики Казахстан.» - 2014 г.
- 9 Donald L. Wells; Kevin J. Coppersmith New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement Bulletin of the Seismological Society of America (1994) 84 (4): 974–1002.
- 10 Каталог землетрясений с древнейших времен по 2017 г. (EMCA). / Модель землетрясений в Центральной Азии.
- 11 Тимуш А.В. Сеймотектоника литосферы Казахстана. - Алматы: LuxeMediaGroup, 2011. - 590 с.

М.Ю.Маркин

ТОО «ГеоСтройСистема», Алматы,
Казахстан, markin_maxim@inbox.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ПЕРЕКРЫТЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ УСТЬ- КАМЕНОГОРСК (РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)

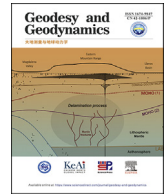
Аннотация. Актуальность темы определяется необходимостью выявления геодинамически активных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценки их текущей активности методами геофизики, что является важнейшей задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений.

Annotation. The relevance of the topic is determined by the need to identify geodynamically active faults hidden under thick layers of sedimentary rocks and assess their current activity using



Contents lists available at ScienceDirect

Geodesy and Geodynamics

journal homepage: <http://www.keaipublishing.com/geog>

Detailed seismic zoning of the East Kazakhstan region in the Republic of Kazakhstan

Q31 N.V. Silacheva*, N.P. Stepanenko, O.K. Kurilova, A.D. Kudabayeva, A.T. Danabayeva

Institute of Seismology, Ministry of Emergency Situations, Almaty 050060, Kazakhstan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 November 2022

Received in revised form

23 June 2023

Accepted 29 August 2023

Available online xxx

Keywords:

Probabilistic seismic hazard assessment

Detailed seismic zoning

Peak ground acceleration

Microseismic intensity

ABSTRACT

Kazakhstan is currently drafting new construction regulations that comply with the major provisions of the Eurocodes. Such regulations are created on the basis of seismic zoning maps of various degrees of detail, developed by our Institute of Seismology using a new methodological approach for Kazakhstan. The article is about creating the first normative map of the Detailed Seismic Zoning on a probabilistic foundation for the Republic of Kazakhstan's East Kazakhstan region. We carried out the probabilistic assessment of seismic hazard using a methodology consistent with the main provisions of Eurocode 8 and updated compared with that used in developing maps of Kazakhstan's General Seismic Zoning and seismic microzoning of Almaty. The most thorough and current data accessible for the area under consideration were combined with contemporary analytical techniques. Updates have been done to not only the databases being used but also the way seismic sources were shown, including active faults now. On a scale of 1:1000000, precise seismic zoning maps of the East Kazakhstan region were created for two probabilities of exceedance: 10 % and 2 % in 50 years in terms of peak ground accelerations and macroseismic intensities. The obtained seismic hazard distribution is generally consistent with the General Seismic Zoning of Kazakhstan's previous findings. However, because active faults were included and a thoroughly revised catalog was used, there are more pronounced zones of increased danger along the fault in the western part of the region. In the west of the territory, acceleration values also increased due to a more accurate consideration of seismotectonic conditions. Zoning maps are the basis for developing new state building regulations of the Republic of Kazakhstan.

© 2023 Editorial office of Geodesy and Geodynamics. Publishing services by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co. Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

East Kazakhstan region (EKR) is the largest industrial, energy, transport, and cultural region of the Republic of Kazakhstan. The reserves of mercury, silver, tungsten, tin, zinc, lead, gold, and rare metals are concentrated in the bowels. The foothill plains of Altai are the most favorable for various types of economic activity, but these areas are seismically hazardous.

Seismic hazard assessment and seismic zoning of the East Kazakhstan region were carried out in 2011 [1] in macroseismic

intensities and peak ground accelerations for three levels of probability of exceedance of 1 %, 5 %, and 10 % in 50 years. Over the past decade, the seismic and seismotectonic knowledge of the region has changed, and seismic stations have been added. More reliable ground motion prediction models have been developed based on the records of the world's strongest earthquakes. Kazakhstan has switched to building regulations consistent with the main provisions of Eurocode 8 [2] and included maps of the General Seismic Zoning (GSZ) of the territory of the republic on a new methodological basis. All these factors were the prerequisite for the creation of new probabilistic maps of the Detailed Seismic Zoning (DSZ) of the territory of the East Kazakhstan region within the framework of the national project "Seismic hazard assessment of the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis" [3].

As part of the DSZ of East Kazakhstan region project, the map of active faults has been significantly detailed and supplemented with new data. Faults, the activity of which is confirmed by modern seismicity, have been studied. The position of the faults

* Corresponding author.

E-mail address: silacheva_nat@mail.ru (N.V. Silacheva).

Peer review under responsibility of Institute of Seismology, China Earthquake Administration.



Production and Hosting by Elsevier on behalf of KeAi

<https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.08.005>

1674-9847/© 2023 Editorial office of Geodesy and Geodynamics. Publishing services by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co. Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Please cite this article as: N.V. Silacheva, N.P. Stepanenko, O.K. Kurilova *et al.*, Detailed seismic zoning of the East Kazakhstan region in the Republic of Kazakhstan, Geodesy and Geodynamics, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.08.005>

has been clarified, and their segmentation has been performed. As a result of the analysis and generalization of the collected data at the modern level using GIS technologies, a vector digital Map of active faults was developed, including an attributive database necessary for parameterization of the seismic source model in hazard assessment.

On the territory of the East Kazakhstan region and in the immediate vicinity of it, highly sensitive stations of the regional network of the Seismological Experimental and Methodical Expedition and the Institute of Seismology of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan operate – “Semipalatinsk” (since 1934), “Zaisan” (since 1990), “Taldykorgan” (since 1990), “Dzharkent” (since 1987), “Kapal-Arasan” (since 1988), as well as the stations of the Institute of Geophysical Research of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan – “Makanchi” (since 1996) and “Kurchatov” (since 2011) [1].

Based on macroseismic and instrumental data, catalogs of strong and weak earthquakes in the East Kazakhstan region have been compiled. The unified regional catalog of strong earthquakes in the region has been compiled since ancient times and is an information base for characterizing regional seismicity. At the same time, any regional or global catalogs require significant improvement for their use in probabilistic seismic hazard assessment (PSHA). In early 2022, as part of the Central Asia Seismic Hazard Assessment CASHA project, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) published a Complete Earthquake Catalog [4]. The catalog was compiled jointly with the national seismic monitoring and data centers and seismic networks in Kazakhstan, Kyrgyzstan and Tajikistan. It was developed specifically for the implementation of PSHA in the territories of these countries. CASHA used the results of many years of work of the Central Asian countries in a number of international projects to compile and harmonize the catalog, and carried out further comprehensive work to relocate earthquake sources, harmonize magnitudes, determine some moment magnitudes, remove explosions and a number of other transformations. To date, the CASHA catalog is the most comprehensive and reliable complete catalog for Central Asia and is used in the new DSZ of East Kazakhstan region.

Previously, there were no strong motion stations with digital or analog registration on the territory of the East Kazakhstan Region. In 2022, a local network of 8 strong motion stations is set up on Ust-Kamenogorsk land, but it is still in the early stages of operation, and no engineering-related records have been gathered. Records from seismically active regions of Kazakhstan were used to verify ground motion models for the EKR areas with a similar seismotectonic setting.

Carried out within the framework of the project [3] the study included the creation of a geological, geophysical, and seismotectonic basis for assessing the seismic hazard of the region, calculating the parameters of the seismic regime and seismotectonic deformation of the earth's crust, studying macroseismics, determining a system of ground motion models, modeling and parameterizing areal and fault seismic sources, probabilistic analysis of seismic hazard and seismic zoning of the territory of the East Kazakhstan region on the scale of the DSZ in terms of peak ground accelerations and the MSK-64 (K) scale intensities. Here is a part of the work directly related to the analysis of seismic hazard. The analysis was carried out using modern methodologies and analysis tools, as well as the most complete and up-to-date information available for the territory under consideration. The developed DSZ maps can be used in the design, reconstruction, and construction of national economy facilities, considering the state urban planning policy and the long-term strategic interests of the country's development in the new conditions. It is recommended to create a regulatory construction document based on them.

2. Data and methodology

PSHA of the East Kazakhstan region was carried out according to the methodology originally proposed by Cornell [5], but using the methodological formalism of Field et al. [6], implemented in Open Quake Engine [7] - open-source seismic hazard and risk calculation software developed, maintained and distributed by the Global Earthquake Model (GEM) Foundation).

PSHA provides a quantitative assessment of the probability of exceeding the levels of ground motion on the site from various earthquake sources, each of which has certain characteristics and seismogenerative potential. The main elements of PSHA are the creation of a model of seismic sources, their magnitude-frequency characteristic, the calculation of ground motion from all possible earthquakes from these sources, and the assessment of the probability that this ground motion will be exceeded in a given time. At any observation point in the study region, an estimate is made of the level of ground motion that is expected to be exceeded with a given probability and within a fixed observation time. In our case, the analysis was carried out for two levels of probability of exceedance 10 % and 2 % in 50 years. Assessments in quantitative parameters (peak ground accelerations PGA) and macroseismic intensities were performed independently based on the input data defined for them - ground motion prediction models and their parameters. The seismic potential of the sources and the magnitude-frequency characteristics of seismicity were determined for the case of the moment magnitude M_W (when assessed in PGA) and for the magnitude M_S (when assessed in macroseismic intensities).

The basis for compiling and characterizing the model of seismic sources was the seismotectonic model of the region and the catalog of earthquakes. The frequency of earthquake occurrence in each zone was characterized by determining the earthquake frequency model that best explains the observed data, the completeness of which was previously checked. From seismotectonic considerations, the predominant source mechanisms and the distribution of hypocenter depths, as well as the expected magnitude, were determined. For the calculation of ground motion, selected and tested on regional data ground motion prediction models were used. Probabilistic analysis was performed using the OpenQuake Engine software [7]. When performing a probabilistic assessment of the East Kazakhstan region, we took into account the experience of work on the general seismic zoning of the territory of Kazakhstan [8,9] and participation in international projects CASHA-BU [10] and SFRARR [11].

Seismotectonic setting. On the basis of updated and supplemented data from deep seismic soundings and seismometry, structural diagrams of the thickness of the sialic and basaltic layers of the consolidated crust, the base of the crust, and the thickness of the active mantle were developed. The structure of the consolidated basement was studied with the identification of the main structural-material complexes and the most important structure-forming faults, the structure of the platform cover, including material complexes, structural forms and faults, the latest tectonics, the intensity of neotectonic movements, the latest active faults, and the possible manifestation of paleoseismodislocations.

The mapped active faults of various morphokinematic types, taking into account the geophysical, geological, and tectonic studies, were the main framework for the development of an updated seismotectonic model in the form of a map of seismogenerative zones differentiated by the maximum magnitude of expected earthquakes [12].

Earthquake's catalog. For the territory of the East Kazakhstan region and its 300-km buffer zone, the catalog was prepared based on the “complete catalog of earthquakes” [4] the CASHA-BU project,

pecially designed for the implementation of the PSHA of the territories of Central Asia. The CASHA catalog is already homogenized in moment magnitude M_W , but other energy characteristics available for events are also given. Prioritization of data in the catalog is carried out according to the type of magnitude from higher priority to lower: $M_W \rightarrow K$ (energy-class) $\rightarrow mb \rightarrow M_L \rightarrow MPVA \rightarrow MLH$. For a wide magnitude range, moment magnitudes were directly determined using the coda calibration technique [4]. In the absence of direct estimates of M_W (or M_S for estimating macroseismic intensities), magnitude scaling relations were used.

For the EKR catalog (the territory of the region and the buffer zone), the completeness periods were refined (Table 1). The periods of complete registration are well distinguished in Fig. 1. The Gutenberg-Richter dependence for the complete EKR catalog is shown graphically in Fig. 2. The observed data are well approximated by the least square's method and by the maximum likelihood method starting from the minimum magnitude of completeness $M_{Wc} \geq 3.6$. However, the completeness graph clearly shows a step with $M_{Wc} \geq 3.2$. This discrepancy is explained by the heterogeneity of completeness magnitudes in the territory under consideration due to the lack of an observational network in the east of Kazakhstan, while in the southeastern part, it has been operating since the early 1980s and some stations even earlier. This is accounted for when calculating recurrence dependences for catalogs of individual seismic sources by taking small magnitudes into account or not taking them into account. For the territory of the East Kazakhstan region, the obtained b value in the Gutenberg-Richter equation is close to 1, which corresponds to typical observations.

Based on the results of the comparison of the catalog formed for EKR without declustering and with non-aggressive declustering using the Gardner-Knopoff algorithm (1974) [13] and given the limited data for the region, it was decided to use a non-declustered catalog.

Characteristics of earthquake source mechanisms in the region of East Kazakhstan were considered according to the data [14,15], and also based on the materials of the Project "Global Centroid Moment Tensor" (GCMT) [16], including data from Harvard

Table 1
Parameters of completeness of the EKR catalog (case M_W).

Time	M_W completeness range	Observation period (years)
1900–1950	≥ 5.5	118 (1900–2017)
1951–1957	≥ 4.8	67 (1951–2017)
1958–1965	≥ 4.4	60 (1958–2017)
1966–2002	≥ 3.6	52 (1966–2017)
2003–2017	≥ 3.2	15 (2003–2017)

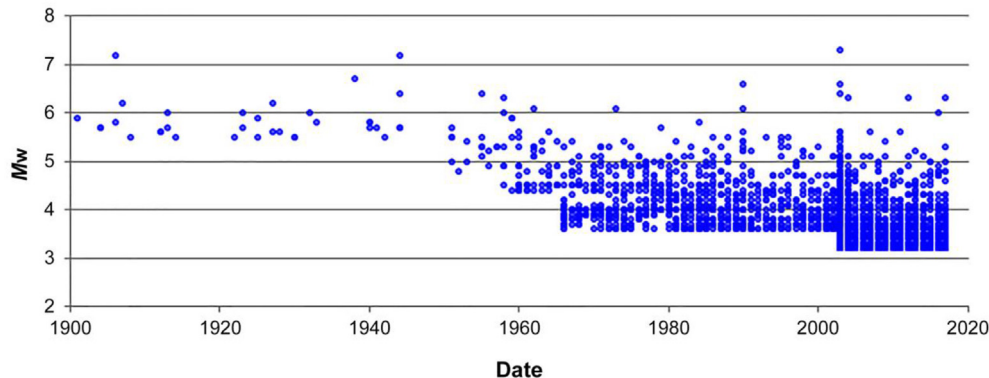


Fig. 1. Distribution of earthquakes by time and magnitude in the complete catalog of EKR (case M_W).

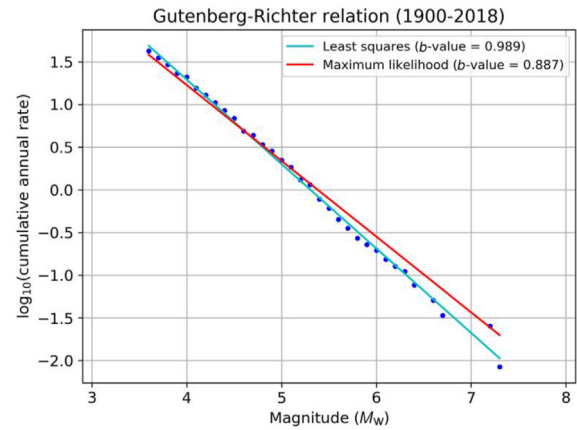


Fig. 2. The Gutenberg-Richter ratio for the representative catalog of the EKR. The dots show the cumulative annual frequency of earthquakes per magnitude interval. The regression graphs are calculated by the least squares and maximum likelihood methods.

University (HRVD) and the International Seismological Center (ISC). Dislocations in the sources are characterized by the predominance of strike-slips with a weak normal or reverse component - strike-slip - reverse and strike-slip - normal. The compressive stress axes are characterized by the northwest direction.

Seismic source model. In previous Kazakh PSHA projects [8] the hazard model included only areal seismic sources with standard distributed seismicity, built based on the Map of seismogenerative zones of Kazakhstan [12,17]. The configuration of the sources generally took into account geomorphological conditions and the location of earthquake epicenters. However, it is rather difficult to reproduce a realistic seismicity pattern based only on homogeneous seismic zones. In world practice, it is currently customary to use a hybrid approach, which combines direct modeling of active faults and a distributed representation of seismicity based on an earthquake catalog. This approach was also used in the DSZ of the East Kazakhstan region. This made it possible to more realistically represent the picture of seismicity and take into account the epistemic variability associated with various modeling methods.

Areal sources are built as polygonal zones based on GIS technologies. When identifying zones, the character of the distribution of seismicity, correspondence to important topographic and tectonic features, and theoretically estimated seismic potential were taken into account. The resulting model includes 38 areal seismic sources on the territory of the East Kazakhstan region and its 300-km buffer zone (Fig. 3).

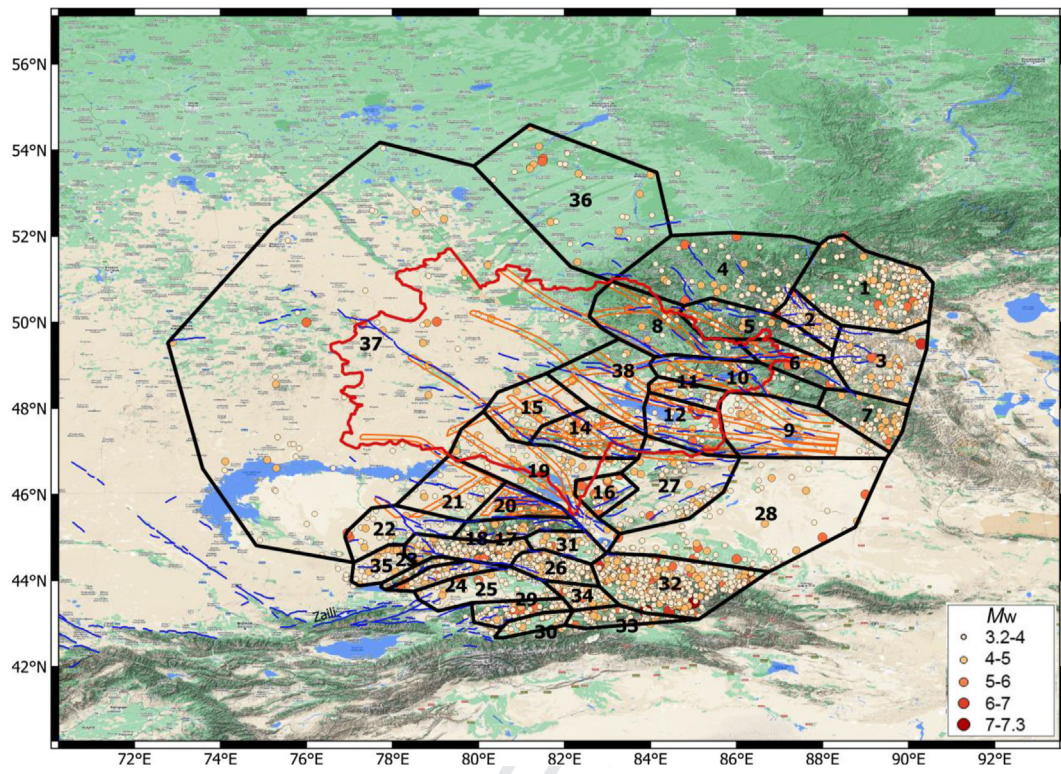


Fig. 3. A model of areal seismic sources, including the distribution of seismicity, topographic features (Google Terrain), seismogenerative zones (brown polygons [12]) and active faults. The zones are shown as polygons with a black outline; the EKR boundary is shown with a red outline.

The main parameters of areal seismic sources used in hazard analysis are their geometry, tectonic area, minimum and maximum (theoretical) magnitudes, thickness of the seismically active layer, kinematic parameters for the prevailing type of earthquakes, depth of hypocenters, parameters of the magnitude-frequency distribution.

The geometry of the selected zones is determined by the coordinates of the corners of the polygons. It is fixed in the attribute table of the zones, when they are built in GIS applications with reference to the terrain (in our case, in QGIS). According to the tectonic type, the zones on the territory of the East Kazakhstan region are classified as active crustal deformations (zones 1–35, 38 in Fig. 3) and stable crustal deformations (zones 36, 37). In PSHA, the minimum magnitude M_W is usually taken to be 4.5. The maximum depends on the length of the largest fault and is limited by the size of the zone. We also considered historical earthquakes and the potential of seismogenerative zones identified based on seismotectonic and engineering-geological studies [12]. The kinematic parameters of earthquakes (dip, strike, rake of the nodal plane) are estimated from the source mechanisms within the zone, and the depth of the hypocenters is estimated from the depth histogram for the zone. The parameters of the magnitude-frequency distribution of earthquakes were determined from the limited Gutenberg-Richter equation for the zone, which shows the cumulative annual frequency of events depending on their magnitude (for a complete catalog) and is limited by the given M_{Wmin} (catalog) and M_{Wmax} . Active faults were modeled inside the areal sources (where they were revealed). In this case, areal sources represent the contribution of earthquakes of smaller magnitude, which in our calculation is limited to $M_W < 6.4$. Thus, M_{Wmin} is the zone's least complete magnitude, while M_{Wmax} is 6.3 in the case of a hybrid zone, or equal to the zone's greatest theoretical magnitude in the absence of a fault. Fig. 4 displays examples of obtaining the

parameters of the bounded Gutenberg-Richter relation for spatial sources with and without faults.

Direct modeling of active faults in Kazakhstan is significantly complicated by the insufficient knowledge of the characteristics of most faults and, as a result, the lack of required input parameters (for example, kinematic parameters and slip rates of the fault) for calculating the hazard they cause. To improve the reliability of calculations, the analysis used two models of seismic sources in the form of finite faults - AFDB_EKR and AFDBe_EKR. The first one was converted from the Base of Active Faults of the Institute of Seismology of Kazakhstan, compiled based on information from the geological literature, reports of previous geological and geophysical studies, and available geological maps. The second one was compiled based on the Eurasian Active Faults Database [18]. The seismogenerative structures included in these bases are converted into models of seismic sources in the form of finite faults.

The database of active faults of the Institute of Seismology of Kazakhstan for the East Kazakhstan region was developed within the framework of Ref. [3] and contains information on 26 geographically referenced objects (faults and their segments) with signs of recent movements in the Late Pleistocene and Holocene: their names, segmentation, segment length and their geographical coordinates, data on kinematics (direction of movement), strike azimuth, dip angle, movement velocity, estimated magnitude M_W . AFDB_EKR included active faults and fault elements with $M_W \geq 6.4$.

Eurasia Active Fault Database [18] was developed in 2015–2019 at the Laboratory of Neotectonics and Modern Geodynamics of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences. Faults and fault zones on the territory of the East Kazakhstan region and the surrounding 200-km zone, belonging to the categories of reliability A, B and C [18], were selected in AFDBe_EKR, along which manifestations of movements during the late Pleistocene and Holocene were recorded, as well as active flexures

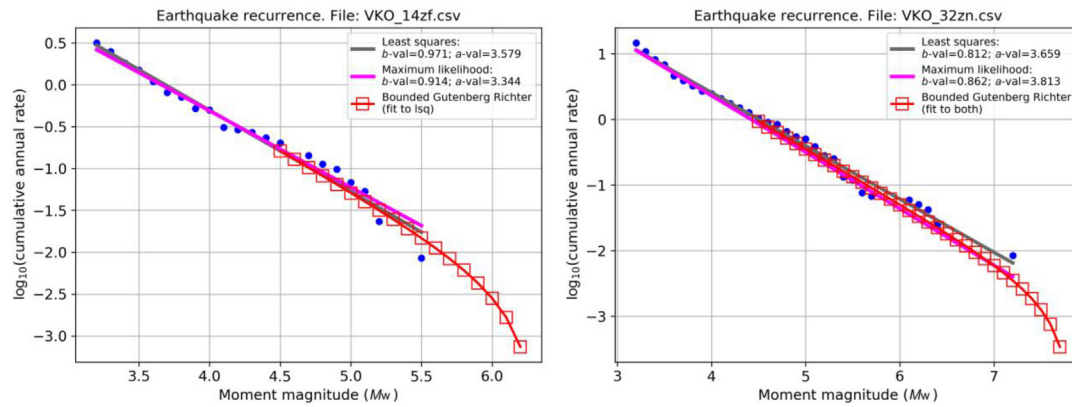


Fig. 4. Examples of the bounded Gutenberg-Richter relation for areal sources that include faults (left) and that do not include faults (right).

and folds, along which signs of young displacements were found. For each of them, the length is determined, and the depth is estimated (according to the thickness of the seismically active layer). According to the rank of the velocity of movement, assumptions were made about the slip rate. The maximum moment magnitude M_W is calculated from the fault length using the Wells and Coppersmith formula [19], and characteristic M_W is estimated, that is, the magnitude at which the fault most likely will repeatedly rupture. Seismic moments M_0 are estimated using the Youngs and Coppersmith formula [20]. The recurrence of earthquakes for faults is accepted taking into account the seismic analysis of the earthquake catalog.

The characterization of faults for the computational model included their geometry, the seismotectonic characteristic of the area, the thickness of the seismically active layer, the estimate of the strike and dip angles of the nodal plane of the fault, the M_W of the characteristic earthquake, the magnitude-frequency parameters, the total seismic moment M_0 , and a number of other parameters, including weight functions. In seismic hazard analysis, seismicity with $M_W \geq 6.4$ was modeled by fault seismic sources.

With sufficient consistency of the faults included in the two described models, they differ markedly in segmentation, which affects the maximum magnitude M_{Wmax} . Models of seismic sources in the form of active faults are shown in Fig. 5. In hazard assessment, the AFDB_EKR model was accepted with a weighting factor of 60 %, and the AFDBE_EKR model with a weighting factor of 40 %.

Thus, the seismic source model combines areal sources with two active fault models. The logic tree of seismic source models is shown in Fig. 6.

Ground motion models (GMM). Most of the territory of the East Kazakhstan region lies in a zone with an active seismotectonic regime. The previous study on the selection of GMM for highly seismic areas of Kazakhstan and testing of regional data was carried out as part of the work on the PSHA of the territory of Kazakhstan and the seismic zoning of Almaty in peak ground accelerations in 2013–2015 [8]. Enough time has passed since then, and many world models have been replaced by their later versions. In this study, we have revised the set of models for predicting ground motions, considering new data, internationally accepted selection criteria, and previous experience. The presence of models in the GMMs library of the Open Quake Engine software package was also considered [21]. Instead of Next Generation Attenuation (NGA) models [22], NGA-WEST2 [23] was considered, and the previously used Akkar and Bommer (AB2010) [24] and Zhao et al. (2006) [25] models were compared with their later

versions - Akkar et al. (2014) [26] and Zhao et al. (ZEA2016) [27] and with observed data.

Due to the lack of archival records of strong ground motion for the territory of the East Kazakhstan region, when testing models for predicting ground shaking, ground motion records obtained by strong motion networks in seismically active regions of Kazakhstan were used [28]. A lot of work on compiling a bank of ground motion parameters and selecting GMMs was carried out by us within the framework of Ref. [10]. The studies included the selection, analysis, and parameterization of digital and analog strong motion records with a lower threshold for acceleration $PGA \geq 30 \text{ cm/s}^2$, comparison of pre-selected GMMs with each other and with observed data (PGA, spectral accelerations SA on periods of 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2 and 4 s), compilation and testing of the logic tree. Fig. 7 shows examples of residuals for observed data and models.

Based on the performed study, 5 models were selected for use in PSHA of EKR in peak ground accelerations in active crustal areas: Abrahamson-Silva-Kamai (2014), Boore-Stewart-Seyhan-Atkinson (2014), Chiou-Youngs (2014), Zhao et al. (2016) and Akkar-Bommer (2010). The AB10 and ZEA16 models are in better agreement with the data than the NGA-West2 models and are included in the calculation with larger weights. For a tectonically stable region, a comparative analysis and selection of GMMs from those developed for similar seismotectonic conditions was also carried out. There are no observed data with a PGA level sufficient to verify models for this territory. The set of selected GMMs for the tectonically stable territories of the East Kazakhstan region included the models Boore2015NGAEastAB14, DarraghEtAl2015NGAEast1CCSP, ShahjoueiPezeschk2015NGAEast, Yenier-Atkinson2015 NGAEast [21].

In the analysis of macroseismic intensities, the AllenEtAl2012 ground motion prediction model [29] and BindiEtAl2011Repi for the case of calculations in intensities [30], included in the library of the Open Quake Engine software package [21] were used. Since these models are developed for less seismic areas and underestimate the data, additional adjustments were made based on the results of PSHA in accelerations.

Probabilistic seismic hazard analysis. Probabilistic analysis was performed using the OpenQuake Engine software [7]. As discussed above, the seismic source logic tree included two hybrid models - a combination of areal sources with two active fault models. The logic tree of ground motion prediction models for the PGA case included 5 GMMs for active crustal earthquakes and 4 GMMs for earthquakes in stable regions. For the case of macroseismic intensity, two GMMs were used, and an adjustment was

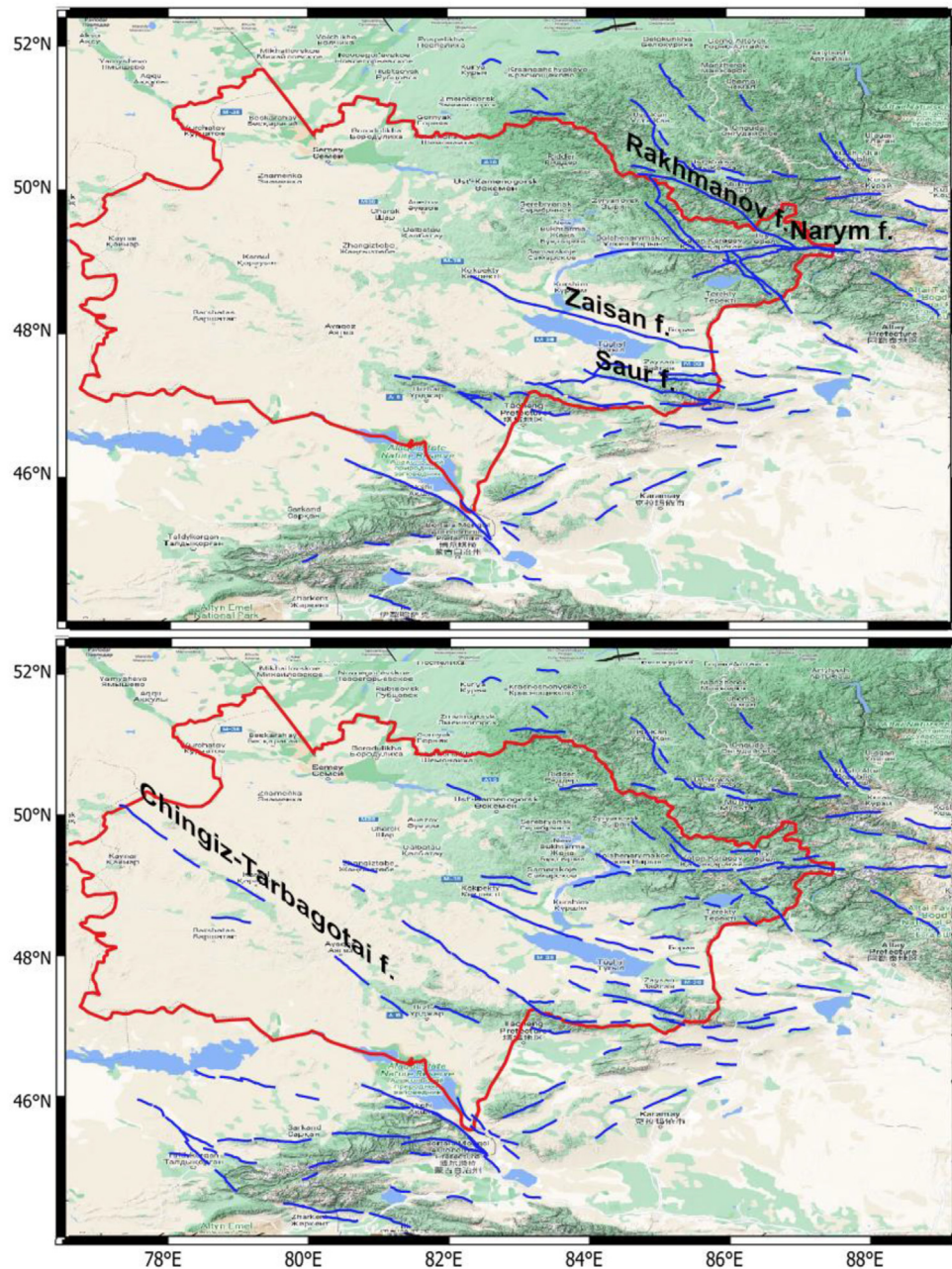


Fig. 5. Models of active faults AFDBE_EKR (top) and AFDB_EKR (bottom) ($M_{Wmax} \geq 6.4$). Faults and fault elements are shown as blue lines.

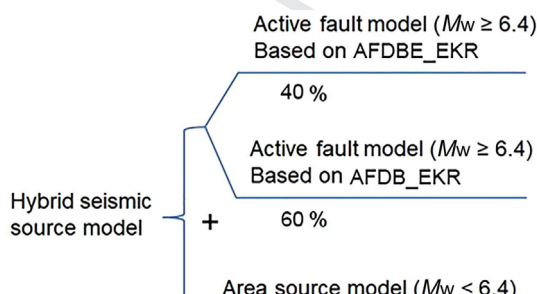


Fig. 6. Logic tree of seismic source models.

made according to the PGA calculations. The weight coefficients of individual branches were determined taking into account test calculations. The analysis was performed for two probabilities of exceedance - 10 % and 2 % in 50 years (return period 475 and 2475 years, respectively).

Ground conditions in the analysis of accelerations are characterized by the propagation velocity of share waves $V_{S30} \geq 800$ m/s (category IA according to Ref. [17]), which correspond to rocky and rock-like geological formations. Calculations were carried out in the average values of the geometric mean peak ground accelerations (PGA in fractions of g) for the territory, including the East Kazakhstan region within $45.0^\circ - 52.25^\circ$ N and $76.0^\circ - 88.0^\circ$ E on a grid with an interval of 5 km in both directions. The analysis in

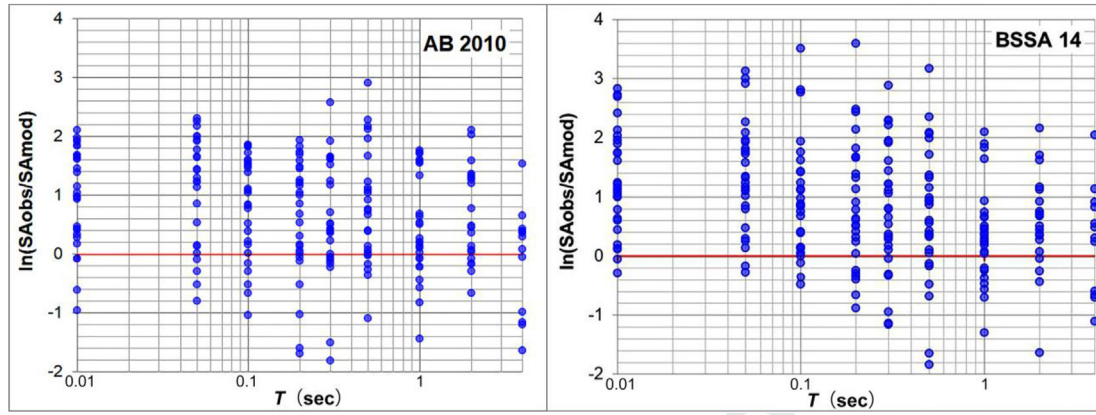


Fig. 7. An example of residuals for observed data and two models - Akkar and Bommer (AB2010) and Boore-Stewart-Seyhan-Atkinson (BSSA2014) from NGA2.

macroseismic intensities was made traditionally for Kazakhstan for the II category of soils [17] with $V_{S30} = 410$ m/c. Mapping was carried out at a scale of 1:1000000 in accordance with the requirements for the Detailed Seismic Zoning maps.

3. Results and discussion

The received maps of DSZ of the East Kazakhstan region are schematically shown in Figs. 8–11.

On the DSZ maps of the East Kazakhstan region developed in peak ground accelerations (Figs. 8 and 9), PGA increases from the northwest to the southeast that is from the territories with a stable tectonic regime (zones 36, 37 in Fig. 3) to the active regions (all zones except 36, 37 in Fig. 3). Fig. 3 illustrates a higher density of epicenters, and Fig. 4 illustrates a higher density of active faults in the southeastern half of the East Kazakhstan region. On the map with a probability of exceedance of 10 % in 50 years (Fig. 8), the PGA values increase from 0.040 g at the northwestern boundary of the region to 0.268 g in the south and 0.224 g in the southeast. On the map with a probability of exceeding 2 % over 50 years (Fig. 9), PGA increases from 0.132 g in the northwest to 0.514 g in the south and 0.482 g in the

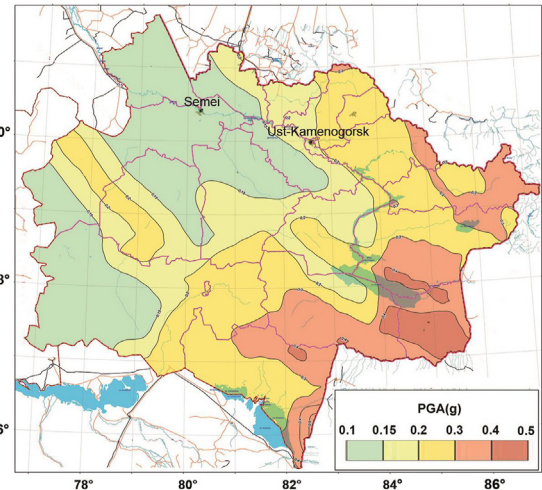


Fig. 9. Schematic map of the DSZ of the East Kazakhstan region in peak ground accelerations. Probability of exceedance is 2 % within 50 years.

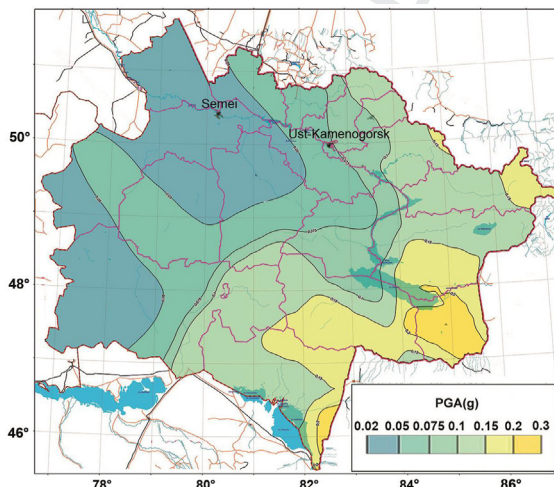


Fig. 8. Schematic map of the DSZ of the East Kazakhstan region in peak ground accelerations. Probability of exceedance is 10 % in 50 years.

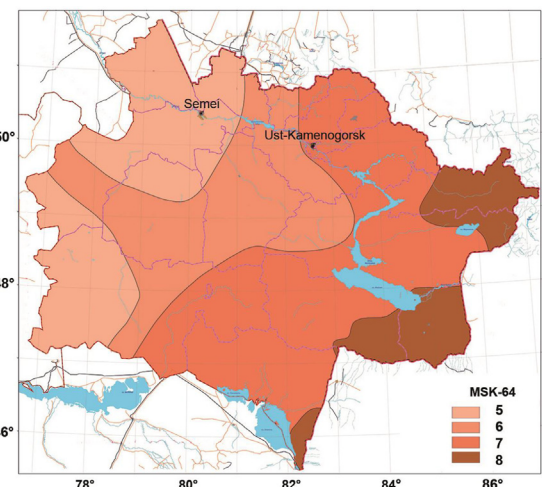


Fig. 10. Schematic map of the DSZ of the East Kazakhstan region in intensities of the MSK-64 (K) scale. Probability of exceedance is 10 % within 50 years.

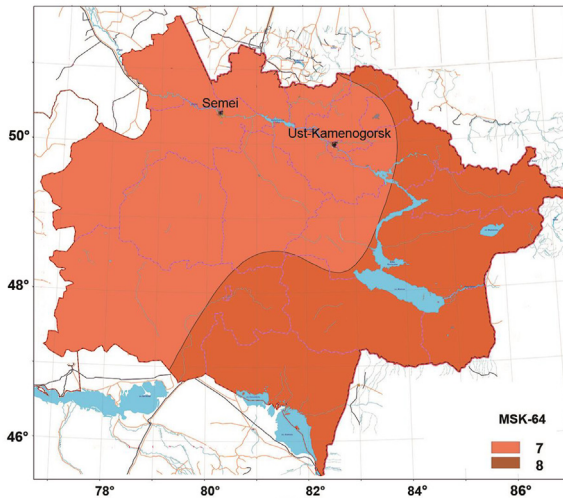


Fig. 11. Schematic map of the DZS of the East Kazakhstan region in intensities of the MSK-64 (K) scale. Probability of exceedance is 2 % within 50 years.

southeast. The maximum acceleration level in the southern part of the region is due to the highly seismic zone adjacent to the boundary with a high density of earthquakes with M_W of 5–6 (zone 16 in Fig. 3). In the southeast, the highly seismic zone 12 with $M_W > 6$ (Fig. 3) as well as the North Zaisan (M_W up to 7.2) and Saur (M_W up to 7.2) faults also have a great influence (Fig. 5).

The highly seismic Naryn (M_W up to 7.5) and Rakhmanov (M_W up to 7.5) faults increase the level of the expected PGA in the eastern part. On the maps of macroseismic intensities, these areas correspond to an intensity of 8 according to the MSK-64(K) scale.

In general, the seismic hazard distribution obtained in this DSZ is consistent with the data of the General Seismic Zoning of Kazakhstan [17]. Due to the use of not only areal sources but also active faults, thorough cleaning of the catalog from explosions, and refinement of the fault map, more pronounced areas of higher danger along the Chingiz-Tarbagatai fault were obtained in the western part of the region (Fig. 5) than during the General Seismic Zoning. In the west of the territory, the values of expected PGA also increased due to more accurate consideration of seismotectonic conditions and the seismic potential of territories with a stable regime. The attenuation of seismic waves is less here than in regions with active tectonics, which may be due to a highly fractured crust occurring in tectonically active regions, which effectively absorbs high-frequency seismic energy [31] and due to differences in crustal temperature and variations in crustal structures that control elastic wave propagation [32].

The main cities of the East Kazakhstan region, with a population of more than 300 thousand people are Ust-Kamenogorsk and Semei. Fig. 12 shows the obtained seismic hazard curves and unified hazard spectra for these cities. Fig. 13 shows the results of hazard disaggregation for Ust-Kamenogorsk and Semei.

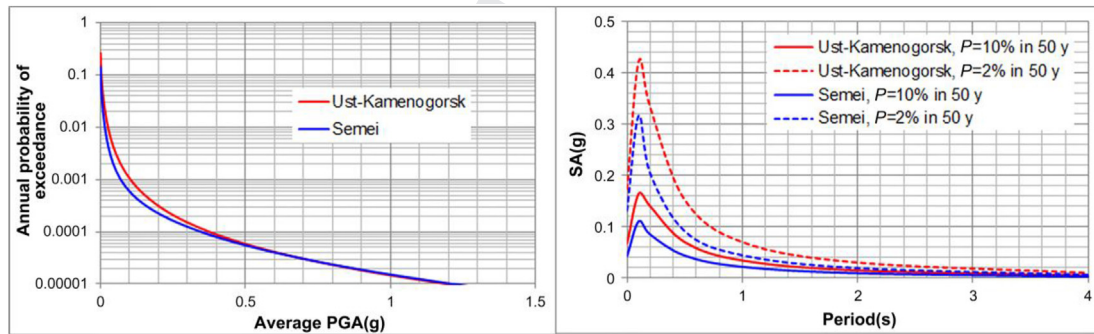


Fig. 12. Seismic hazard curves (left) and uniform hazard spectra for the probability of exceedance 10 % and 2 % in 50 years (right) for Ust-Kamenogorsk and Semei.

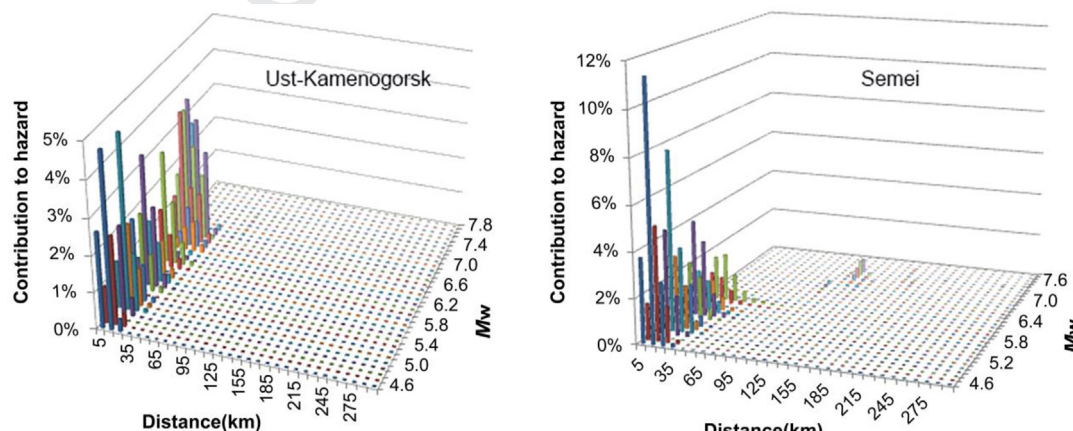


Fig. 13. Disaggregation of seismic hazard for Ust-Kamenogorsk (left) and Semei (right).

Hazard disaggregation shows that the main comparable contribution to the seismic hazard of Ust-Kamenogorsk is made by both distributed seismicity of areal sources, including the territory of the city and its environs (M_W 4.5–6.3), and the nearby Irtysh fault zone with characteristic magnitude M_W 6.4–6.7. The contribution of other sources is much smaller. On the territory of Semei, the danger is determined by distributed seismicity. A small contribution of the remote Irtysh and Zaisan faults is noticeable at about 120 km.

4. Conclusion

A set of maps of detailed seismic zoning of the territory of the East Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan on a scale of 1:1000000 was created based on the results of research work on probabilistic seismic hazard assessment on a new methodological basis.

The probabilistic seismic hazard assessment was carried out based on a methodology that is consistent with the main provisions of Eurocode 8 and significantly updated compared with that used in the development of maps of the general seismic zoning of the territory of Kazakhstan. Modern methods and analysis tools were used, as well as the most complete and up-to-date information available for the territory under consideration. The regional, local seismicity and seismic regime of the East Kazakhstan region were studied. The macroseismic manifestations of strong earthquakes and the patterns of attenuation of the intensity of shaking have been studied. The earthquake catalog is based on the latest international research. Based on the analysis of the latest tectonic movements and their intensity, geophysical studies on the territory of East Kazakhstan, the seismotectonic model of the zones of occurrence of earthquake sources has been updated. The map of active faults has been detailed and supplemented with new data. Summary catalogs of parameters of earthquake source mechanisms have been created.

In contrast to previous estimates, the seismic source model includes not only the areal distribution of seismicity, but also active faults. Ground motion prediction models have been updated and their applicability to the region tested on local data.

The Detailed Seismic Zoning maps of the East Kazakhstan region are developed for two probabilities of exceedance - 10 % and 2 % in 50 years and are presented in peak ground accelerations and macroseismic intensities. Zoning maps are the basis for the development of new state construction regulations of the Republic of Kazakhstan.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflicts of interest.

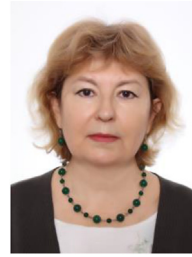
Acknowledgements

The work was carried out within the “Seismic hazard assessment of the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis”, program code F.0980, IRN OR11465449. The funding source is the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. When analyzing the data, computer programs were developed by Dr. Carlos Herrera, Senior Seismologist of Onur Seemann Consulting, Inc., within the framework of the CASHA-BU project. We are grateful to the associate editor and reviewers of Geodesy and Geodynamics.

References

- [1] T. Abakanov, A. Lee, A. Sydykova, N. Stepanenko, N. Silacheva, R. Sadyrov, Methodology of development of seismic zoning maps for the earthquake Prone regions in Kazakhstan (on the example of East Kazakhstan Province, Kazakhstan, 2013, p. 127.
- [2] SN RK EN 1998-1:2004/2012, Eurocode 8: design of earthquake-resistant structures - Part 1: general rules, seismic impacts and rules for buildings, BR of the Republic of Kazakhstan, Almaty, 2011 [in Russian].
- [3] Research report F.0980, Seismic hazard assessment of the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis, LLP "Institute of Seismology of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 2021, p. 302.
- [4] T. Onur, R. Gök, K. Mackey, K. Abrams, A. Berezina, N. Mikhailova, B. Bekturganova, Sh. Murodkulov, I. Bondar, C. Herrera, Central Asia seismic hazard assessment (CASHA) “complete” catalog of earthquakes, 2021. LLNL-TR-828313.
- [5] C.A. Cornell, Engineering seismic risk analysis, Bull. Seismol. Soc. Am. 58 (1968) 1583–1606.
- [6] E.H. Field, T.H. Jordan, C.A. Cornell, OpenSHA: a developing community-modeling environment for seismic hazard analysis, Seismol. Res. Lett. 74 (2003) 406–419.
- [7] M. Pagani, D. Monelli, G. Weatherill, L. Danciu, H. Crowley, V. Silva, P. Henshaw, L. Butler, M. Nastasi, L. Panzeri, others, OpenQuake engine: an open hazard (and risk) software for the global earthquake model, Seismol. Res. Lett. 85 (2014) 692–702.
- [8] N.V. Silacheva, U.K. Kulbayeva, N.A. Kravchenko, Probabilistic seismic hazard assessment of Kazakhstan and Almaty city in peak ground accelerations, Geod. Geodyn (2018) 131–141.
- [9] T.D. Abakanov, A.N. Lee, A.B. Sadykova, N.V. Silacheva, Modern approaches to assessing seismic hazard to ensure the economic and environmental security of Kazakhstan, in: Proceedings of the world congress of engineers and scientists WSEC-2017, vol. 2, Astana, 2017, pp. 106–111.
- [10] ISTC #KR-2398 Central Asia Seismic Hazard Assessment and Bulletin Unification (CASHA-BU). - URL: (<http://istc.kz/ru/project/CGED00D8E716F2954625819200226DB4>) (accessed 20.10.2021r.).
- [11] SFRARR “Strengthening Financial Resilience and Accelerating Risk Reduction in Central Asia” URL: https://www.gfdrr.org/sites/default/files/SFRARR%20Project%20fact%20sheet_RU.pdf (accessed 27.10.2022).
- [12] A.V. Timush, T.V. Taradaeva, N.P. Stepanenko, A.B. Sadykova, A. Sydykov, Seismogenerative zones of Kazakhstan. - almaty, High Technology, 2012, p. 81.
- [13] J.K. Gardner, L. Knopoff, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? Bull. Seismol. Soc. Am. 64 (1974) 1363–1367.
- [14] N.N. Mikhailova, N.N. Poleshko, On the mechanisms of earthquake sources in East Kazakhstan, Bulletin of NNC of RK, 2005, pp. 142–146.
- [15] N.N. Mikhailova, N.N. Poleshko, Seismicity and the nature of the stress-strain state in weakly seismic regions of Kazakhstan, Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (2) (2013) 140–154.
- [16] Global CMT Web Page. <https://www.globalcmt.org/>. (Accessed 11/1/2022).
- [17] SP of RK 2.03-30-2017, Construction in seismic zones, - Astana, 2017, p. 110.
- [18] D.M. Bachmanov, A.I. Kozhurin, V.G. Trifonov, Database of active faults in Eurasia, Geodynamics and tectonophysics 8 (4) (2017) 711–736.
- [19] L. Donald, Wells, J. Kevin, Coppersmith, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, BSSA 84 (No. 4) (1994) 974–1002.
- [20] R. Youngs, K. Coppersmith, Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, BSSA 75 (4) (1985) 939–964.
- [21] OpenQuake Hazard Library website: <https://docs.openquake.org/oq-engine/master/openquake.hazardlib.gsim.htm>.
- [22] D.M. Boore, Ground-motion prediction equations (GMPEs) from a global dataset: the PEER NGA equations, in: Book: earthquake data in engineering Seismology, 2011, pp. 3–15, https://doi.org/10.1007/978-94-007-0152-6_1.
- [23] Y. Bozorgnia, N.A. Abrahamson, K.W. Campbell, B. Rowshandel, Y. Shantz, T. NGA-west2: a comprehensive research program to update ground motion prediction equations for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions, in: Proceedings of the 15, WCEE, Lisboa, 2012.
- [24] S. Akkar, J.J. Bommer, Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East, Seism. Res. Ltrs 81 (2) (2010) 195–206.
- [25] J.X. Zhao, J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H.K. Thio, P.G. Somerville, Fukushima, Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period, Bull Seismol Soc Am 96 (2006) 898–913.
- [26] S. Akkar, M.A. Sandikkaya, J.J. Bommer, Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, Bull Earthq Eng 12 (1) (2014) 359–387.
- [27] Zhao, J.X., Zhou, Sh, Zhou, J., Zhao, Ch, Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Irikura, K. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. Bull. Seismol. Soc. Am. V 106(4). P.1552–1569.

- [28] N. Silacheva, U. Kulbayeva, N. Kravchenko, A. Kudabayeva, Bank of ground motion parameters for the territory of Kazakhstan, *Geotech. Geol. Eng.* 40 (2016) (2022) 3819–3826.
- [29] T.I. Allen, D.J. Wald, C.B. Worden, Intensity attenuation in active crustal regions, *J. Seismol.* 16 (2012) 409–433.
- [30] D. Bindi, S. Parolai, A. Oth, K. Abdrakhmatov, A. Muraliev, J. Zschau, Intensity prediction equations for central Asia, *Geophys J Int* 187 (2011) 327–337.
- [31] K. Aki, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. In.* 21 (1980) 50–60.
- [32] B.L.N. Kennett, Lg waves and structural boundaries, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76 (1986) 1133–1141.



Dr. Natalya V. Silacheva is the head of the Laboratory of Engineering Seismology in the Institute of Seismology LLP, Ministry of Emergency Situations, Republic of Kazakhstan. Her interests focus on seismic hazard assessment and seismic zoning, research on ground motion and local site effects.