

УДК 004.42

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

*Н.В. Беркович, Н.А. Сычева*

Представлены результаты разработки программы для расчета параметров деформации земной коры: интенсивности скорости сейсмотектонических деформаций (СТД) и концентрации трещин. На основе применения разработанной программы получены распределения интенсивности СТД и концентрации трещин для земной коры Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань) во времени и в пространстве. Для расчета параметров деформации земной коры использовался каталог сейсмических событий, полученный по данным сети KNET (Kyrgyz Seismic Network). Максимальная интенсивность скорости сейсмотектонических деформаций отмечена в районе Кочкорской впадины.

*Ключевые слова:* программа; классы; землетрясение; земная кора; коэффициент трещиноватости; интенсивность сейсмотектонических деформаций.

---

## ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН МАЙЫШУУСУНУН ПАРАМЕТРЛЕРИН БААЛОО ПРОГРАММАСЫН ИШТЕП ЧЫГУУ

*Н.В. Беркович, Н.А. Сычева*

Бул макалада жер кыртышынын майышуусунун параметрлерин: сейсмотектондук майышуунун ылдамдыгынын интенсивдүүлүгүн жана жаракалардын концентрациясын эсептөө үчүн программаны иштеп чыгуунун жыйынтыктары көрсөтүлдү. Иштелип чыккан программаны колдонуунун негизинде сейсмотектондук майышуунун интенсивдүүлүгүнүн бөлүштүрүлүшү жана Бишкек геодинамикалык полигонунун жер кыртышы үчүн (Түндүк Тянь-Шань) жаракалардын концентрациясы алынды. Жер кыртышынын майышуусунун чен-өлчөмүн эсептөө үчүн KNET (Kyrgyz Seismic Network) тармагынын маалыматтары боюнча алынган сейсмикалык окуялардын каталогу пайдаланылды. Сейсмотектондук майышуунун ылдамдыгынын максималдуу интенсивдүүлүгү Кочкор ойдуңунун аймагында белгиленди.

*Түйүндүү сөздөр:* программа; класстар; жер титирөө; жер кыртышы; жаракалардын коэффициенти; сейсмотектондук майышуунун интенсивдүүлүгү.

---

## DEVELOPMENT OF THE EARTH CRUST DEFORMATION PARAMETERS ESTIMATION PROGRAM

*N. V. Berkovich, N. A. Sycheva*

The present article addresses development of the earth crust deformation program: intensity of the seismotectonic deformation (STD) rate and fissure concentration. Upon the program application the following parameters have been calculated: the intensity distribution of the STD rate and fissure concentration for the earth crust of Bishkek geodynamic proving ground within the time-space context. Calculation of the earth crust deformation parameters is based on the catalogue of seismic event provided by KNET (Kyrgyz Seismic Network). The maximum intensity of the rate of seismotectonic deformations was noted in the region of the Kochkor Depression.

*Keywords:* program; classes; earthquake; crust; jointing coefficient; intensity of seismotectonic deformations.

**Введение.** Каждое землетрясение – это разрыв в неоднородном материале (земной коре). Деформации в коре накапливаются постепенно, приводя к локальному развитию разрывов. Изучение современных движений земной коры

связано с исследованием интенсивности сейсмотектонических деформаций, определяемых аналитически по данным о сейсмическом режиме. Важным представляется исследование не только интенсивности процесса деформации земной

коры, но и процесса накопления в ней трещин, который может привести к образованию магистрального разрыва – крупного землетрясения.

Интенсивность скорости сейсмотектонических деформаций можно оценить с помощью выражения [1].

$$I = \frac{1}{GTV} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига и для него значение принимается  $G = 3 \cdot 10^{11} \text{ дин} / \text{см}^2$ ;  $V$  – объем;  $T$  – время в годах.

Для того чтобы определить интенсивность STD, можно выполнить непосредственное суммирование скалярных сейсмических моментов в пределах исследуемой ячейки согласно выражению (1). Известное эмпирическое выражение связывает скалярный сейсмический момент  $M_0$  в единицах  $\text{дин} \cdot \text{см}$  с магнитудой землетрясения  $M$ :  $\lg(M_0) = 15.4 + 1.6M$  [2]. Для того чтобы перейти от класса землетрясения к магнитуде, существует формула  $M = (K - 4) / 1.8$  [3].

Параметр концентрации трещин  $K_{cp}$  имеет ясный физический смысл и представляет собой отношение среднего расстояния между сейсмогенными разрывами, произошедшими в некотором сейсмоактивном объеме  $V_0$  за время  $\Delta T$ , к их средней длине [4, 5]:

$$K_{cp} = \mu^{-1/3} / l_{cp}, \quad (2)$$

где  $\mu = V_0 / N$  – объемная плотность (концентрация) разрывов, идентифицируемая по произошедшим землетрясениям;  $l_{cp}$  – средняя длина разрыва по ансамблю трещин:

$$l_{cp} = \frac{1}{N} \sum_j l_j, \quad (3)$$

$N$  – общее число землетрясений в диапазоне энергетических классов  $[K_{\min}, K_{\max}]$ , произошедших в элементарном сейсмоактивном объеме  $V_0$  за время  $\Delta T$ ;  $l_j$  – длина единичного сейсмогенного разрыва, которая оценивается по формуле:

$$\lg l_j = aK_j + c, \quad (4)$$

где  $K_j$  – энергетический класс (или магнитуда) землетрясения.

В разных сейсмоактивных регионах коэффициенты  $a$  и  $c$  могут иметь различное значение. Из опыта использования  $K_{cp}$  в ряде сейсмоактивных регионов мира следует, что наиболее удачный выбор значений коэффициентов  $a = 0.244$ ,  $c = -2.266$  [2]. В случае использования магнитуды вместо энергетического класса в выражении (4) вместо  $K_j$  можно подставить  $M$ ,

но при этом коэффициенты изменят значения на следующие:  $a = 0.440$ ,  $c = -1.289$ . Следует отметить, что распределение этого коэффициента в пространстве позволяет выявить наиболее трещиноватую область, а мониторинг во времени позволяет оценить скорость накопления трещин, которые могут привести к генеральному разрыву, т. е. при расчете  $K_{cp}$  рассматривается накопительный подход.

Следует отметить, что при исследовании изменения параметров деформации в пространстве используется динамический подход (вычисления ведутся по сетке с определенным шагом).

Цель данной работы – разработка программы для расчета вышеупомянутых параметров деформации земной коры.

**Разработка программы.** Для разработки программы BER\_DEFORMATION был использован язык C# и среда разработки Visual Studio. Язык C# позволяет использовать объектно-ориентированный подход при написании программ, и предоставляет мощную библиотеку классов для решения типовых задач [6]. Среда Visual Studio предоставляет возможность создания простого и удобного графического интерфейса на платформе .NET с использованием технологии Windows Forms [7].

**Входные данные** представляют собой каталог сейсмических событий, который должен содержать следующую информацию о землетрясении: дата, время (часы, минуты, секунды), широта, долгота, глубина, класс.

Выходные данные имеют различный формат в зависимости от анализируемого параметра, а также от выбранного критерия анализа – в пространстве или во времени.

Данные расчета интенсивности деформации в пространстве включают координаты ячейки, для которой приводился расчет (долгота, широта) и значение интенсивности. Если расчет ведется по времени, то выходные данные включают значение даты, к которому привязывается результат и соответствующее значение интенсивности. Данные расчета коэффициента трещиноватости в пространстве включают координаты ячейки, для которой приводился расчет (долгота, широта), значение коэффициента и количество событий, попавших в эту ячейку. Если расчет ведется по времени, то выходные данные включают год, для которого приводился расчет,

Таблица 1 – Перечень и назначение разработанных классов

Класс	Назначение
<i>ProjectFunctions</i>	Содержит методы расчета исследуемых параметров (интенсивность СТД и коэффициент сейсмогенных разрывов)
<i>Earthquake</i>	Хранит информацию и выводит информацию о параметрах землетрясения
<i>Date</i>	Хранит информацию о дате и позволяет совершать некоторые операции над ней
<i>Cell</i>	Хранит размеры ячейки в географических координатах
<i>Depth</i>	Хранит информацию о минимальной и максимальной глубине
<i>StatisticsForm</i>	Содержит методы оценки некоторых статистических характеристик исследуемого каталога

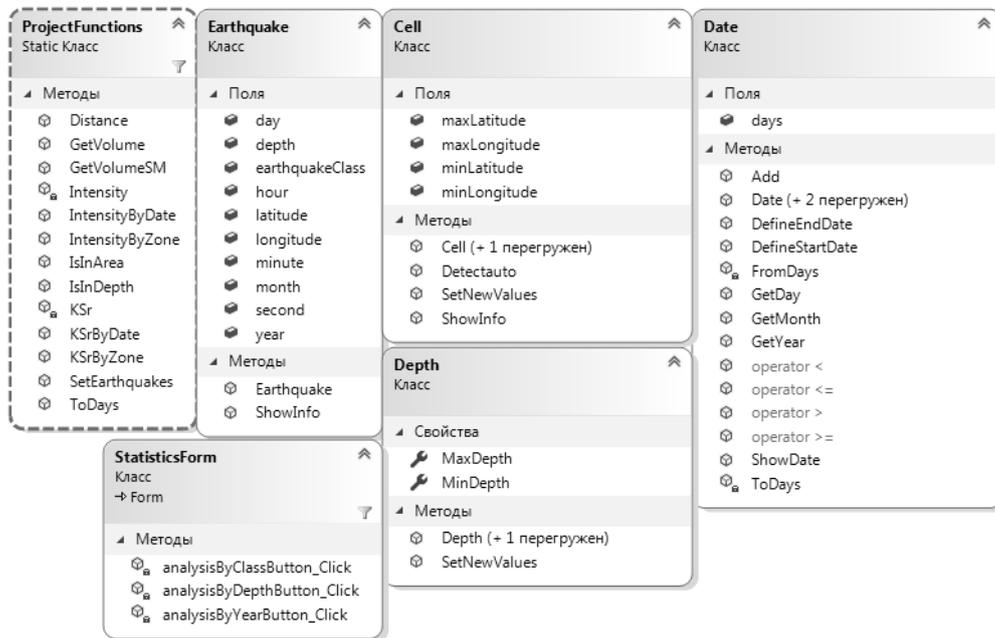


Рисунок 1 – Диаграмма классов программы BER\_DEFORMATION

значение коэффициента и количество событий, произошедших за это время. Следует отметить некоторые особенности расчета исследуемых параметров во времени: при расчете изменения параметра концентрации трещин по времени используется накопительный подход, а для расчета интенсивности деформации учитываются землетрясения, произошедшие за рассматриваемый период. Выходные данные, как результаты расчета, сохраняются в текстовых файлах.

Для решения задачи были разработаны классы. В таблице 1 указано назначение каждого класса, а на рисунке 1 представлена диаграмма классов.

При работе с каталогами сейсмических событий важно получить представление о самих

данных: количество землетрясений в каталоге, временной период и границы территории, который охватывает каталог, распределение землетрясений по глубине и по энергетической характеристике. С этой целью дополнительно был разработан класс *StatisticsForm*.

На рисунке 2 представлена диаграмма вариантов использования, которая отражает функционал разработанного программного продукта и дает представление обо всех операциях, доступных пользователю (актеру). В качестве пользователя может выступать сейсмолог-исследователь.

**Тестирование.** На этапе разработки программы было выполнено компонентное тестирование, которое проверяет функциональность



Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования программы BER\_DEFORMATION

и ищет дефекты в частях приложения, которые доступны и могут быть протестированы по отдельности (модули программ, объекты, классы, функции и т. д.). В частности, были выбраны ячейки с малым количеством землетрясений, и для них вручную выполнены расчеты параметров деформации земной коры, которые в даль-

нейшем сравнивались с результатами, полученными программой.

**Результаты.** Разработанная программа BER\_DEFORMATION была использована для оценки распределения интенсивности STD и  $K_{cp}$  в пространстве и во времени на территории Бишкекского геодинамического полигона, ограниченного координатами  $41.5^{\circ}$ – $43.5^{\circ}$  с.ш. и  $73^{\circ}$ – $77^{\circ}$  в.д. Исследования проводили на основе каталога сейсмических событий, полученного по данным сейсмологической сети KNET [8]. Каталог содержит данные о более чем 10000 локальных землетрясениях, которые произошли с 1994 по 2017 г.

Для расчета интенсивности STD и  $K_{cp}$  во времени рассматривали данные за каждый год, а при построении распределения в пространстве размер ячейки составлял  $1^{\circ}$  и величина сдвига  $0.2^{\circ}$ .

На рисунке 3 представлены распределения исследуемых параметров во времени. Наряду с распределениями параметров деформации земной коры были построены количественные характеристики землетрясений, участвующих в расчете. Максимум интенсивности STD приходится на 2006 г. (рисунок 3, а). В этот год в районе Кочкорской впадины произошло са-

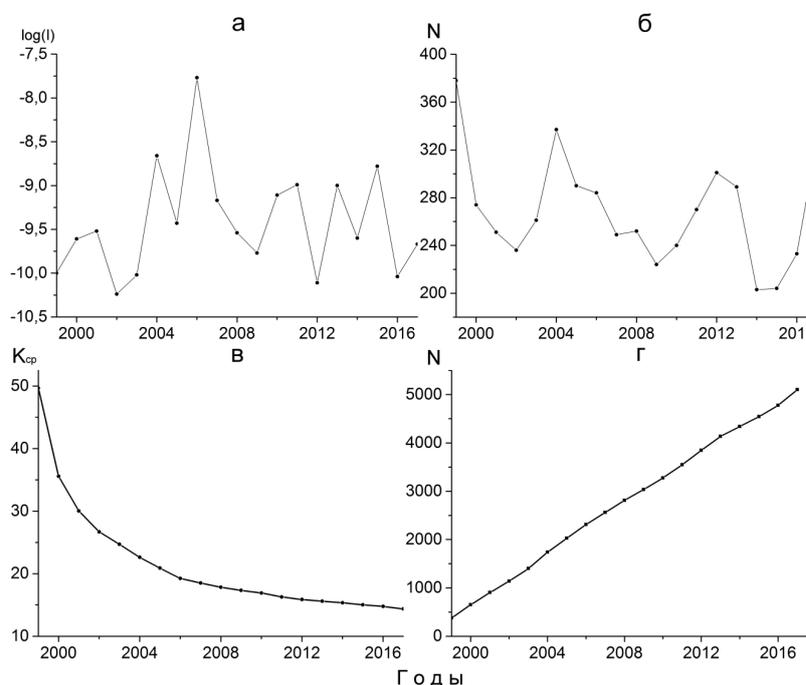


Рисунок 3 – Распределение логарифма интенсивности STD и  $K_{cp}$  во времени (а, в) и количество землетрясений (б, г). Расчет выполнен программой BER\_DEFORMATION

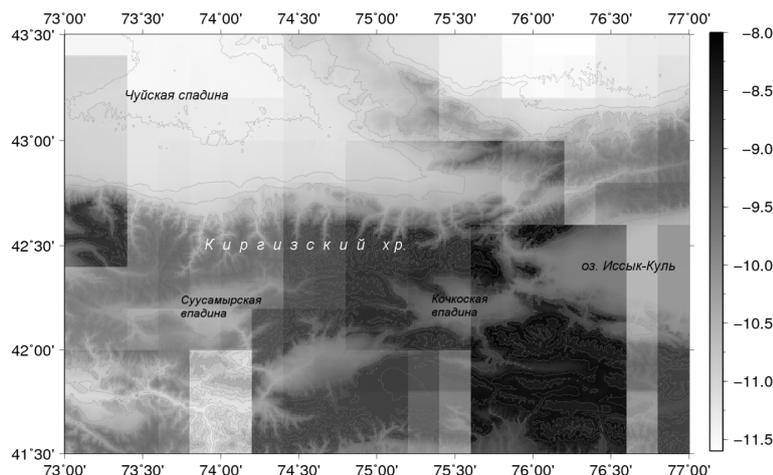


Рисунок 4 – Распределение логарифма интенсивности деформации СТД на территории БГП

мое крупное событие (25.12.2006,  $K = 14.83$ ) на территории БГП за последнее время, при этом максимум сейсмических событий приходится на 1999 г. (рисунок 3, б). Значение коэффициента сейсмогенных разрывов уменьшается (рисунок 3, в), а количество землетрясений растёт (рисунок 3, г), поскольку они вычисляются с накоплением. Значение  $K_{cp}$  стремится к некоторому критическому значению, при достижении которого может произойти генеральный разрыв, который сопровождается землетрясением.

На рисунке 4 представлено распределение логарифма интенсивности СТД на территории Бишкекского геодинамического полигона. Для построения карты был использован пакет GMT (The Generic Mapping Tools). В качестве входных данных использовался выходной файл, полученный программой BER\_DEFORMATION.

Согласно рисунку 4, максимум интенсивности СТД приходится на восточную часть Киргизского хребта и юго-западную часть побережья оз. Иссык-Куль, включая Кочкорскую впадину, вблизи которой произошло Кочкорское землетрясение.

**Заключение.** В результате выполненной работы была разработана программа BER\_DEFORMATION, предназначенная для расчета параметров деформации земной коры: интенсивности сейсмотектонической деформации и параметра концентрации сейсмогенных разрывов. Применение программы позволило оценить интенсивность СТД и концентрацию сейсмогенных разрывов для территории Бишкекского геодинамического полигона.

Получены распределения исследуемых параметров, как во времени, так и в пространстве. Максимальная интенсивность скорости сейсмотектонических деформаций отмечена в районе Кочкорской впадины и составляет  $6.09E-9$  год<sup>-1</sup>.

#### Литература

1. Лукк А.А. Сейсмотектоническая деформация Гармского района / А.А. Лукк, С.Л. Юнга // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 24–43.
2. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент / Ю.В. Ризниченко // Исследование по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
3. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии / Ю.В. Ризниченко // Избр. тр. М.: Наука, 1985. 408 с.
4. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А.Д. Завьялов. М.: Наука, 2006. 254 с.
5. Соболев Г.А. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов / Г.А. Соболев, А.Д. Завьялов // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 69–71.
6. Полное руководство по языку программирования C# 7.0 и платформе .NET 4.7. URL: <https://metanit.com/sharp/tutorial/> (дата обращения: 01.03.2019).
7. Руководство по программированию в Windows Forms. URL: <https://metanit.com/sharp/windows-forms/> (дата обращения: 01.03.2019).
8. Сычева Н.А. Киргизская сейсмологическая сеть KNET / Н.А. Сычева // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 5. С. 175–183.